

การยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 และ
เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดโดยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

CORROSION INHIBITION OF HASTELLOY C276 AND
304 STAINLESS STEEL IN ACID BY SODIUM DODECYL SULFATE



นางสาววัชราวลี สาระคำ
นางสาวภัสส์ชนกกร จิ่งจรรย์านนท์
นางสาวอภิสร่า เกตุพงษ์ชัย

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 และ
เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรด โดยโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต

CORROSION INHIBITION OF HASTELLOY C276 AND
304 STAINLESS STEEL IN ACID BY SODIUM DODECYL SULFATE



นางสาววิชราวลี

นางสาวภัสส์ชนกกร

นางสาวอภิสรรา

สารระคำ

จิงจรรย์านนท์

เกตุพงษ์ชัย

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหานี้หรือส่งข้อมูลนี้ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CORROSION INHIBITION OF HASTELLOY C276 AND
304 STAINLESS STEEL IN ACID BY SODIUM DODECYL SULFATE



MISS WATCHARAWALEE SARAKHAM
MISS PHATCHANOKPORN JUNGJARIYANON
MISS APHISARA KETPHONGCHAI

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ FACULTY OF SCIENCE ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG การนำไปได้
ACADEMIC YEAR 2014

หัวข้อโครงการพิเศษ การยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรด โดยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต
Corrosion Inhibition of Hastelloy C276 and 304 Stainless Steel in Acid by Sodium Dodecyl Sulfate

ชื่อนักศึกษา นางสาววัชราวลี สาระคำ รหัสนักศึกษา 54050264
นางสาวภัสส์ชนกกร จิ่งจรรย์านนท์ รหัสนักศึกษา 54050294
นางสาวอภิสรรา เกตุพงษ์ชัย รหัสนักศึกษา 54050331

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2557
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช กรรมการ	
ผศ.ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปล ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์ ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรด โดยโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟต		
ชื่อนักศึกษา	นางสาววัชราวลี	สารระคำ	รหัสนักศึกษา 54050264
	นางสาวภัสส์ชนกภร	จิงจریانนท์	รหัสนักศึกษา 54050294
	นางสาวอภิสร่า	เกตุพงษ์ชัย	รหัสนักศึกษา 54050331
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2557		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. สุธา	สุทธิเรืองวงศ์	

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนและความเข้มข้นที่เหมาะสมของโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟตในการยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ และในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นเดียวกันที่อุณหภูมิห้อง พฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะถูกตรวจสอบด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าโพเทนชิโอดีนามิกโพลาริเซชัน โดยใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดคาโธดลิเทียมเป็นขั้วอ้างอิงและแผ่นแพลทินัมเป็นขั้วตรงข้าม จากผลการทดลองพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าแตกต่างกันไม่มากนักสำหรับโลหะแต่ละชนิด อย่างไรก็ตามพบว่าโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟตช่วยเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกอย่างเห็นได้ชัด

คำสำคัญ : การยับยั้งการกัดกร่อน ซี 276 โซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟต เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Corrosion inhibition of Hastelloy C276 and 304 stainless steel in acid by sodium dodecyl sulfate
Students	Miss Watcharawalee Sarakham Student ID 54050264 Miss Phatchanokporn Jungjariyanon Student ID 54050294 Miss Aphisara Ketphongchai Student ID 54050331
Degree	Bachelor of Science (Industrial chemistry)
Department	Chemistry
Academic Year	2014
Advisor	Asst. Prof. Dr. Sutha Sutthiruangwong

Abstract

The aims of this research were to study corrosion behavior and investigate the influence of sodium dodecyl sulfate on corrosion inhibition of Hastelloy C276 and 304 stainless steel in 0.02 M nitric acid and 0.02 M hydrochloric acid at room temperature. The corrosion behavior of Hastelloy C276 and 304 stainless steel was investigated using potentiodynamic polarization technique. Saturated calomel electrode was used as a reference electrode and a platinum plate was a counter electrode. The results showed that the values of corrosion potentials and current densities were slightly different for each metal. However, it was found that sodium dodecyl sulfate addition clearly increased the pitting potential of 304 stainless steel in hydrochloric acid.

Keywords : Corrosion inhibition, C276, Sodium dodecyl sulfate, 304 stainless steel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากกลุ่มบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ซึ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

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

รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด และผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช ที่ช่วยเป็นคณะกรรมการในการสอบและตรวจทาน รวมทั้งให้คำแนะนำอื่นๆ เพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

น.ส.พิมพารณณ์ มั่นพิริยะกุล ที่ช่วยดูแล ให้ความรู้ในการใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท และให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำโครงการพิเศษ

อาจารย์ทุกท่านของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เพิ่มพูนความรู้ทั้งในทางทฤษฎีและปฏิบัติ ควบคู่กับการอบรมสั่งสอนความมีระเบียบวินัยและคุณธรรม

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำโครงการพิเศษ

ขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือในเรื่องเครื่องมืออุปกรณ์ยามขาดแคลน รวมทั้งคอยแนะนำและให้กำลังใจตลอดระยะเวลาในการทำโครงการพิเศษ

ขอกราบขอบพระคุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัวที่เป็นผู้อยู่เบื้องหลังความสำเร็จที่ได้สนับสนุนให้โอกาสได้ศึกษาเรียนรู้ทุกสิ่งทุกอย่างและคอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

นางสาววิชราวลี

สารระคำ

นางสาวภัสส์ชนกกร

จิงจریانนท์

นางสาวอภิสร่า

เกตุพงษ์ชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การกักกร่อน.....	3
2.1.1 กลไกการกักกร่อน.....	3
2.1.2 ไฟฟ้าเคมี.....	5
2.1.3 แผนภาพพั่วเบ.....	9
2.1.4 ประเภทของการกักกร่อน.....	11
2.2 เทคนิคโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชัน.....	17
2.3 การเติมสารยับยั้งการกักกร่อน.....	18
2.3.1 การคำนวณประสิทธิภาพของสารยับยั้ง.....	19
2.3.2 ประเภทของสารยับยั้ง.....	19
2.4 สารลดแรงตึงผิว.....	19
2.4.1 ชนิดของสารลดแรงตึงผิว.....	20
2.4.2 การนำไปใช้ประโยชน์.....	21
2.4.3 ประเภทของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่นิยม.....	22
2.4.4 โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต.....	23
2.4.5 ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์.....	25
2.5 การดูดซับ.....	27
2.5.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์.....	29
2.5.2 ไอโซเทอมแบบฟรอยด์ลิช.....	30
2.5.3 ไอโซเทอมแบบบรูนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์.....	30
2.6 กริดไนตริก	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 กรดไฮโดรคลอริก.....	34
2.8 โลหะผสมนิกเกิล.....	36
2.8.1 โลหะผสมนิกเกิลและโครเมียม.....	37
2.8.2 โลหะผสมนิกเกิลและโมลิบดีนัม.....	38
2.8.3 โลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276.....	38
2.9 เหล็กกล้าไร้สนิม.....	39
2.9.1 ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	40
2.9.2 การเลือกใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิม.....	41
2.9.3 ผลของธาตุผสม.....	44
2.9.4 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304.....	45
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	45
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	48
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.2 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	48
3.3.1 การเตรียมชิ้นงาน.....	48
3.3.2 การเตรียมสารละลาย.....	49
3.3.3 การวัดทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน.....	49
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	51
4.1 การยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลาย.....	52
กรดไนตริก 0.02 โมลาร์ โดยโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟต	
4.2 การยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ในสารละลาย.....	55
กรดไนตริก 0.02 โมลาร์ โดยโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟต	
4.3 การยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลาย.....	57
กรดไฮโดรคลอริก 0.02 โมลาร์ โดยโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟต	
4.4 การยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ในสารละลาย.....	60
กรดไฮโดรคลอริก 0.02 โมลาร์ โดยโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟต	
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	63
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	63
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบความสามารถของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิด ในการทำให้เกิดฟอง การซักล้าง และการทำให้พื้นผิวเกิดความอ่อนนุ่ม	21
2.2 การแสดงการใช้งานของสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ	22
2.3 แสดงตัวอย่างค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์และจำนวนโมเลกุลของ การรวมกลุ่มจากสารลดแรงตึงผิวต่างๆ	27
2.4 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ	29
2.5 แสดงคุณสมบัติด้านความต้านทานต่อการกัดกร่อน ความสามารถในการขึ้นรูป ความสามารถในการเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมโดยแบ่งเป็นระดับต่างๆ	42
4.1 ผลการทดลองใช้โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตในการยับยั้งการกัดกร่อนของ เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์	53
4.2 ผลการทดลองใช้โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตในการยับยั้งการกัดกร่อนของ โลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์	55
4.3 ผลการทดลองใช้โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตในการยับยั้งการกัดกร่อนของ เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์	58
4.4 ผลการทดลองใช้โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตในการยับยั้งการกัดกร่อนของ โลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี.....	3
2.2 ปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็ก.....	4
2.3 การเปลี่ยนจากพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	6
2.4 ความแตกต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างทองแดงและสังกะสี.....	7
2.5 ไฮโดรเจนอิเล็กโทรดมาตรฐาน.....	7
2.6 การต่อเซลล์กัลวานิกระหว่างครึ่งเซลล์ SHE และครึ่งเซลล์ Cu.....	8
2.7 การต่อเซลล์กัลวานิกระหว่างครึ่งเซลล์ SHE และครึ่งเซลล์ Zn.....	8
2.8 ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานที่ 25 องศาเซลเซียส (298 เคลวิน).....	9
2.9 แผนภาพพหุเบของน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	10
2.10 แผนภาพพหุเบของอลูมิเนียม.....	11
2.11 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ.....	11
2.12 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก.....	12
2.13 การกัดกร่อนแบบชอก.....	13
2.14 กลไกการกัดกร่อนแบบชอก.....	13
2.15 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม.....	14
2.16 การกัดกร่อนแบบขอบเกรน.....	14
2.17 การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ.....	15
2.18 การกัดกร่อนร่วมกับความล้า.....	15
2.19 การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น.....	16
2.20 ภาพจำลองแสดงรูปแบบของการกัดกร่อนประเภทต่างๆ.....	16
2.21 เส้นโค้งโพลาริเซชันที่ได้จากเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน.....	18
2.22 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว.....	20
2.23 โครงสร้างโมเลกุลของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต.....	24
2.24 รูปจำลองสองมิติแสดงชั้นต่างๆ ของไมเซลล์.....	26
2.25 ตำแหน่งที่เกิดการดูดซับบนพื้นผิวระหว่างพื้นผิวทองแดง (ตัวดูดซับหรือซับสเตรต)..... และโมเลกุลของเอทิลีนและอะเซทิลีน (ตัวถูกดูดซับ)	28
2.26 โครงสร้างโมเลกุลของกรดไนตริก.....	31
2.27 รูปแบบโครงสร้างโมเลกุลของกรดไฮโดรคลอริก.....	35
2.28 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของธาตุ निकเกิด และโครเมียม..... ที่ผสมอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มต่างๆ	40
3.1 ชุดอุปกรณ์ของเซลล์ทดสอบการกัดกร่อนสำหรับเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 กลไกการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304..... โดยโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต	51
4.2 กลไกการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276..... โดยโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต	51
4.3 กราฟโพเทนซีโอโดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304..... ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ในสถานะที่ไม่เต็มและเต็ม โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.75 3 และ 6 มิลลิโมลาร์	52
4.4 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 หลังทำการทดลองในสารละลาย..... กรดไนตริกความเข้มข้น 0.02 โมลาร์	54
4.5 แผนภาพพัวเบของน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส.....	54
4.6 กราฟโพเทนซีโอโดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276..... ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ในสถานะที่ไม่เต็มและเต็ม โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.75 3 และ 6 มิลลิโมลาร์	55
4.7 โลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 หลังทำการทดลองในสารละลาย..... กรดไนตริกความเข้มข้น 0.02 โมลาร์	56
4.8 กราฟโพเทนซีโอโดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304..... ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ในสถานะที่ไม่เต็ม และเต็มโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.75 3 และ 6 มิลลิโมลาร์	57
4.9 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 หลังทำการทดลองในสารละลาย..... กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.02 โมลาร์	59
4.10 กราฟโพเทนซีโอโดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276..... ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ในสถานะที่ไม่เต็ม และเต็มโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.75 3 และ 6 มิลลิโมลาร์	60
4.11 โลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 หลังทำการทดลองในสารละลาย..... กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การกัดกร่อนเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ที่มีการใช้งานของโลหะเนื่องจากทำให้โลหะเกิดการเสื่อมสภาพ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการใช้งานของโลหะลดลงและอาจทำให้เกิดอันตรายจนถึงแก่ชีวิตได้ โดยมีการสำรวจพบว่าในประเทศที่กำลังพัฒนาบางประเทศมีการสูญเสียงบประมาณอันมีสาเหตุเนื่องมาจากการกัดกร่อนประมาณร้อยละ 3-5 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมประชากรใน 1 ปี (Gross national product, GNP) และสำหรับบางประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น สหรัฐอเมริกา ได้มีการสำรวจมูลค่าการเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนในปี ค.ศ.2002 พบว่ามีการสูญเสียงบประมาณที่เกิดจากการกัดกร่อนประมาณร้อยละ 3.1 GNP คิดเป็นเงิน 276 พันล้านเหรียญสหรัฐ หรือคิดเป็นเงินไทยประมาณ 11 ล้านล้านบาท [1] ดังนั้นโลหะจึงมีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก และมีแนวโน้มในการนำโลหะต่างๆ มาใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง

โลหะผสมเหล็ก เช่น เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 เป็นโลหะชนิดหนึ่งที่มีประโยชน์ต่อการนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย เช่น ท่อในโรงงานอุตสาหกรรม ท่อส่งน้ำมันปิโตรเลียม และถึงปฏิกิริยาในกระบวนการทางเคมี นอกจากนี้ยังมีการนำโลหะผสมนิกเกิลมาใช้ในงานอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เนื่องจากโลหะผสมกลุ่มนี้มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ในปัจจุบันนิยมใช้โลหะผสมนิกเกิลที่มีโครเมียมและโมลิบดีนัมเป็นองค์ประกอบ เช่น โลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 (Hastelloy C276) ซึ่งนิยมนำมาใช้ในงานทางทะเล อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมการควบคุมมลพิษ เป็นต้น แต่ปัญหาการเกิดการกัดกร่อนยังคงเป็นปัญหาหลักที่สามารถพบในขณะที่มีการใช้งานโลหะเหล่านี้โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตที่มีความเป็นกรดสูง ดังนั้นโรงงานอุตสาหกรรมจึงควรมีการป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสมสำหรับงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภท และการป้องกันการกัดกร่อนก็มีด้วยกันหลายวิธี เช่น การเลือกวัสดุที่เหมาะสม การเคลือบผิวหรือทาสี การชุบด้วยไฟฟ้า การรมดำ ซึ่งหนึ่งในวิธีการป้องกันการกัดกร่อนที่นิยมใช้คือ การเติมสารยับยั้งการกัดกร่อน (Corrosion inhibition) ด้วยเหตุนี้จึงนำไปสู่การศึกษาการยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์และในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นเดียวกัน โดยทางคณะผู้จัดทำได้นำสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate, SDS) มาใช้ในการทดลอง โดยสันนิษฐานว่าสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตจะช่วยปกคลุมพื้นที่ผิวของตัวอย่างโลหะผสมส่งผลให้สารละลายเข้ามาทำปฏิกิริยากับพื้นที่ผิวน้อยลงทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมยากขึ้น

เอกสารที่ 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

1) ศึกษาการยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสภาวะกรดออกซิไดซ์และกรดรีดิวซ์ โดยใช้โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

2) ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสภาวะกรดออกซิไดซ์และกรดรีดิวซ์ โดยใช้โซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟต

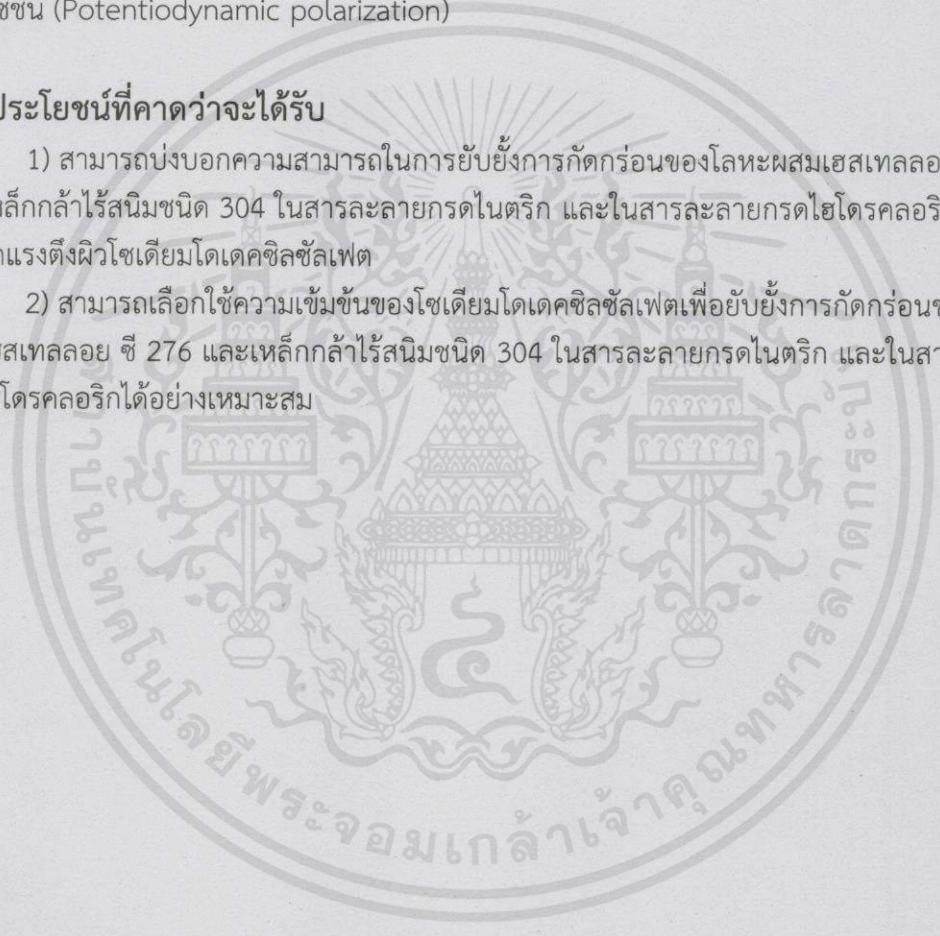
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาและทดลองใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟต ในการยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ และในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นเดียวกัน โดยเปรียบเทียบระหว่างสภาวะที่ไม่เติมและเติมโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.75 3 และ 6 มิลลิโมลาร์ตามลำดับ ทำการศึกษาอัตราการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกโพลาไรเซชัน (Potentiodynamic polarization)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) สามารถบ่งบอกความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไนตริก และในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก โดยใช้สารลดแรงตึงผิวโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟต

2) สามารถเลือกใช้ความเข้มข้นของโซเดียมโอดีเคซิลซัลเฟตเพื่อยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไนตริก และในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกได้อย่างเหมาะสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกัดกร่อน (Corrosion)

การกัดกร่อนคือ การที่โลหะทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาเคมีทั่วไปหรือเป็นปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีก็ได้ นำไปสู่การเสื่อมสภาพของวัสดุและส่งผลให้วัสดุสูญเสียความสามารถในการทำงาน ซึ่งการเสื่อมสภาพทางกายภาพของวัสดุไม่จัดเป็นการกัดกร่อนแต่จัดเป็นการเสื่อมสภาพจากการกัดเซาะ (Erosion) การขัดสี (Galling) หรือการสึกหรอ (Wear) ในบางกรณีวัสดุอาจเกิดการเสื่อมสภาพทั้งจากปฏิกิริยาเคมีและทางกายภาพ เช่น การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ (Corrosion erosion) การกัดกร่อนร่วมกับการสึกหรอ (Corrosive wear) หรือการกัดกร่อนจากการถูครูด (Fretting corrosion) เป็นต้น นั้นแสดงให้เห็นว่าการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นได้เมื่อโลหะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสิ่งแวดล้อมเท่านั้น [2]

2.1.1 กลไกการกัดกร่อน (Mechanism of corrosion) [3]

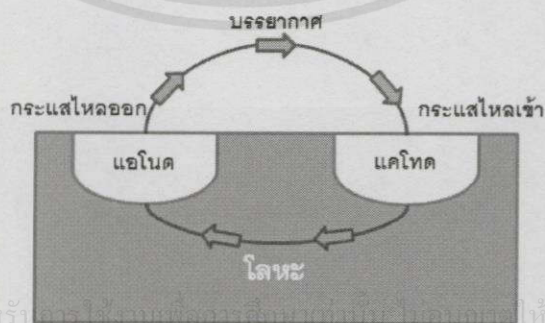
กลไกการกัดกร่อนสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ

2.1.1.1 เกิดการผุกร่อนด้วยปฏิกิริยาเคมีโดยตรง (Direct chemical corrosion)

คือ จะเกิดปฏิกิริยาเคมีโดยตรงระหว่างผิวโลหะและแก๊ส เช่น ออกซิเจน (O_2) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เป็นต้น และปฏิกิริยาดังกล่าวมักเกิดที่อุณหภูมิสูง สารประกอบที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเหล่านี้ถ้ามีลักษณะปกคลุมผิวโลหะอย่างเหนียวแน่นและไม่มีรูพรุนจะทำให้ปฏิกิริยาหยุดได้ และจะเป็นตัวป้องกันผิวโลหะไว้อีกชั้นหนึ่ง เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ที่ปกคลุมผิวอะลูมิเนียม เป็นต้น

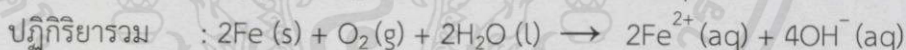
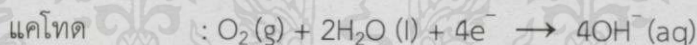
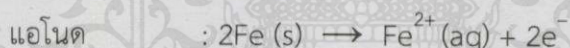
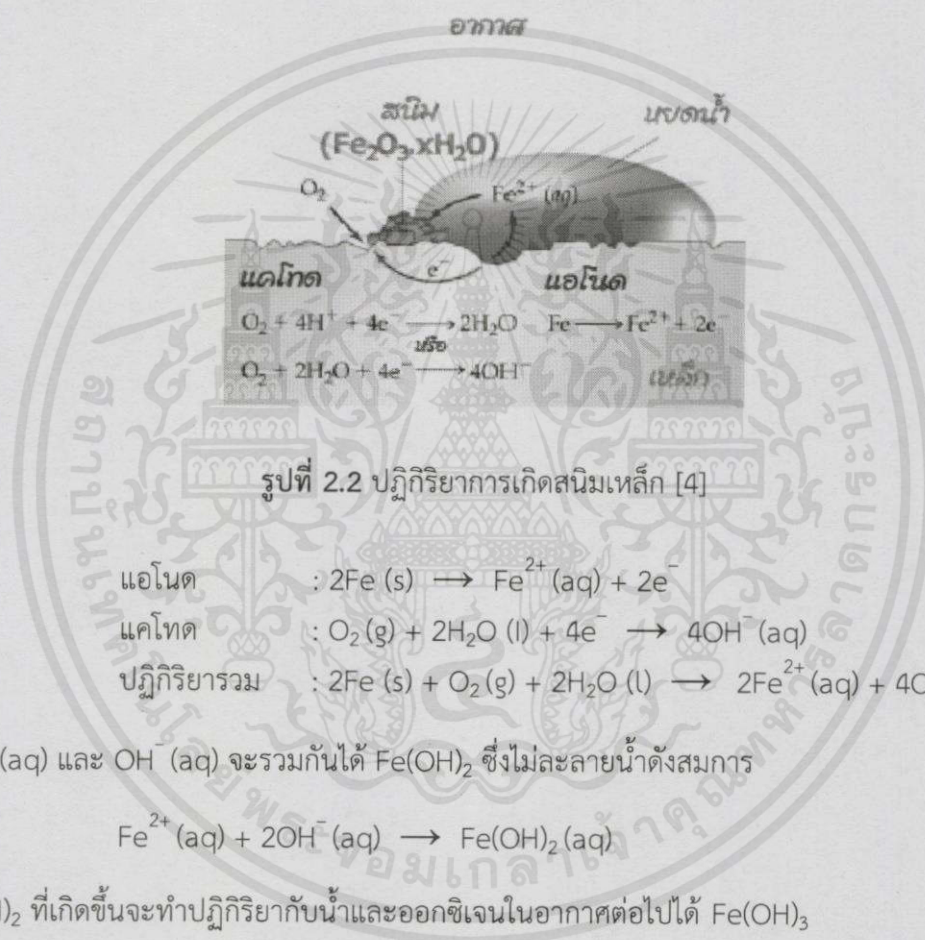
2.1.1.2 เกิดการผุกร่อนด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electrochemical corrosion)

โลหะจะผุกร่อนได้จะต้องมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งอาจจะเป็นบรรยากาศที่ชื้นหรือของเหลวใดๆ ที่โลหะสัมผัสอยู่ ปฏิกิริยาแบบนี้จะเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากโลหะที่ผุกร่อนซึ่งเรียกว่า แอโนด (Anode) ไปยังโลหะหรือธาตุซึ่งแอโนดสัมผัสอยู่ โลหะหรือธาตุตัวหลังนี้เรียกว่า แคโทด (Cathode) เป็นขั้วที่มีประจุบวก (Cation) ในทางตรงกันข้ามขั้วแอโนดมีประจุลบ (Anion) จะวิ่งไปหาเซลล์ไฟฟ้าจะครบวงจร เนื่องจากกระแสอิเล็กตรอนไหลสวนทางกับกระแสไฟฟ้าจึงได้แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.1

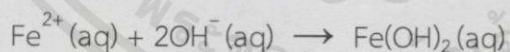


รูปที่ 2.1 ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

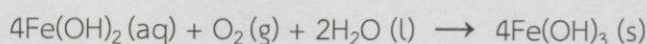
โลหะในธรรมชาติที่เกิดการผุกร่อนมีสาเหตุหลายประการสาเหตุหนึ่งคือ เกิดจากผิวของโลหะสัมผัสกับน้ำและแก๊สออกซิเจน การผุกร่อนของโลหะเกิดจากการที่อะตอมของโลหะถูกออกซิไดซ์เป็นไอออนและรวมตัวกับแก๊สออกซิเจนในอากาศได้ผลิตภัณฑ์เป็นออกไซด์ของโลหะนั้นๆ เช่น สนิมเหล็ก (Fe_2O_3) สนิมทองแดง (CuO) หรือสนิมอะลูมิเนียม (Al_2O_3) ปฏิกิริยาการเกิดสนิมมีกระบวนการซับซ้อนมากและมีลักษณะเฉพาะตัว เช่น การเกิดสนิมเหล็กเนื่องจากบริเวณผิวเหล็กที่สัมผัสน้ำจะมีการให้และรับอิเล็กตรอนโดยอะตอมของเหล็กจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) หรือถูกออกซิไดซ์เป็น Fe^{2+} ส่วนน้ำและแก๊สออกซิเจนในอากาศจะรับอิเล็กตรอนหรือถูกรีดิวซ์เป็น OH^- ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กในธรรมชาติเป็นดังนี้



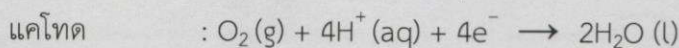
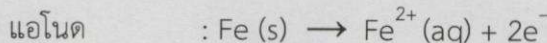
$2\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$ และ $\text{OH}^-(\text{aq})$ จะรวมกันได้ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ซึ่งไม่ละลายน้ำดังสมการ



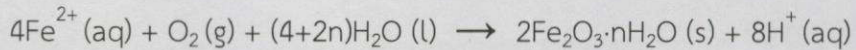
$\text{Fe}(\text{OH})_2$ ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนในอากาศต่อไปได้ $\text{Fe}(\text{OH})_3$



ไฮดรอกไซด์ (III) ไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปจะเขียนในรูปไฮดรอกไซด์ (III) ออกไซด์ที่มีน้ำผลึกอยู่ในโมเลกุลและน้ำผลึกอาจมีปริมาณแตกต่างกันจึงเขียนสูตรทั่วไปเป็น $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีส่วนทำให้เกิดสนิมในธรรมชาติได้ เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายน้ำได้กรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ซึ่งแตกตัวให้โปรตอน จากนั้นโปรตอนจะรับอิเล็กตรอนจากเหล็กและเกิดการเปลี่ยนแปลงดังสมการ



Fe^{2+} ที่เกิดขึ้นถูกออกซิไดซ์ต่อไปได้สนิมเหล็กดังสมการ



การผุกร่อนของเหล็ก หรือการเกิดสนิมอาจเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อเหล็กสัมผัสกับสารเคมีที่เป็นตัวออกซิไดซ์ เช่น กรดหรือสารละลายของสารประกอบไอออนิกบางชนิด เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หรือสัมผัสกับโลหะที่มีศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์สูงกว่าโลหะอื่นๆ ก็สามารถผุกร่อนได้ เช่น ทองแดง (Cu) หรือเงิน (Ag) แต่การผุกร่อนจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากเป็นธาตุที่ให้อิเล็กตรอนยาก สนิมเหล็กจะมีสีน้ำตาลแดงเมื่อเปื้อนเสื้อผ้าจะล้างออกยากแต่สามารถกำจัดรอยเปื้อนได้โดยใช้กรดออกซาลิก ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) ซึ่งมี pH ประมาณ 4-5 เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวได้โปรตอนและไดโครเมต ($\text{Cr}_2\text{O}_4^{2-}$) จะรวมกับ Fe^{3+} ในสนิมเหล็กเกิดเป็นไตรออกซาลेटไฮดรอกไซด์ (III) ไอออนที่ละลายน้ำได้

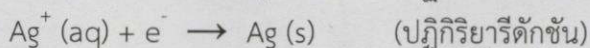
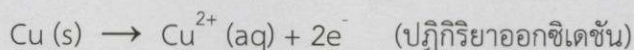
2.1.2 ไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry) [5]

ไฟฟ้าเคมีเป็นการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ซึ่งกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีหากใช้การถ่ายเทอิเล็กตรอนเป็นเกณฑ์แล้ว สามารถจำแนกปฏิกิริยาเคมีได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

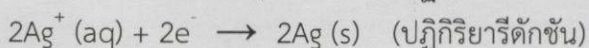
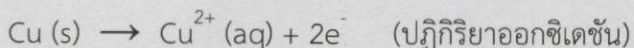
- 1) ปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) เช่น $2\text{CrO}_2^- + 3\text{ClO}^- + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{CrO}_4^{2-} + 3\text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O}$
- 2) ปฏิกิริยาที่ไม่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเรียกว่า ปฏิกิริยานอนรีดอกซ์ (Non redox reaction) เช่น $2\text{K}_2\text{CrO}_4 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + 2\text{KCl} + \text{H}_2\text{O}$

ปฏิกิริยารีดอกซ์คือ ปฏิกิริยาเคมีที่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างสารตั้งต้นทำให้เลขออกซิเดชันมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะทำให้มีอะตอมของธาตุบางตัวสูญเสียหรือได้รับอิเล็กตรอน โดยเรียกปฏิกิริยาที่เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และเรียกปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอนว่า ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ซึ่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าหรือปฏิกิริยารีดอกซ์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันมากมาย เช่น การชุบโลหะ การทำแบตเตอรี่ การแยกสารด้วยไฟฟ้า การทำสารให้บริสุทธิ์ เป็นต้น

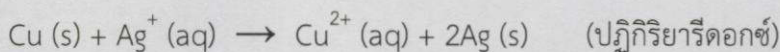
ตัวอย่างเช่น เมื่อนำโลหะทองแดง (Cu) จุ่มลงในสารละลายของ AgNO_3 พบว่าที่แผ่นโลหะทองแดงมีของแข็งสีขาวปนเทาเกาะอยู่ และเมื่อนำมาเคาะจะพบว่าโลหะทองแดงเกิดการสึกกร่อน ส่วนสีของสารละลาย AgNO_3 ก็จะเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีฟ้า ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ว่าการที่โลหะทองแดง (Cu) เกิดการสึกกร่อนเป็นเพราะโลหะทองแดงเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็น Cu^{2+} ซึ่งมีสีฟ้าและเมื่อ Ag^+ รับอิเล็กตรอนเข้ามาจะกลายเป็นโลหะเงิน (Ag) มาเกาะอยู่ที่แผ่นโลหะทองแดง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
อิเล็กทรอนิกส์ที่ถ่ายเทต้องเท่ากัน สมการเคมีที่เกิดขึ้นที่แท้จริงจึงต้องเป็น



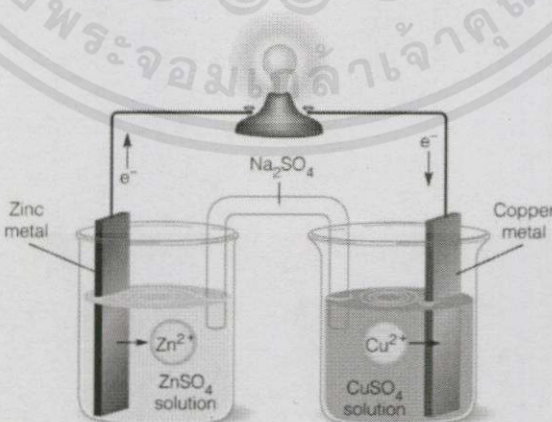
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแต่ละสมการเรียกว่า ครึ่งปฏิกิริยา ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาถ่ายเทอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ก็ต่อเมื่อต้องนำครึ่งปฏิกิริยาทั้งสองมารวมกันสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



สามารถสรุปได้ว่าการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์จะต้องประกอบไปด้วย สารที่ให้อิเล็กตรอนเรียกว่า ตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และสารที่รับอิเล็กตรอนเรียกว่า ตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) เกิดปฏิกิริยารีดักชัน

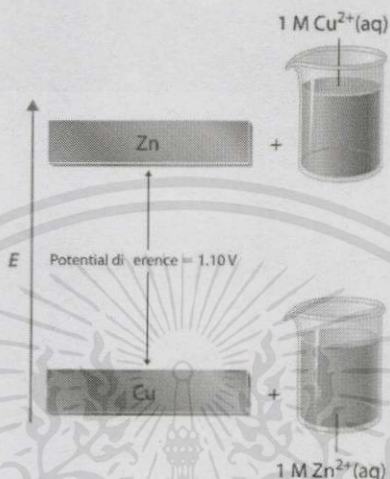
2.1.2.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical cell) ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเอง (Spontaneous) สามารถใช้เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าได้ เช่น ในเซลล์เคมีไฟฟ้าหรือแบตเตอรี่ (Battery) และเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ยกตัวอย่างในเซลล์เชื้อเพลิง เช่น แก๊สออกซิเจน (O_2) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) จะรวมตัวกันเกิดเป็นน้ำ (H_2O) ความร้อนและพลังงานไฟฟ้า (Electrical energy) ในทางกลับกันอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) ของน้ำเกิดเป็นแก๊สออกซิเจนและแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นเองไม่ได้ (Non-spontaneous electrochemical reactions) ต้องใช้แรงดันไฟฟ้า (Voltage) เข้าช่วย

เนื่องจากการที่สารที่ให้อิเล็กตรอนและสารที่รับอิเล็กตรอนสัมผัสกันโดยตรงจะไม่สามารถแสดงกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นหากต้องการให้มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นต้องมีการนำลวดตัวนำไฟฟ้าต่อเชื่อมเข้าไประหว่างขั้วไฟฟ้าของครึ่งเซลล์ที่ให้อิเล็กตรอนและครึ่งเซลล์ที่รับอิเล็กตรอน พร้อมกับโวลต์มิเตอร์และสะพานเกลือเชื่อมระหว่างครึ่งเซลล์ทั้งสอง โดยหลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมี คือ การเปลี่ยนจากพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยนำขั้วไฟฟ้า เช่น ทองแดงและแผ่นสังกะสีจุ่มในสารละลายฟริกเจอจาง ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะทำปฏิกิริยากับสารละลายแล้วเกิดการแตกตัว โดยสังกะสีจะแตกตัวให้อิเล็กตรอนมากกว่าทองแดง ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วสังกะสีไปสู่ขั้วทองแดง ขั้วสังกะสีจะเป็นขั้วไฟฟาลบและมีศักย์ไฟต่ำ ส่วนขั้วทองแดงจะเป็นขั้วไฟฟ้าบวกและมีศักย์ไฟฟ้าสูง ดังนั้นจึงทำให้มีกระแสอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วสังกะสีไปสู่ขั้วทองแดงและเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3



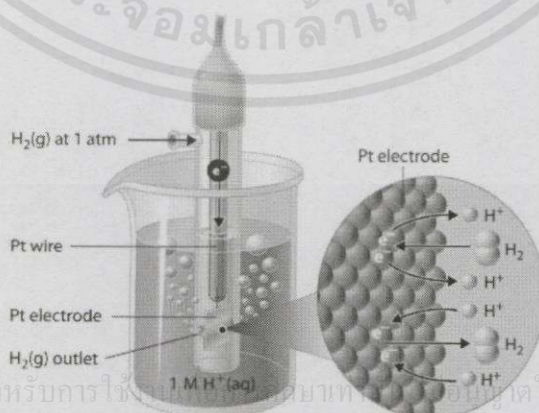
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนจากพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมี [6]

2.1.2.2 ศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน (Standard electrode potential) [5]
จากเซลล์ไฟฟ้า Zn-Cu เมื่อใช้ความเข้มข้นของไอออนของสารละลายในแต่ละครึ่งเซลล์เท่ากับ 1.0 โมลาร์ ที่ 25 องศาเซลเซียส เซลล์ไฟฟ้านี้จะมีค่าแรงขับเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive force, emf) เท่ากับ 1.10 V ถ้าทราบศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดใดอิเล็กโทรดหนึ่งแล้วนำไปลบออกจาก 1.10 V จึงจะทราบค่าของอิเล็กโทรดหนึ่ง



รูปที่ 2.4 ความแตกต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างทองแดงและสังกะสี [7]

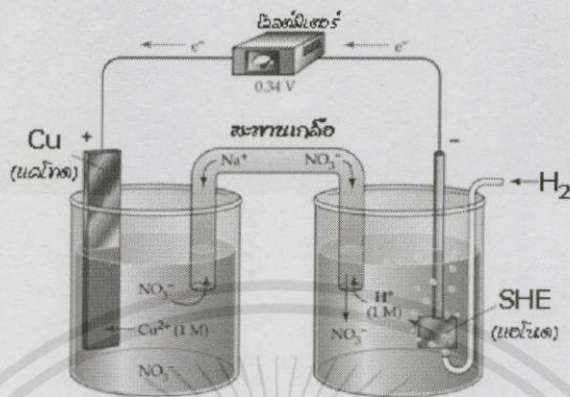
แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถวัดศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเดี่ยวๆ ได้ จึงได้มีการกำหนดอิเล็กโทรดมาตรฐานขึ้นมา ซึ่งได้แก่ ไฮโดรเจนอิเล็กโทรดมาตรฐาน (Standard hydrogen electrode, SHE) ในครึ่งเซลล์ไฮโดรเจนมาตรฐานนี้จะประกอบไปด้วยขั้วแพลทินัม (อิเล็กโทรดเฉื่อย) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก และแก๊สไฮโดรเจนภายใต้สภาวะมาตรฐาน (ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 1 ความดันบรรยากาศ ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเท่ากับ 1 โมลาร์ และวัดที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) โดยผ่านแก๊สไฮโดรเจนในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกตลอดเวลาจึงมีสมดุลเกิดขึ้นดังสมการ $2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2(\text{g})$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.5 ไฮโดรเจนอิเล็กโทรดมาตรฐาน [7]

ค่าศักย์มาตรฐานของครึ่งเซลล์ไฮโดรเจนมาตรฐานเท่ากับ 0.00 V ใช้สัญลักษณ์ E_o แทนศักย์ไฟฟ้าที่สภาวะมาตรฐาน ซึ่งสามารถใช้ครึ่งเซลล์ไฮโดรเจนมาตรฐานนี้ในการหาศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอื่น เช่น เมื่อต่อเซลล์กัลวานิกระหว่างครึ่งเซลล์ SHE และครึ่งเซลล์ Cu ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การต่อเซลล์กัลวานิกระหว่างครึ่งเซลล์ SHE และครึ่งเซลล์ Cu [5]

จากโวลต์มิเตอร์ได้ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์เท่ากับ 0.34 V โดยมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังสมการต่อไปนี้



จาก
 ดังนั้น

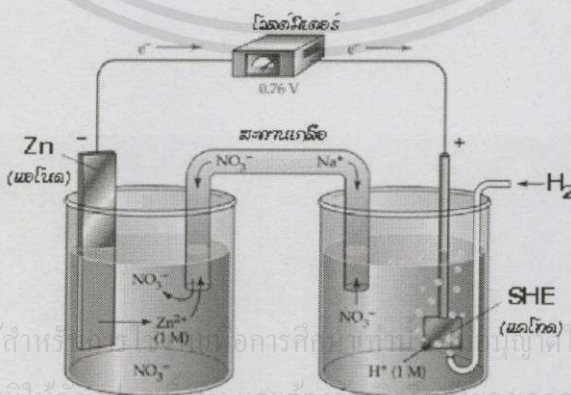
$$E_o \text{ cell} = E_o \text{ cathode} - E_o \text{ anode}$$

$$E_o \text{ cell} = E_o \text{ Cu} - E_o \text{ SHE}$$

$$0.34 \text{ V} = E_o \text{ Cu} - 0.00 \text{ V}$$

$$E_o \text{ Cu} = 0.34 \text{ V} - 0.00 \text{ V} = 0.34 \text{ V}$$

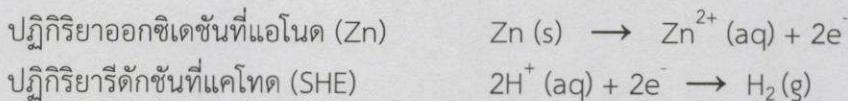
รูปที่ 2.7 เมื่อต่อเซลล์กัลวานิกระหว่างครึ่งเซลล์ SHE และครึ่งเซลล์ Zn สามารถแสดงได้ดัง



รูปที่ 2.7 การต่อเซลล์กัลวานิกระหว่างครึ่งเซลล์ SHE และครึ่งเซลล์ Zn [5]

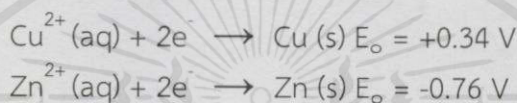
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ผู้ใช้ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากโวลต์มิเตอร์ได้ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์ได้เท่ากับ 0.76 V โดยมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังสมการต่อไปนี้



จาก $E_{o \text{ cell}} = E_{o \text{ cathode}} - E_{o \text{ anode}}$
 ดังนั้น $E_{o \text{ cell}} = E_{o \text{ SHE}} - E_{o \text{ Zn}}$
 $0.76 \text{ V} = 0.00 \text{ V} - E_{o \text{ Zn}}$
 $E_{o \text{ Zn}} = 0.00 \text{ V} - 0.76 \text{ V} = -0.76 \text{ V}$

ค่า E_o ที่ได้เป็นค่าศักย์รีดักชันของแต่ละครึ่งเซลล์นั้นคือ



	Reduction Half-Reaction	E° (V)			
Stronger oxidizing agent	$F_2(g) + 2e^- \rightarrow 2F^-(aq)$	2.87	Weaker reducing agent		
	$H_2O_2(aq) + 2H^+(aq) + 2e^- \rightarrow 2H_2O(l)$	1.78			
	$MnO_4^-(aq) + 8H^+(aq) + 5e^- \rightarrow Mn^{2+}(aq) + 4H_2O(l)$	1.51			
	$Cl_2(g) + 2e^- \rightarrow 2Cl^-(aq)$	1.36			
	$Cr_2O_7^{2-}(aq) + 14H^+(aq) + 6e^- \rightarrow 2Cr^{3+}(aq) + 7H_2O(l)$	1.33			
	$O_2(g) + 4H^+(aq) + 4e^- \rightarrow 2H_2O(l)$	1.23			
	$Br_2(l) + 2e^- \rightarrow 2Br^-(aq)$	1.09			
	$Ag^+(aq) + e^- \rightarrow Ag(s)$	0.80			
	$Fe^{3+}(aq) + e^- \rightarrow Fe^{2+}(aq)$	0.77			
	$O_2(g) + 2H^+(aq) + 2e^- \rightarrow H_2O_2(aq)$	0.70			
	$I_2(s) + 2e^- \rightarrow 2I^-(aq)$	0.54			
	$O_2(g) + 2H_2O(l) + 4e^- \rightarrow 4OH^-(aq)$	0.40			
	$Cu^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Cu(s)$	0.34			
	$Sn^{4+}(aq) + 2e^- \rightarrow Sn^{2+}(aq)$	0.15			
	$2H^+(aq) + 2e^- \rightarrow H_2(g)$	0			
	Weaker oxidizing agent	$Pb^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Pb(s)$		-0.13	Stronger reducing agent
		$Ni^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Ni(s)$		-0.26	
$Cd^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Cd(s)$		-0.40			
$Fe^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Fe(s)$		-0.45			
$Zn^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Zn(s)$		-0.76			
$2H_2O(l) + 2e^- \rightarrow H_2(g) + 2OH^-(aq)$		-0.83			
$Al^{3+}(aq) + 3e^- \rightarrow Al(s)$		-1.66			
$Mg^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Mg(s)$		-2.37			
$Na^+(aq) + e^- \rightarrow Na(s)$	-2.71				
$Li^+(aq) + e^- \rightarrow Li(s)$	-3.04				

รูปที่ 2.8 ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานที่ 25 องศาเซลเซียส (298 เคลวิน) [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2.1.3 แผนภาพพัวเบ (Pourbaix diagram) [8]

ไม่จำกัดสิทธิ์ในลิขสิทธิ์ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 แผนภาพพัวเบถูกคิดค้นโดยมาเซล พัวเบ นักเคมีชาวเบลเยียม ซึ่งแผนภาพพัวเบ
 เป็นแผนภาพระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับ pH หรือ E_H กับ pH หรือ pE กับ pH ในแผนภาพพัวเบได้

อธิบายวิภาคของระบบสารละลายเคมีไฟฟ้าที่มีความเสถียร (สมดุล) ซึ่งเป็นเส้นแบ่งความแตกต่างของแต่ละวิภาค เช่น ในแผนภาพภาพสามารถอ่านค่าได้หลายค่าตามจุดตัดของแกน x และแกน y ซึ่งให้ค่าในวิภาคที่แตกต่างกัน

จากแผนภาพพัวเบของไฮโดรเจนระหว่าง E_H กับ pH สัญลักษณ์ H แสดงถึงไฮโดรเจนโดยแกน x คือค่าศักย์ไฟฟ้า (E_H) ซึ่งได้มาจากค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ไฮโดรเจนมาตรฐานตามสมการของเนิร์สดังสมการต่อไปนี้

$$E_H = E^0 - \frac{0.0592}{n} \log \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \{V\}$$

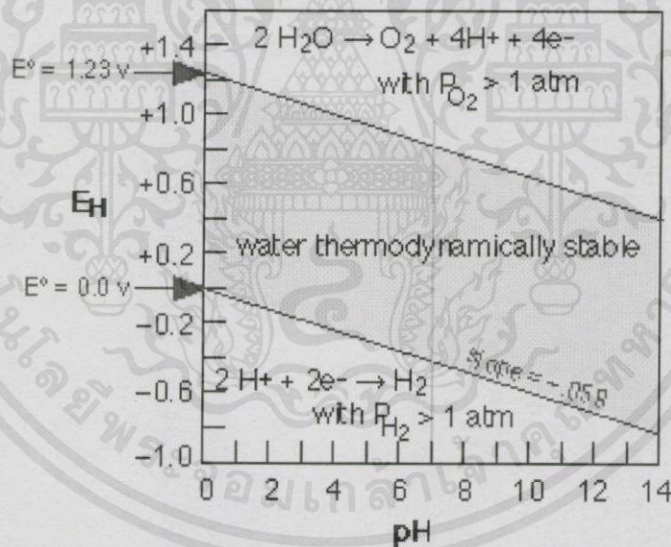
สมการที่ 2.1

แกน y คือค่า pH ได้จากสมการ

$$\text{pH} = -\log_{10}(a_{H^+}) = \log_{10} \left(\frac{1}{a_{H^+}} \right)$$

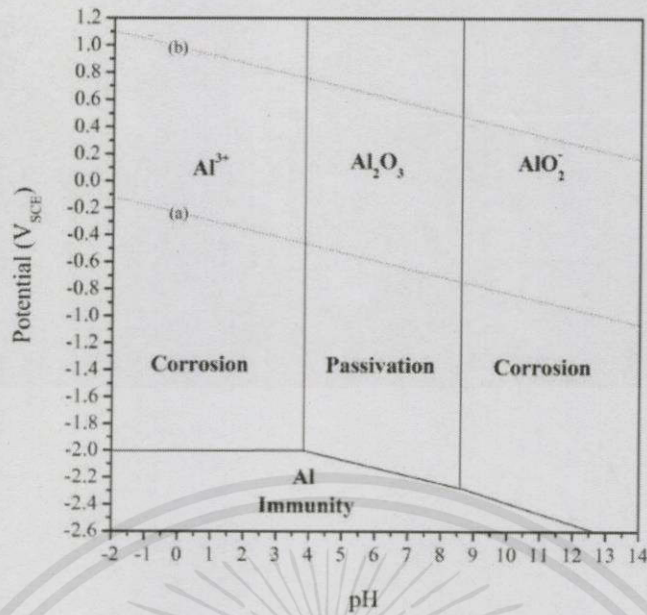
สมการที่ 2.2

ในแผนภาพพัวเบนั้นจะมีเส้นที่แบ่งสภาวะสมดุลต่างๆ ที่ได้จากความเข้มข้นตั้งแต่ 1 โมลาร์จนถึง 10^{-6} โมลาร์ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเข้มข้นมีผลทำให้เส้นสมดุลเลื่อนโดยมีความสอดคล้องกับสมการของเนิร์ส



รูปที่ 2.9 แผนภาพพัวเบของน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [9]

โดยทั่วไปแผนภาพพัวเบจะประกอบไปด้วย 3 บริเวณได้แก่ บริเวณที่โลหะไม่เกิดการกัดกร่อน (Immunity) บริเวณที่โลหะถูกกัดกร่อน (Corrosion) และบริเวณที่โลหะมีการสร้างชั้นป้องกัน (Passivity) โดยโลหะจะสร้างชั้นออกไซด์มาปกคลุมบนพื้นผิว สามารถยกตัวอย่างได้จากแผนภาพพัวเบของอลูมิเนียมที่มีการสร้างชั้นป้องกันการกัดกร่อนอย่างชัดเจนเมื่ออลูมิเนียมสัมผัสกับอากาศแสดงดังรูปที่ 2.10

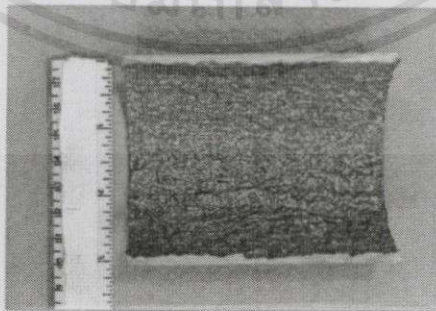


รูปที่ 2.10 แผนภาพพัวเบของอลูมิเนียม [10]

2.1.4 ประเภทของการกัดกร่อน (Classifications of corrosion) [11]

ผลกระทบของการกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะสามารถจำแนกได้หลายลักษณะดังนี้

2.1.4.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion) การกัดกร่อนชนิดนี้สามารถพบเห็นได้ทั่วไปโดยโลหะจะถูกกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นผิวของโลหะนั้นซึ่งโดยปกติจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิวหรือเป็นบริเวณกว้างส่งผลให้ความหนาของโลหะบางลงเรื่อยๆ หรือมีน้ำหนัหายไป การกัดกร่อนชนิดนี้หากพิจารณาทางเทคนิคไม่ค่อยเป็นปัญหาและไม่ก่อให้เกิดอันตรายรุนแรงมากนัก เนื่องจากสามารถหาอัตราการกัดกร่อนได้และออกแบบเผื่อพร้อมทั้งทำนายอายุการใช้งานของชิ้นส่วนที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ได้และเปลี่ยนใหม่เมื่อถึงเวลาอันควร การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอสามารถป้องกันหรือลดปริมาณการกัดกร่อนได้โดยเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม และอาจทำการเคลือบผิวด้วยการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibitors) หรือใช้การป้องกันแบบแคโทดิก (Cathodic protection) เป็นต้น

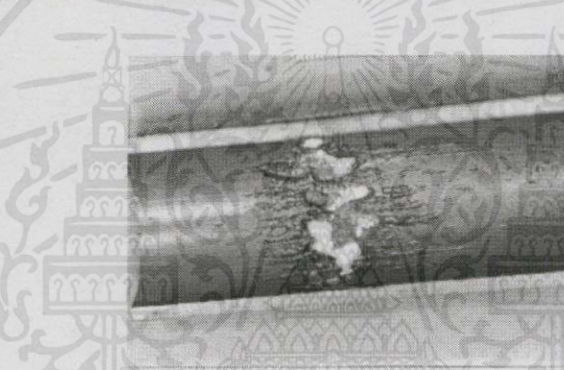


รูปที่ 2.11 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.2 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion) โลหะแต่ละชนิดจะมีค่าศักย์เฉพาะตัวดังนั้นถ้าหากมีโลหะ 2 ชนิดสัมผัสกันอยู่และมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และส่วนโลหะ

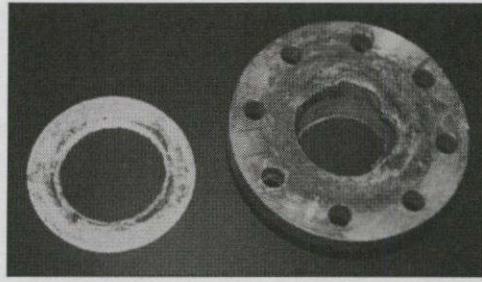
เชื่อมต่อนำไฟฟ้าหรือต่อกันอย่างครบวงจรไฟฟ้าเคมีเมื่อเวลาผ่านไปโลหะที่ศักย์ต่ำกว่าจะเกิดการกัดกร่อน ขณะที่โลหะที่มีศักย์สูงกว่าจะไม่เกิดการกัดกร่อน หากมีความต่างศักย์ของโลหะทั้งสองมาก ความรุนแรงของการกัดกร่อนก็จะมากขึ้นตามความต่างศักย์ จะทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุทั้งสองทำให้เพิ่มอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่มีค่าความต้านทานต่อการกัดกร่อนน้อย และจะลดอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่มีค่าความต้านทานมากกว่า โลหะที่มีค่าความต่างศักย์มากจะมีการกัดกร่อนค่อนข้างน้อยหรือแทบจะไม่เกิดเลย เนื่องจากกระบวนการเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าและความแตกต่างของโลหะจึงมีการเรียกการกัดกร่อนแบบนี้ว่าการกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion) ปริมาณกระแสและการกัดกร่อนขึ้นกับความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะทั้งสองวิธีการลดหรือป้องกันการกัดกร่อนแบบกัลวานิกมีหลายวิธี เช่น เลือกใช้วัสดุที่มีค่าศักย์ใกล้เคียงกัน หลีกเลี่ยงความต่างของอัตราส่วนของพื้นที่แคโทดและแอโนด ใช้ฉนวนกันบริเวณที่ใช้โลหะต่างชนิดกัน มาสัมผัสกัน ใช้สารเคลือบผิว เติมน้ำยาขี้ผึ้งเพื่อลดความรุนแรงของการกัดกร่อน ออกแบบพื้นที่ที่สามารถเปลี่ยนชิ้นงานที่เป็นแอโนดได้ง่าย หรือติดตั้งวัสดุที่สามที่มีค่าความต่างศักย์น้อยกว่าโลหะทั้งสองเพื่อให้เกิดการกัดกร่อนแทน เป็นต้น



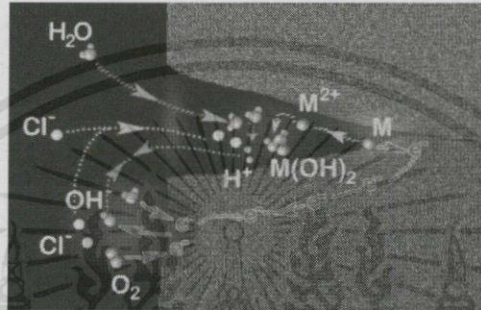
รูปที่ 2.12 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก [12]

2.1.4.3 การกัดกร่อนแบบซอก (Crevice Corrosion) คือการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่อับบนผิวโลหะที่สัมผัสโดยตรงกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ การกัดกร่อนประเภทนี้เกี่ยวข้องกับปริมาณของสารละลายที่ค้างอยู่ตามพื้นที่ที่เป็นหลุมหรือพื้นที่ที่เป็นซอกบริเวณแคบๆ ที่มีสารละลายเข้าไปขังอยู่ได้เป็นเวลานานโดยไม่มีการถ่ายเททำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำหรือสารละลายภายในซอกไม่เท่ากับภายนอกทำให้เกิดการกัดกร่อนโดยบริเวณในซอกจะเป็นขั้วแอโนด การสัมผัสระหว่างผิวโลหะและผิวที่ไม่ใช่โลหะสามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบซอกได้เช่นกัน เช่น ปะเก็น เนื่องจากสารละลายที่ขังอยู่มีปริมาณจำกัดและหยุดนิ่ง ออกซิเจนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาแคโทดจึงลดจำนวนลงเรื่อยๆ จนหมด แต่ปฏิกิริยาแอโนดยังคงดำเนินอยู่จึงทำให้ความเข้มข้นของประจุบวกสูง ดังนั้นเพื่อรักษาสมดุลของประจุไว้ถ้ามีสารเจือปนอยู่โดยเฉพาะคลอริน ประจุลบของคลอรินจะเคลื่อนที่เข้ามาในรอยแตกและทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ และกรดไฮโดรคลอริกจะกัดผิวของโลหะออกมาทีละน้อย ส่งผลให้รอยแตกและรอยร้าวขยายตัวไปเรื่อยๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



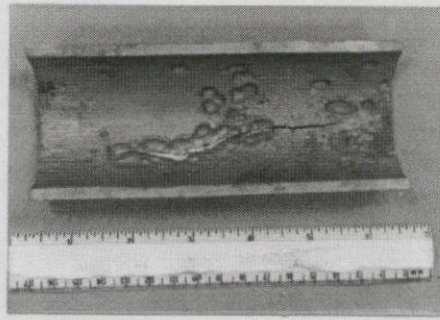
รูปที่ 2.13 การกัดกร่อนแบบชอก [13]



รูปที่ 2.14 กลไกการกัดกร่อนแบบชอก [13]

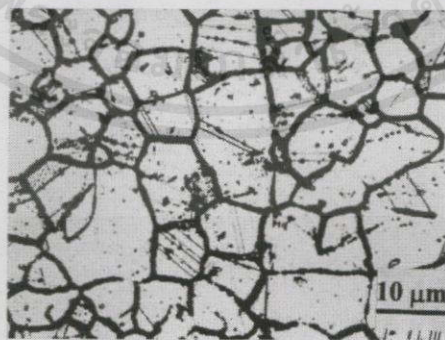
วิธีการป้องกันสามารถทำได้โดยปิดบริเวณที่เป็นที่อับโดยการเชื่อม หรือการบัดกรี ออกแบบถึงความดันให้สามารถระบายน้ำได้ดีและพยายามหลีกเลี่ยงรูปร่างที่เป็นมุม ตรวจสอบเครื่องมือและสารแปลกปลอมอยู่เสมอ กำจัดของแข็งที่ลอยอยู่ก่อนเข้ากระบวนการผลิต จัดสภาวะสิ่งแวดล้อมให้มีความสม่ำเสมอ ใช้ปะเก็นที่เป็นของแข็งและไม่มีการดูดซึม หรือใช้การเชื่อมแทนการม้วนเป็นท่อ เป็นต้น

2.1.4.4 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion) เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมากโดยเฉพาะกับโลหะที่ได้พัฒนาให้มีฟิล์มป้องกันการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้าได้แล้ว แต่เมื่อฟิล์มบางแตกแยกออกเฉพาะบางที่ก็จะเกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่ กัดกร่อนลึกลงไปเรื่อยๆ ทำให้สังเกตเห็นได้ยาก เนื่องจากผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนได้ปกคลุมเอาไว้การกัดกร่อนแบบนี้ทำนายได้ยาก โดยทั่วไปการกัดกร่อนแบบรูเข็มมักจะเกิดทิศทางเดียวกันกับแรงโน้มถ่วงของโลก การกัดกร่อนแบบรูเข็มมีลักษณะเป็นรูหรือหลุมในเนื้อโลหะ โดยรูเหล่านี้อาจมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ได้แต่โดยส่วนมากจะมีขนาดเล็ก บางครั้งจะเห็นรูกระจายอยู่ห่างกันหรืออาจอยู่ใกล้กันจนดูคล้ายผิวโลหะที่ขรุขระการกัดกร่อนแบบรูเข็มเป็นการกัดกร่อนที่ก่อให้เกิดความเสียหายและรุนแรงที่สุดที่ทำให้อุปกรณ์เครื่องมือหรือชิ้นส่วนต่างๆ เกิดความเสียหาย เนื่องจากการเจาะลึกที่ตรวจสอบพบยากเพราะมีขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังยากที่จะตรวจวัดเชิงปริมาณ และตรวจวัดการขยายตัวของสภาพการกัดกร่อนของการกัดกร่อนแบบรูเข็มได้เพราะความลึกและจำนวนของรูที่เปลี่ยนแปลง วัสดุที่มีมีแนวโน้มที่จะเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มไม่ควรนำมาใช้ในการสร้างโรงงานหรือเครื่องมือวัสดุแต่ละชนิดมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ต่างกัน เช่น การเติมโมลิบดีนัมลงไปเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ในปริมาณร้อยละ 2 จะทำให้ได้เหล็กกล้าไร้สนิม 316 โดยจะเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบรูเข็มทำให้เกิดผิวของชั้นป้องกันที่มีความเสถียรมากกว่าคือ มีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนมาก เป็นต้น



รูปที่ 2.15 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม [12]

2.1.4.5 การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) โดยปกติที่บริเวณขอบเกรนมักจะเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าเนื้อเกรนโดยขอบเกรนจะแสดงตัวเป็นขั้วแอโนดคือ จะสูญเสียเนื้อโลหะและภายในเกรนจะแสดงตัวเป็นขั้วแคโทด หากบริเวณขอบเกรนมีอนุภาคอื่นๆ มาตกตะกอนอยู่หรือมีธาตุหนึ่งมากหรือน้อยเกินไปขอบเกรนอาจจะถูกกัดกร่อนหรือทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น เมื่อการกัดกร่อนเกิดขึ้นได้ระยะเวลาหนึ่งบริเวณพื้นที่ที่แสดงตัวเป็นแอโนดจะเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไป การกัดกร่อนก็จะเกิดกระจายอยู่ทั่วไปเป็นแบบสม่ำเสมอโดยกัดเซาะทั้งก้อนทำให้บริเวณที่เป็นแอโนดและแคโทดเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา แต่ถ้าบริเวณขอบเกรนแสดงตัวเป็นแอโนดตลอดเวลาการกัดกร่อนก็จะเกิดเฉพาะบริเวณขอบเกรนตลอดเวลา เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกเกิดการกัดกร่อนตามขอบเกรนได้หากนำไปใช้งานอย่างไม่เหมาะสมโดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกจะทนการกัดกร่อนได้ดีแต่ถ้าได้รับอุณหภูมิในช่วง 500-800 องศาเซลเซียสเป็นเวลานานพอสมควรจะทำให้เกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน โครเมียมที่เดิมเคยอยู่ในเนื้อเหล็กและคอยป้องกันการกัดกร่อนให้เหล็กก็จะมารวมตัวกับคาร์บอนทำให้บริเวณใกล้ๆ หรือชิดกับขอบเกรนมีโครเมียมต่ำกว่าร้อยละ 12 ซึ่งถือว่าบริเวณนี้ไม่ใช่เหล็กกล้าไร้สนิมอีกต่อไป ดังนั้นบริเวณที่มีโครเมียมต่ำตามขอบเกรนจึงถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น การควบคุมหรือลดการกัดกร่อนตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกสามารถทำได้คือ การทำอบชุบที่อุณหภูมิสูง หรือการเติมธาตุบางตัวที่สามารถรวมตัวเป็นคาร์ไบด์ได้ดี (Stabilizer) หรือการลดปริมาณคาร์บอนให้ต่ำกว่าร้อยละ 0.03

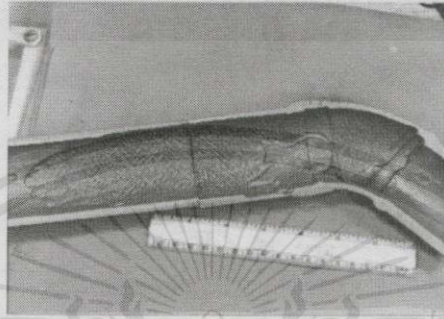


รูปที่ 2.16 การกัดกร่อนแบบขอบเกรน [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกอย่างหนึ่งเป็นลักษณะของน้ำดื่มที่ขุ่นขาวเอกสารเหล่านี้มีจุดประสงค์นำไปใช้
2.1.4.6 การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ (Erosion Corrosion) เมื่อมีการเสียดสีและการสึกกร่อนต่อโลหะในสิ่งแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ด้วยนั้นจะมีผลรวมของการกระทำต่อโลหะ

อันเนื่องมาจากปรากฏการณ์เชิงกลและเชิงเคมี ซึ่งส่งผลให้เกิดการทำลายและการเสื่อมสภาพของโลหะอย่างรวดเร็ว การกัดกร่อนประเภทนี้เริ่มจากการกัดกร่อนที่มีของไหลไหลผ่านโลหะและมักไหลด้วยความเร็วสูง ถ้าหากของไหลนี้มีฤทธิ์กัดกร่อนสูงเมื่อโลหะเริ่มสึกกร่อนจะทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าหากโลหะนั้นมีฟิล์มปกคลุมผิวการไหลของของไหลอาจทำให้ฟิล์มถูกทำลายไปบางส่วน ถ้าฟิล์มนี้สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้อย่างง่ายและรวดเร็วการกัดกร่อนก็จะไม่รุนแรงนัก แต่ถ้าฟิล์มใหม่เกิดขึ้นได้ช้าก็จะทำให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นรุนแรงและรวดเร็ว



รูปที่ 2.17 การกัดกร่อนแบบกัดเซาะ [12]

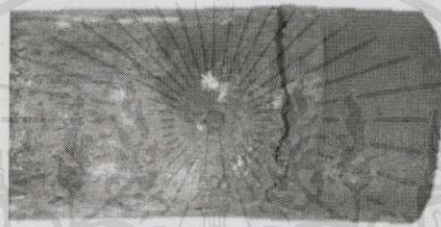
2.1.4.7 การกัดกร่อนร่วมกับความล้า (Fatigue Corrosion) โดยความล้า (Fatigue) เป็นอาการของโลหะที่ถูกแรงกระทำซ้ำๆ กันหรือซ้ำแล้วซ้ำเล่าโดยแรงที่กระทำเป็นได้ทั้งแรงดึงและแรงกด จนในที่สุดแล้วโลหะนั้นแตกหักเสียหาย (Fracture) โดยปกติแล้วการกัดกร่อนแบบนี้เกิดเมื่อขนาดแรงเค้นต่ำกว่าจุดคราก (Yield point) และเกิดเมื่อถูกกระทำซ้ำแล้วซ้ำเล่าในช่วงเวลาหนึ่งและในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนด้วย ดังนั้นจึงถูกกระทำทั้งทางกลและทางเคมีโดยมีผลไปลดความต้านทานของโลหะจนถึงจุดที่เกิดความเสียหาย



รูปที่ 2.18 การกัดกร่อนร่วมกับความล้า [12]

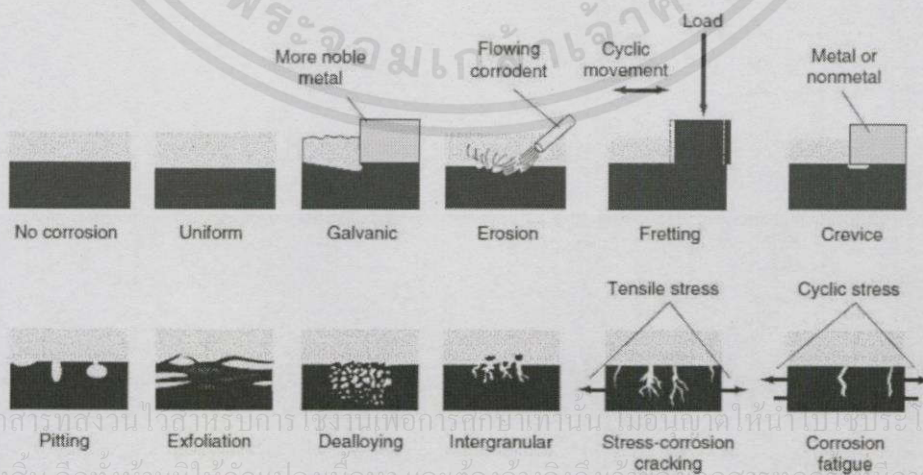
2.1.4.8 การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (Stress Corrosion) การกัดกร่อนชนิดนี้จะเกิดกับโลหะที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีสารกัดกร่อนและมีความเค้นแรงดึงกระทำกับโลหะ ความเค้นที่เกิดขึ้นอาจเป็นความเค้นตักค้างหรือความเค้นภายนอกที่มากระทำ การเสียหายแบบนี้ผิวโลหะอาจไม่ผ่านการกัดกร่อนหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลยแต่ในเนื้อโลหะจะมีรอยร้าวเล็กๆ อยู่มากมาย ตัวอย่างโลหะที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ เช่น ทองเหลืองจะไม่ทนต่อแอมโมเนีย ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมจะไม่ทนต่อไอออนของคลอไรด์ เป็นต้น ลักษณะของการกัดกร่อนที่มีความเค้นเข้ามาเกี่ยวข้องจะมีลักษณะรอย

ร้าวเป็นกิ่งก้านโดยที่รอยร้าวนี้อาจเกิดตามขอบเกรนหรือผ่าเกรนก็ได้ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อนคือ ความเค้นที่ต้องเป็นความเค้นดึงซึ่งอาจเป็นความเค้นตกค้างในเนื้อวัสดุ ความเค้นมาจากภายนอก ความเค้นเนื่องจากความร้อน หรืออาจจะเกิดจากการเชื่อมก็ได้ และสภาวะแวดล้อมการกัดกร่อนแบบนี้ทำให้โลหะเกิดความเสียหายเนื่องจากการแตกหักเสียหายที่เกิดขึ้นโดยการกระทำร่วมกันของสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่ออัตราการกัดกร่อนกับความเค้นแรงดึง (Tensile stress) ในบางกรณีความเค้นอาจเกิดจากการสะสมตัวของผลิตภัณฑ์อันเนื่องจากการกัดกร่อน เช่น นี้อตและสกรู เมื่อถูกวางไว้ในสิ่งแวดล้อมที่เอื้อต่อการกัดกร่อนผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนจะถูกสะสมตัวอยู่ระหว่างนี้อตและสกรู อย่างไรก็ตามปริมาณของผลิตภัณฑ์เหล่านี้มากกว่าปริมาณดั้งเดิมของโลหะจึงทำให้เกิดความเค้นแรงดึงขึ้นบนสกรูและเกิดการเสียหายด้วยกระบวนการแตกหักเสียหาย (Cracking) ซึ่งพบว่ามีทั้งแบบแตกไปตามขอบเกรน (Intergranular cracking) และแบบผ่ากลางเกรน (Transgranular cracking)



รูปที่ 2.19 การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น [15]

การกัดกร่อนแบบนี้จะมีลักษณะพิเศษคือจะเกิดขึ้นเฉพาะในโลหะผสมเท่านั้น ประเภทของสิ่งแวดล้อมที่จะให้เกิดการแตกหักนั้นมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับโลหะผสมแต่ละชนิดและการอบชุบด้วยความร้อนทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปมีผลกับการแตกหัก การป้องกันสามารถทำได้โดยลดความเค้นในเนื้อโลหะลงหรือลดความเค้นที่กระทำกับผิวโลหะ ลดความรุนแรงของสภาวะที่แวดล้อมเลือกโลหะที่ทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน ใช้การป้องกันแบบแคโทดิก หรือการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน



รูปที่ 2.20 ภาพจำลองแสดงรูปแบบของการกัดกร่อนประเภทต่างๆ [16]

2.2 เทคนิคโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization)

[17]

เทคนิคโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชันเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนของตัวอย่างโลหะภายใต้สภาพแวดล้อมที่กำหนด โดยเฉพาะโลหะที่มีคุณสมบัติในการสร้างชั้นฟิล์มป้องกันโดยจะใช้ชิ้นงานของตัวอย่างโลหะเป็นขั้วทำงานซึ่งจะอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีสถานะของความเข้มข้น อุณหภูมิ หรือปริมาณออกซิเจนในสารละลายตามกำหนดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐานจะทำการต่อให้ครบวงจร จากนั้นทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนผ่านไปยังขั้วตรงข้ามโดยทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าเริ่มที่ค่าต่ำจากค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนไปทางบวกเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆ ซึ่งกระแสจะลดลงเมื่อตัวอย่างโลหะสร้างชั้นฟิล์มป้องกัน และจะเพิ่มขึ้นทันทีในภายหลังเมื่อชั้นฟิล์มป้องกันถูกทำลายโดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ในการวิจัยครั้งนี้จะมุ่งเน้นที่การทดสอบด้วยหลักการทางไฟฟ้าเคมีซึ่งจะทดสอบด้วยเครื่องโพเทนซิโอสแตตโดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบคือ เส้นโค้งโพลาริเซชัน (Polarization curve) ค่าสำคัญที่ได้จากเส้นโค้งโพลาริเซชันคือ ค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current) จากนั้นนำ ค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนต่อไป หลักการทำงานของเครื่องโพเทนซิโอสแตตประยุกต์มาจากสมการของเนินส์ โดยวัดค่าแรงขับเคลื่อนไฟฟ้าหรือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยต่อเข้ากับแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าคือเครื่องโพเทนซิโอสแตตซึ่งขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่ใช้มี 3 ส่วนดังนี้

1) ขั้วอ้างอิง (Reference electrode) เมื่อวัดเทียบกับขั้วทำงาน (Working electrode) จะได้ศักย์ไฟฟ้าของโลหะนั้นซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดคาลอเมลอิ่มตัว (Saturated Calomel Electrode, SCE)

2) ขั้วตรงข้าม (Counter electrode) เมื่อวัดเทียบกับขั้วทำงาน (Working electrode) จะได้กระแสไฟฟ้าของโลหะนั้นซึ่งเป็นแผ่นแพลทินัมผิวเรียบขนาดกว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 5.0 เซนติเมตร และหนา 0.1 เซนติเมตร

3) ขั้วทำงาน (Working electrode) เป็นโลหะที่ต้องการทดสอบซึ่งก็คือโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ที่ทำความสะอาดผิวแล้ว

ค่าสำคัญที่วัดได้จากเครื่องโพเทนซิโอสแตตคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) ในหน่วยแอมป์ และศักย์ไฟฟ้าในช่วงที่สนใจทดสอบมีหน่วยเป็นโวลต์ เมื่อนำค่าทั้งสองมาพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์จะได้เส้นโค้งโพลาริเซชันดังรูปที่ 2.22 และจากรูปที่ 2.22 แสดงเส้นโค้งโพลาริเซชันซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วงที่สำคัญ คือ

1) ช่วงที่โลหะเกิดความว่องไวต่อการกัดกร่อน (Active region) ตัวแปรสำคัญที่วัดได้ในช่วงนี้คือ ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน

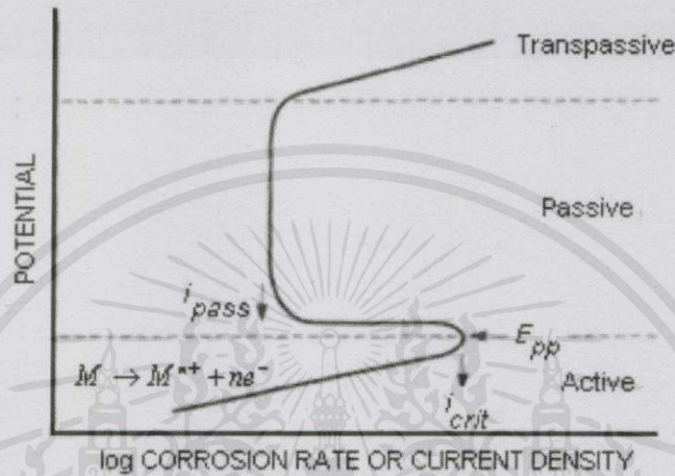
2) ช่วงที่โลหะไม่ว่องไวต่อการกัดกร่อน (Passive region) ตัวแปรสำคัญที่วัดได้ในช่วงนี้คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าของการเกิดชั้นป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ (3) ช่วงที่โลหะเกิดการละลายสูญเสียเนื้อโลหะอีกครั้ง เนื่องจากเกิดการแตกออกของชั้นป้องกัน (Transpassive region) จากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน สามารถนำมาคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนได้จากสมการ

$$R_{mpy} = 0.13I_{corr}e/p$$

สมการที่ 2.3

เมื่อ	R_{mpy}	คือ อัตราการเกิดการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)
	I_{corr}	คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (mA/cm^2)
	e	คือ น้ำหนักกรัมสมมูลของโลหะในที่นี้มีค่า 27.92
	p	คือ ความหนาแน่นของโลหะในที่นี้มีค่า 7.87



รูปที่ 2.21 เส้นโค้งโพลาริเซชันที่ได้จากเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาริเซชัน

2.3 การเติมสารยับยั้งการกัดกร่อน (Corrosion inhibition) [11]

การควบคุมและลดการกัดกร่อนบนพื้นผิวของโลหะทำได้โดยการเติมสารประกอบทางเคมีที่ช่วยในการยับยั้งการกัดกร่อนซึ่งจะเรียกวินี้ว่า การยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibitions) และเรียกสารที่เติมเพื่อยับยั้งการกัดกร่อนว่า สารยับยั้งการกัดกร่อน (Corrosion inhibitors) สารยับยั้งการกัดกร่อนจะไปช่วยลดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอโนดหรือปฏิกิริยารีดักชันที่แคโทดหรือทั้งสองสภาวะ สารยับยั้งการกัดกร่อนจะช่วยสร้างชั้นป้องกันบนพื้นผิวของโลหะซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่า สารยับยั้งการกัดกร่อนถูกดูดซึมเข้าสู่ผิวหน้าของโลหะโดยการดูดซึมทางกายภาพหรือการดูดซึมทางเคมี การดูดซึมทางกายภาพเป็นผลของแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างออร์แกนิกไอออนและขั้วไฟฟ้าบนพื้นผิวของโลหะ ส่วนการดูดซึมทางเคมีคือการแลกเปลี่ยนประจุของโมเลกุลของสารยับยั้งการกัดกร่อนกับผิวหน้าของโลหะเกิดเป็นพันธะประเภทโคออร์ดิเนต (Coordinate) การดูดซึมของสารยับยั้งการกัดกร่อนจะช่วยลดอัตราการกัดกร่อนบนผิวโลหะโดยการไปหน่วงปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดทำให้โลหะละลายได้น้อยลงหรือไปลดการเกิดไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทดหรือเกิดร่วมกันทั้ง 2 แบบ สารยับยั้งการกัดกร่อนสามารถใช้ในช่วงของค่าพีเอชใกล้กลางถึงด่างโดยแบ่งออกเป็นหลายลักษณะโดยใช้เกณฑ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1) แบ่งตามลักษณะพื้นฐานทางเคมี เช่น สารยับยั้งอินทรีย์ หรือสารยับยั้งอนินทรีย์
- 2) แบ่งตามลักษณะจำเพาะ เช่น สารประกอบออกซิไดซ์ หรือสารประกอบรีดิวซ์

3) แบ่งตามลักษณะการนำไปใช้ เช่น การล้างด้วยกรด การล้างด่าง การใช้อิมัลชัน หรือการใช้ในกระ-

ไม่ว่าการบวกรวมการหล่อเย็นเป็นต้น มิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 การคำนวณประสิทธิภาพของสารยับยั้ง (Calculation of corrosion inhibition efficiency)

เนื่องจากอาจมีสารยับยั้งการกัดกร่อนมากกว่า 1 ชนิดที่เหมาะสมกับการใช้งานจึงจำเป็นต้องทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของสารยับยั้งการกัดกร่อนแต่ละตัวซึ่งสามารถคำนวณได้จากประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อนดังสูตรต่อไปนี้

$$I_{eff} = \frac{|R_o - R_i|}{R_o} \times 100 \quad \text{สมการที่ 2.4}$$

เมื่อ I_{eff} คือ ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อน (%)
 R_o คือ อัตราการกัดกร่อนของโลหะที่ปราศจากสารยับยั้ง
 R_i คือ อัตราการกัดกร่อนของโลหะที่มีสารยับยั้ง

R_o และ R_i สามารถคำนวณได้จากเทคนิคการทดสอบการกัดกร่อนมาตรฐาน อัตราการกัดกร่อนสามารถคำนวณได้หลายหน่วย เช่น มวลที่หายไป (มิลลิเมตรต่อปี)

2.3.2 ประเภทของสารยับยั้งการกัดกร่อน (Classifications of inhibitor) [18]

1) สารยับยั้งประเภทพาสซีเวชัน (Passivation inhibitors) สารยับยั้งประเภทนี้จะเป็นตัวออกซิไดซ์ เช่น โครเมต ($Cr_2O_4^{2-}$) และไนไตรท์ (NO_2^-) หรือสารตั้งต้น เช่น โซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) โซเดียมโบรเมต ($NaBrO_3$) สารเหล่านี้จะชอบดูดซับบนพื้นผิวของโลหะที่มีออกซิเจนละลายอยู่ที่พื้นผิวโดยสารยับยั้งกลุ่มโครเมตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.04-0.1 เป็นสารยับยั้งที่มีราคาถูกที่ใช้ในระบบน้ำ ระบบการหล่อเย็นแบบหมุนเวียนภายในเตาเผาและหอหล่อเย็น

2) สารยับยั้งประเภทอินทรีย์ (Organic inhibitors) สารยับยั้งประเภทนี้จะสร้างชั้นป้องกันของโมเลกุลที่ดูดซับบนพื้นผิวของโลหะซึ่งช่วยป้องกันไม่ให้โลหะละลายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ยกตัวอย่างเช่น โซเดียมเบนโซเอต (Sodium benzoate) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.05 หรือ โซเดียมซินนามेट (Sodium cinnamate) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.2 ซึ่งจะใช้ได้ผลดีเมื่อละลายอยู่ในน้ำที่มีค่าพีเอช 7.5 และละลายในโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 17 ppm หรือเอทิลออกทานอล (Ethyl octanol) ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก

3) สารยับยั้งประเภทตกตะกอน (Precipitation inhibitors) สารยับยั้งเหล่านี้เป็นสารประกอบที่ทำให้เกิดการตกตะกอนบนพื้นผิวของโลหะเกิดเป็นชั้นป้องกัน น้ำกระด้างที่มีแคลเซียมและแมกนีเซียมสูงจะมีการกัดกร่อนน้อยกว่าน้ำที่ไม่มีแคลเซียมกระด้าง เนื่องจากแนวโน้มของเกลือในน้ำกระด้างจะตกตะกอนลงบนพื้นผิวของโลหะและเกิดเป็นชั้นป้องกันการกัดกร่อนถ้าค่าพีเอชของน้ำอยู่ในช่วง 5-6 และมีความเข้มข้นของโซเดียมไพโรฟอสเฟต (Sodium pyrophosphate) 10-100 ppm จะทำให้เกิดการตกตะกอนของแคลเซียมหรือแมกนีเซียมอโรฟอสเฟตเป็นชั้นป้องกันบนพื้นผิวของโลหะและสามารถเติมเกลือของสังกะสีลงไปเพื่อเพิ่มความสามารถของสารยับยั้งนี้ได้อีกด้วย

2.4 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารลดแรงตึงผิวมีบทบาทที่สำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ 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 (Types of surfactant)

สารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic group) ส่วนที่ไม่ชอบน้ำมักจะ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน คือมีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนใหญ่จะมาจากไขมันและน้ำมันตามธรรมชาติรวมทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและพอลิเมอร์สังเคราะห์ ลักษณะที่สำคัญของสารลดแรงตึงผิวคือเมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวเพียงเล็กน้อยลงในน้ำ สารลดแรงตึงผิวจะไปลดแรงตึงผิวของน้ำเพื่อให้เกิดกระบวนการต่างๆ ง่ายขึ้นยกตัวอย่างเช่น การเกิดฟอง การทำให้เปียก และกระบวนการทำความสะอาด เป็นต้น ส่วนที่ไม่ชอบน้ำนั้นจะไปเกาะกับพื้นผิวที่ว่าง เช่น อากาศ ส่วนที่ชอบน้ำจะยังคงอยู่ในน้ำ

ส่วนที่ชอบน้ำ
Hydrophilic group

ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ
Hydrophobic group



รูปที่ 2.22 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวสามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภทโดยแบ่งตามลักษณะหรือประจุของส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) ดังนี้

1) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (Cationic surfactant) สารในกลุ่มนี้เมื่อละลายน้ำแล้วส่วนหัวจะมีประจุบวก นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้เคลือบผ้าเพื่อให้ความลื่นและป้องกันไฟฟ้าสถิต สารจำพวกนี้มีความสามารถในการทำความสะอาดต่ำและไม่มีฟองแต่สามารถเกาะบนเส้นผมและพื้นผิวได้ดี สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกมักจะพบในผลิตภัณฑ์ยาสีฟัน แชมพู ครีมนวดผม และน้ำยาปรับผ้านุ่ม เป็นต้น ตัวอย่างเช่น Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) ซึ่งมีสูตรโมเลกุล คือ $C_{16}H_{33}N(CH_3)_3^+ Br^-$ และ Cetrimonium chloride เป็นต้น

2) สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Anionic surfactant) สารนี้เมื่อละลายน้ำแล้วจะแตกตัวและส่วนหัวจะมีประจุเป็นลบ สารจำพวกนี้ถูกนำมาใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ในการทำความสะอาดต่างๆ เช่น น้ำยาล้างจาน ผงซักฟอก ตลอดจนผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เช่น แชมพู ครีมนวดผม และอื่นๆ ทั้งนี้เพราะมีคุณสมบัติในการทำความสะอาดที่ดี มีฟองมากและละลายน้ำได้ดี เช่น โซเดียม

โดเดคซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate, SDS) สูตรโมเลกุลคือ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{SO}^-\text{Na}^+$ มักจะเป็นส่วนประกอบในผงซักฟอก และสบู่ เป็นต้น

3) สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) สารชนิดนี้เมื่อละลายน้ำแล้วจะไม่แตกตัวจึงไม่มีประจุ คุณสมบัติของสารกลุ่มนี้จะแตกต่างกันไปตั้งแต่ละลายน้ำได้จนไม่ละลายน้ำ โดยสารที่ไม่ละลายน้ำใช้เป็นตัวดับฟองส่วนสารที่ละลายน้ำมักนำไปใช้ในสารทำความสะอาด แต่เนื่องจากมีฟองน้อยจึงใช้คู่กับ Linear Alkyl Benzene Sulphonate (LAS) หรือสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบอื่นๆ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในสารนี้ ได้แก่ สารขจัดคราบฝังแน่น เช่น COGNIS Deutschland และ Polyoxyethylene alcohol ซึ่งมีสูตรโมเลกุล คือ $(\text{C}_n\text{H}_{2n+1}(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_m\text{OH})$

4) สารลดแรงตึงผิวชนิดสองประจุ (Zwitterionic surfactant) สารกลุ่มนี้มีทั้งประจุบวกและประจุลบอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน เมื่อละลายน้ำจะแสดงประจุใดขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เช่น ถ้าสภาพแวดล้อมเป็นกรดจะแสดงประจุบวก ถ้าสภาพแวดล้อมเป็นด่างจะแสดงประจุลบ สมบัติหลักของสารกลุ่มนี้คือ สามารถทนน้ำกระด้าง อ่อนละมุนต่อผิว มีสมบัติการเกิดการป้องกันไฟฟ้าสถิต และให้ความนุ่มได้ เช่น b-N-Alkylaminopropionic Acids มีสูตรโมเลกุล คือ $\text{RN}^+\text{H}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^-$ 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 (Applications)

สารลดแรงตึงผิวมีบทบาทที่สำคัญอย่างยิ่งในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ในร่างกายมนุษย์ก็มีสารลดแรงตึงผิวประกอบอยู่ เช่น Gall Acid ซึ่งจะย่อยสารประเภทไขมันได้ สารลดแรงตึงผิวมีประโยชน์หลายๆ ด้าน เช่น เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ต่างๆ และเป็นส่วนสำคัญในกระบวนการผลิตต่างๆ ได้แก่

1) เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด เช่น ผงซักฟอก สบู่ ยาสีฟัน ยาสระผม ครีมนวดผม และผลิตภัณฑ์ที่มีฟอง เป็นต้น

2) เป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอางและครีมกันแดด

3) ถูกนำมาใช้ในทางการแพทย์ ผลิตยา

4) ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการย้อมผ้า การเคลือบสีไม้หรือโลหะ

การผลิพลาสติก การทำหนังสือ การผลิตเนยเทียม เค้กและไอศกรีม เป็นต้น

5) ถูกนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น บำบัดน้ำเสีย กำจัดมลพิษทางดิน ดูดซับของเสีย เป็นต้น

6) นำมาใช้ในกระบวนการสกัดแยก เช่น การสกัดแยกแร่การแยกน้ำมันออกจากน้ำ เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีการนำสารลดแรงตึงผิวมาใช้ในเทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่น นาโนเทคโนโลยี เทคโนโลยีชีวภาพงานพิมพ์อิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องบันทึกแถบแม่เหล็ก เป็นต้น นอกจากสารลดแรงตึงผิวจะมีบทบาทในชีวิตประจำวันแล้ว สารลดแรงตึงผิวยังมีบทบาทที่สำคัญและนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มากมายรวมทั้งทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย อย่างไรก็ตามการนำสารลดแรงตึงผิวไปใช้ประโยชน์นั้นจะต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ ทั้งนี้เพราะสารลดแรงตึงผิวก็สามารถทำลายสิ่งแวดล้อมได้เช่นกันถ้ามีการใช้ในปริมาณที่ไม่ถูกต้องและมีการนำสารลดแรงตึงผิวผิดประเภทมาใช้ยกตัวอย่างเช่น การปล่อยน้ำซักผ้าหรือน้ำยาล้างจานที่เข้มข้นซึ่งมีสารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบลงในแม่น้ำลำคลองจะทำให้เกิดฟองอย่างมาก นอกจากจะทำลายสุนทรียภาพของแม่น้ำลำคลองแล้วยังสร้างผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและอาจต้องใช้เวลาอันยาวนานที่กระบวนการธรรมชาติโดยแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารลดแรงตึงผิวได้หมด

2.4.3 ประเภทของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่นิยม (Types of popularity anionic surfactant) [20-21]

ในปัจจุบันสารลดแรงตึงผิวที่ใช้อย่างกว้างขวางนั้นเป็นชนิดสารลดแรงตึงผิวประจุลบซึ่งมีมากถึงร้อยละ 70-75 ของสารลดแรงตึงผิวทั้งหมดในโลกโดยมีกลุ่มย่อยคือ อัลคาลีน คาร์บอกซิลิก สบู่อัลเฟต ซัลโฟเนต และฟอสเฟตที่สามารถใช้ให้เกิดประโยชน์ได้หลายชนิดสามารถแก้ไขปรับปรุงโดยการเติมประเภทของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่เหมาะสมได้

ตารางที่ 2.2 การแสดงการใช้งานของสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ [21]

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

สารลดแรงตึงผิวประจุลบนี้อธิปไตยอย่างมากในด้านเศรษฐศาสตร์จากตารางที่ 2.2 พบว่ามีการใช้สารลดแรงตึงผิวถึงร้อยละ 65 ในอุตสาหกรรมต่างๆ

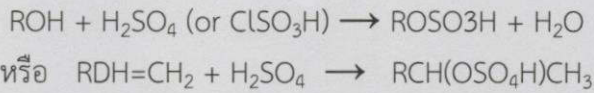
สบู่นั้นพัฒนามาจากไขมันสัตว์ไขมันพืชและน้ำมัน จัดได้ว่าเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มนุษย์ได้ค้นพบมากกว่าหนึ่งพันปีทำให้เกิดประโยชน์ทางเศรษฐกิจอย่างมหาศาล กรดไขมันนั้นจะพบได้มากจากธรรมชาติ ส่วนการผลิตสบู่อจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ เช่น กรดไขมันจากสัตว์ประกอบด้วยกรดโอเลอิกร้อยละ 40-45 กรดปาล์มมิกร้อยละ 25-30 กรดสเตียริกร้อยละ 15-20 นอกจากนั้นยังมีกรดมันที่ได้จากพืชคือ กรดไขมันมะพร้าวประกอบด้วย C₁₂ ร้อยละ 45-50 C₁₄ ร้อย

เอกสาร 16-20 Oleic ร้อยละ 5-6 C₂₁₂ ร้อยละ 10-15 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ทำกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและต้องใช้อย่างระมัดระวังในการใช้ การพัฒนาการสังเคราะห์สารลดแรงตึงผิวนั้นเริ่มขึ้นเมื่อต้องการปรับปรุงหน้าที่ของสบู่อชนิดเดิมเพื่อนำไปใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรมสมัยใหม่ พบว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวมีบทบาทที่สำคัญมากในกระบวนการผลิตสมัยใหม่โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการสังเคราะห์เคมีอินทรีย์ เช่น

การตอบสนองที่ว่องไวของสบู่ต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดเบส จากการสังเคราะห์ต่างๆ ที่ได้กล่าวมา กลุ่มของสารลดแรงตึงผิวที่มีบทบาทอย่างมาก ได้แก่ กรดซัลโฟเนต และกรดซัลฟิวริก

2.4.3.1 ซัลเฟต เอสเทอร์ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) ของแอลกอฮอล์กับกรดซัลฟิวริก ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์หรือกรดคลอโรซัลโฟนิก หรือการเพิ่มเข้าของกรดซัลฟิวริกในพันธะคู่



จะเห็นได้ว่าสารลดแรงตึงผิวซัลเฟต เอสเทอร์ ประกอบไปด้วยกลุ่มของกรดซัลโฟ-นิก ซึ่งมักจะมีการพบอัลคาไลน์หรือเกลือแอมโมเนียมซึ่งสูตรโครงสร้างโดยทั่วไปนั้นจะเป็น ROSO_3H เช่น โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอีกมากมายที่มีประโยชน์ในการใช้งานเช่นเดียวกันปฏิกิริยาที่แสดงนั้นเป็นปฏิกิริยาอย่างง่าย ซึ่งมักเกิดขึ้นในกระบวนการการผสมกันระหว่างไอโซเมอร์หรือหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นจำพวกสารประกอบเป็นส่วนมากโดยสารที่ได้จะเริ่มต้นจากซัลเฟตที่มีฟังก์ชันของแอลกอฮอล์ที่อ้อมตัวและไม่อ้อมตัว

2.4.3.2 กรดเกลือซัลโฟนิก ถึงแม้ว่ากรดเกลือซัลโฟนิกจะมีลักษณะคล้ายกับซัลเฟตเอสเทอร์ แต่กรดเกลือซัลโฟนิกจะมีความแตกต่างที่สำคัญในด้านเสถียรภาพทางเคมีมากกว่า เนื่องจากซัลเฟตนั้นมีฟังก์ชันของหมู่ที่ไม่ชอบน้ำมีประโยชน์หลากหลายในด้านการควบคุมสมบัติและการประยุกต์ในการใช้งาน กรดซัลโฟนิกบางกลุ่มในยุคแรกๆ ที่สามารถอธิบายกระบวนการผลิตได้คือซัลเฟตออยล์ (Sulfated oil) ในศตวรรษที่ 19 ซึ่งนับได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นนำสารลดแรงตึงผิวให้เกิดประโยชน์ทางการค้า อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ได้เริ่มขาดแคลนไปในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 1

Sodium alkyl naphthalene sulfonates ชนิดสายโซ่สั้นบางชนิดได้มีการพัฒนาและมีการนำมาเปรียบเทียบกับสมบัติของสารซักฟอก พบว่ามีข้อดีในด้านการป้องกันการเกิดฟองและยังคงใช้กันมาจนถึงปัจจุบัน ซัลเฟตมักใช้เป็นสารกระจายตัวในการใช้งานทางการเกษตร และการประยุกต์ใช้ในการถ่ายภาพ หลังจากสงครามโลกจบลงทำให้เกิดการขยายตัวของอุตสาหกรรมทางด้านเคมีในประเทศอังกฤษ เยอรมัน และสหรัฐอเมริกา ถือได้ว่าเป็นผู้นำทางด้านสารลดแรงตึงผิวซัลเฟตซึ่งนับได้ว่าเป็นความหมายที่สำคัญในด้านเศรษฐกิจทางการค้าด้วย และยังพบอีกว่าซัลเฟตสามารถได้จากการกลั่นแยกส่วนประกอบของกระบวนการปิโตรเลียม Olefin sulfonates N-acyl-N-alkyltaurines Sulfosuccinate ester และจากสารประกอบอื่นๆ

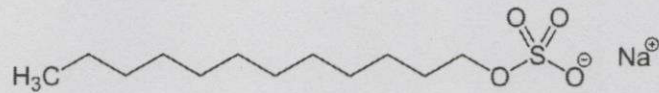
2.4.3.3 สบู่และผงซักฟอกจากคาร์บอกซิเลต ในอดีตนั้นได้มีเอกสารบันทึกไว้นานเกี่ยวกับสบู่และผงซักฟอกจากคาร์บอกซิเลตที่เกี่ยวกับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ พบว่ากรดเกลือคาร์บอกซิเลตได้มีสมบัติที่เด่นกว่าประเภทของสบู่จำพวกอื่นๆ ทั้งในด้านความเสถียรและค่าความเป็นกรดเบสต่างๆ ในน้ำ พบว่าสารส่วนมากจะประกอบไปด้วยการเพิ่มเข้าของหมู่ที่มีขั้ว เช่น เอสเทอร์ เอไมด์ สารประกอบกรดไขมันซึ่งมีข้อดีด้านสภาพการละลายและความมีเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2.4.4 โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate) [22]

โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (SDS) หรือโซเดียมลอริลซัลเฟต (SLS) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตร $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$ มีน้ำหนักโมเลกุล 288.5 เป็นของแข็งสีขาว หรือสีครีม ไม่มีกลิ่น

ความหนาแน่น 1.01 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 206 องศาเซลเซียส เป็น สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ โดยมากนิยมนำมาใช้ในการทำความสะอาดและผลิตภัณฑ์สุขภาพ เป็นเกลือ Organosulfate ที่ประกอบด้วยคาร์บอน 12 ตัวที่ติดกับหมู่ซัลเฟตทำให้วัสดุมีคุณสมบัติเป็น Amphiphilic ที่มีความจำเป็นต่อการผลิตผงซักฟอกที่ได้มาจากมะพร้าวและน้ำมันปาล์มที่มีราคาไม่แพง และยังเป็นองค์ประกอบที่พบบ่อยในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดในประเทศจำนวนมาก



รูปที่ 2.23 โครงสร้างโมเลกุลของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต

โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตมีค่าความเข้มข้นที่จุดวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (CMC) ในน้ำบริสุทธิ์ที่ 25 องศาเซลเซียสคือ 8.2 มิลลิโมลาร์ และจำนวนการรวมตัวความเข้มข้นนี้จะประมาณ 62 ส่วน ไอออนไนซ์ของไมเซลล์อยู่ที่ประมาณ 0.3 (หรือร้อยละ 30)

โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตถูกสังเคราะห์ โดยใช้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ น้ำมัน หรือกรดคลอโรซัลฟิวริก ในการผลิตไฮโดรเจนลอริลซัลเฟต วิธีการผลิตในอุตสาหกรรมมักจะใช้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกทำให้เป็นกลางโดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซเดียมคาร์บอเนต โดยในทางกลับกันลอริลแอลกอฮอล์มักจะได้จากมะพร้าวหรือน้ำมันในเมล็ดปาล์มโดยการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ซึ่งจะได้จำพวกกรดไขมันออกมาและตามด้วยทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ต่อไป เนื่องจากวิธีการสังเคราะห์นี้โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตเป็นสารตัวอย่างในเชิงพาณิชย์ สามารถใช้ได้ในรูปแบบผงและแบบเม็ดซึ่งโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตรูปแบบเม็ดจะละลายในน้ำเร็วกว่ารูปแบบผงและโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตมักจะมีส่วนผสมของอัลคิลซัลเฟตตัวอื่นๆ ด้วยแต่มีโดเดคซิลซัลเฟตเป็นส่วนประกอบหลัก

โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในผงซักฟอกสำหรับซักผ้า และการใช้งานเกี่ยวกับการทำความสะอาดจำนวนมาก โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตคือสารลดแรงตึงผิวที่มีประสิทธิภาพสูงและใช้ในงานที่ต้องการกำจัดคราบต่างๆ คราบน้ำมันและสารตกค้าง เช่น ผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรม จะพบในระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้นรวมทั้งเครื่องทำความสะอาดเครื่องจักรและสบู่อ่างรถ อีกทั้งถูกพบในยาสีฟัน แชมพู ครีมโกนหนวด และสูตรผสมของฟองสบู่ในส่วนของความหนาและความสามารถในการสร้างฟอง

การใช้งานในห้องปฏิบัติการสามารถใช้เพื่อช่วยในการ Lysing เซลล์ในระหว่างการสกัดดีเอ็นเอและโปรตีนใน SDS-PAGE โดยโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตหรือ Duponol เป็นที่นิยมใช้ในการเตรียมโปรตีนสำหรับทำอิมมูโนโพรบในเทคนิค SDS-PAGE ซึ่งสารประกอบนี้ทำงานโดยการทำลายพันธะที่ไม่ใช่โควาเลนต์ในโปรตีนทำให้ลักษณะทางธรรมชาติเปลี่ยนแปลงไปและก่อให้เกิดการสูญเสียรูปร่างโมเลกุลที่เป็นพื้นฐานของพวกมันหรือโครงสร้างพื้นฐานของโมเลกุล โดยประจุลบนี้มีความสำคัญมากกว่าประจุตั้งเดิมของโปรตีนซึ่งโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตจะสร้างพันธะที่มีแรงผลักของไฟฟ้าสถิต ทำให้เกิดโปรตีนที่เป็นรูปร่างเหมือนแท่งจึงช่วยลดความแตกต่างในรูปทรงที่เป็นปัจจัยหลักสำหรับการแยกในเจล

โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตน่าจะเป็นงานวิจัยมากที่สุดของสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ ส่วนใหญ่สารลดแรงตึงผิวจะเป็นพวกผงซักฟอก โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตจะกำจัดคราบน้ำมันออกจาก

ผิวและสามารถก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังและตาได้ โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตยังเป็นที่ยอมรับใช้สำหรับการกระจายหรือความไม่คงที่ของท่อนาโน เช่น ท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) แต่อย่างไรก็ตามโซเดียมโดเดคซิลเบนซีนซัลโฟเนต (NaDDBS) และ Triton X -100 ได้มีการรายงานให้เป็นสารช่วยกระจายตัวที่ดีกว่าของผนังเดี่ยวในท่อนาโนคาร์บอน

โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตนอกจากนี้ยังใช้ในการวิเคราะห์เม็ดเลือดแดงกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตทำหน้าที่ใน globin หน่วยย่อยที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลุ่มที่ชอบน้ำของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตจะยึดติดกับหน่วยย่อยๆ ของเหล็กออกไซด์ ปฏิกริยาการผลิตที่มีเสถียรภาพนั้นจะสามารถวิเคราะห์ได้เพื่อให้ได้ค่าฮีโมโกลบินซึ่งจะใช้เป็นส่วนหนึ่งของการตรวจนับเม็ดเลือดอย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตจะใช้ในการล้างเนื้อเยื่อสมองโดยการนำเอาไขมันมากระเจิงแสงซึ่งเนื้อเยื่อชีวภาพที่ได้รับการรักษาโดยโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตจะกลายเป็นเนื้อเยื่อลักษณะกึ่งโปร่งใสโดยใช้กล้องจุลทรรศน์จะทำให้มองเห็นทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อเยื่อได้

2.4.5 ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (Critical micelle concentration, CMC) [22-23]

สารลดแรงตึงผิวเป็นสารที่มีประโยชน์และถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางทั้งในทางเภสัชกรรมอาหารและเครื่องสำอาง เมื่อละลายสารลดแรงตึงผิวในน้ำที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสูงกว่าความเข้มข้นค่าหนึ่งเรียกว่า ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (Critical micelle concentration, CMC) โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวสามารถจับเป็นกลุ่มทรงกลมเรียกว่า ไมเซลล์ (Micelle) การเกิดปฏิกริยาในสารละลายที่ไม่มีเซลล์ พบว่ามีกลไกที่แตกต่างไปจากการเกิดปฏิกริยาในตัวกลางที่ปราศจากไมเซลล์โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้คาดว่าเกิดจากอันตรกิริยาของไฟฟ้าสถิตและอันตรกิริยาของภาวะไม่ชอบน้ำ การเกิดอันตรกิริยาเหล่านี้มีผลต่อการเกิดความเข้มข้นเฉพาะที่ของสารตั้งต้น และสภาวะแวดล้อมจุลภาคขึ้นในโครงสร้างของไมเซลล์ซึ่งสารในปฏิกริยาสามารถกระจายตัวเข้าไปได้โดยในสภาวะแวดล้อมจุลภาคนั้นมีสภาพขั้วต่างไปจากสารละลายที่ปราศจากไมเซลล์ อิทธิพลของสารละลายไมเซลล์สามารถให้ผลเร่งหรือยับยั้งปฏิกริยานั้นทั้งนี้ขึ้นกับคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้สารตั้งต้นในปฏิกริยาและสารอื่นที่เติมลงในระบบ

สารลดแรงตึงผิวที่เติมไปในระบบทั้งหมดนั้นจะใส่ไปเพิ่มสร้างไมเซลล์โดยค่า CMC เป็นค่าที่มีความสำคัญที่ใช้บอกลักษณะของสารลดแรงตึงผิวโดยก่อนที่จะเข้าสู่ CMC แรงตึงผิวของผิวหน้าวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดด้วยความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวนั้นๆ หลังจากถึง CMC แล้วแรงตึงผิวของวัสดุจะเริ่มคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงของความชันกราฟลดลง โดยค่าของ CMC จะทำให้ทราบถึงความสามารถในการกระจายตัวซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ ความดัน และความเข้มข้นของ อิเล็กโทรไลต์ และสารกระตุ้นผิวหน้าตัวอื่นๆ

โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะจับกันอยู่ในรูปของไมเซลล์เมื่อสารลดแรงตึงผิวมีความเข้มข้นเท่ากับหรือสูงกว่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ ไมเซลล์เป็นสภาวะที่อยู่ในสมดุลระหว่างการอยู่เป็นโมเลกุลเดี่ยวๆ และการจับเป็นกลุ่มของโมเลกุลของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว มีรายงานว่าแต่ละโมเลกุลของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบเป็นองค์ประกอบของไมเซลล์นาน 10^{-5} วินาทีแล้วเปลี่ยนเป็นรูปโมเลกุลอิสระก่อนเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปของไมเซลล์อีกโดยแต่ละโมเลกุลมีค่าครึ่งชีวิต 10^{-3} วินาที ผิวของไมเซลล์จะมีประจุเช่นเดียวกับประจุของสารลดแรงตึงผิวที่จับกันเป็นไมเซลล์ โครงสร้างของไมเซลล์ที่มีประจุมักมีลักษณะเป็นทรงกลมที่

ไม่มีขั้วเป็นบริเวณของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนสารไม่มีขั้วที่ไม่ละลายในน้ำหลายชนิดสามารถละลายอยู่ในบริเวณนี้ของไมเซลล์ บริเวณที่ไม่มีขั้วนี้หุ้มด้วยบริเวณของชั้นที่มีขั้วโดยบริเวณที่มีสภาพขั้วนี้สามารถแบ่งได้เป็นชั้นต่างๆ คือ Stern layer Gouy-Chapman layer ปริมาณโมเลกุลของน้ำที่ปรากฏในโครงสร้างของไมเซลล์จะลดลงเรื่อยๆ จากผิวนอกของไมเซลล์เข้าสู่บริเวณชั้นในทรงกลม ในส่วนแกนกลางของไมเซลล์จะไม่พบโมเลกุลน้ำเลย โดยมีรายงานแกนกลางนี้มีค่า Dielectric constant ประมาณ 2.1 สำหรับบริเวณผิวนอกของไมเซลล์ที่ยังมีโมเลกุลของน้ำแทรกตัวอยู่มีชื่อเฉพาะเรียกว่า Palisade layer

การตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของไมเซลล์ เช่น จำนวนโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวในแต่ละไมเซลล์ (Aggregation number, N) ดังตารางที่ 2.3 ขนาดและรูปร่างของไมเซลล์สามารถตรวจสอบโดยใช้หลายเทคนิคพร้อมกัน ได้แก่ Light fluorescence, Ultracentrifugation, Neutron specular reflection, Fourier transform-infrared (FTIR), X-ray diffraction spectroscopy, Dye solubilization และ Monte Carlo calculations



รูปที่ 2.24 รูปจำลองสองมิติแสดงชั้นต่างๆ ของไมเซลล์

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดไมเซลล์ขึ้นกับคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการเตรียมสารลดแรงตึงผิวที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาวเอื้อต่อการเกิดไมเซลล์เมื่อเทียบกับสารที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนสั้นโดยสังเกตจากสารลดแรงตึงผิวที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาวมีค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ที่ต่ำกว่าพวกที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนสั้นดังตัวอย่างในตารางที่ 2.3 การเติมเกลือลงในสารละลายของสารลดแรงตึงผิวมีผลทำให้ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ต่ำลงซึ่งแสดงว่าระบบมีการเกิดไมเซลล์ได้ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเกลือช่วยลดแรงผลักระหว่างประจุของส่วนที่มีขั้วบนโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวทำให้จับกันในแต่ละไมเซลล์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของเกลือที่เติมลงไป

ส่วนการเติมแอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กทำให้ค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์สูงขึ้น เนื่องจากแอลกอฮอล์ไปลดพันธะไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic bonding) แต่ถ้าเติมแอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลยาว (Long chain alcohol) จะทำให้ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ลดลง นอกจากนี้อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ และโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวมีผลต่อลักษณะรูปร่างและจำนวนโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวในแต่ละไมเซลล์ด้วย โดยรูปร่างของไมเซลล์สามารถเปลี่ยนจากทรงกลมไปเป็นทรงรี หรือทรงกระบอก เป็นต้น

การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาในระบบที่ไม่มีเซลล์เป็นตัวกลางนั้นได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดในระบบไมเซลล์นี้สามารถมีผลในการยับยั้งปฏิกิริยาหรือให้ผลในการเร่งปฏิกิริยาเมื่อเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาเดียวกันในตัวกลางที่ไม่มีไมเซลล์ ทั้งนี้ขึ้นกับคุณสมบัติของสารที่เกิดปฏิกิริยาและคุณสมบัติของไมเซลล์

ตารางที่ 2.3 แสดงตัวอย่างค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์และจำนวนโมเลกุลของการรวมกลุ่มจากสารลดแรงตึงผิวต่างๆ [22-23]

สารลดแรงตึงผิว	ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (M)	อุณหภูมิ (°C)	จำนวนโมเลกุลของการรวมกลุ่ม (N)
สารลดแรงตึงผิวประจุบวก			
Cecylammonium bromide	5.0×10^{-3}	25	1100
Dodecyltrimethyl ammonium bromide	6.5×10^{-2}	25	48
Dodecylammonium chloride	1.5×10^{-2}	25	55.5
Dodecyltrimethylammonium bromide	1.5×10^{-2}	25	50
สารลดแรงตึงผิวประจุลบ			
Sodium decyl sulfate	3.3×10^{-2}	25	50
Sodium dodecyl sulfonate	4.4×10^{-2}	30	40
Sodium dodecanoate	2.4×10^{-2}	25	56 (in 0.013 M KBr)
Sodium dodecyl sulfate	8.1×10^{-3}	25	62
สารลดแรงตึงผิวประจุขั้วคู่			
Dodecyl dimethylammonio propane carboxylate	5.3×10^{-3}	30	N/A*
N-Dodecyl-N, N-dimethylglycine	1.8×10^{-3}	23	N/A*
C-Dodecyl-N, N-dimethylglycine	1.3×10^{-3}	27	N/A*
สารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ			
Polyoxyethylene(6)octanol	9.9×10^{-3}	25	32
Polyoxyethylene(6)decanol	9.0×10^{-4}	25	73
Polyoxyethylene(12)hexadecanol	2.3×10^{-6}	25	150
Polyoxyethylene(20)sorbitan monooleate (tween 80, Polysorbate 80)	1.3×10^{-3} (g/dliter)	25	N/A*

*N/A ไม่พบรายงาน

2.5 การดูดซับ (Adsorption) [24]

การศึกษาการดูดซับโมเลกุลบนพื้นผิวเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้เกิดความเข้าใจกระบวนการทางเคมีพื้นผิว เช่น ปฏิกิริยาอะตอมเลซิสที่พื้นผิวมีกระบวนการต่างๆ ที่เป็นวัฏจักร คือการแพร่ของสารตั้งต้นไปยังตำแหน่งที่ว่องไวบนพื้นผิว (Active surface) การดูดซับของสารตั้งต้นบนพื้นผิว ปฏิกิริยาที่พื้นผิวที่เกิดการดูดซับ (Surface reaction) การคายของผลิตภัณฑ์ต่างๆ จากพื้นผิว และการแพร่ของ

ผลิตภัณฑ์ออกจากพื้นผิวนอกจากกระบวนการดูดซับต้องคำนึงถึงกระบวนการคายโมเลกุลที่ถูกดูดซับด้วยเพื่อศึกษาผลการดูดซับของโมเลกุลนั้นๆ บนพื้นผิว คำนิยามที่สำคัญในการศึกษาการดูดซับโมเลกุลบนพื้นผิวมีดังนี้

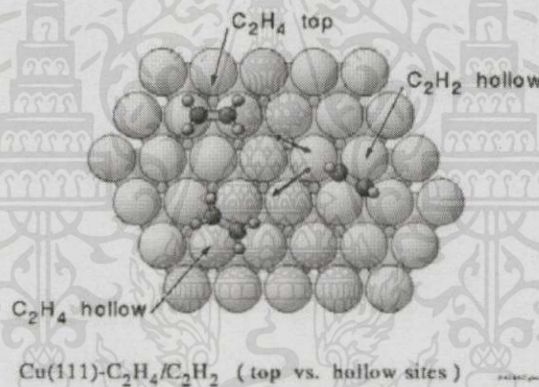
1) ซับสเตรต (Substrate) บางครั้งเรียกว่าตัวดูดซับ (Adsorbent) หมายถึง พื้นผิวของแข็งหรือของเหลวที่เกิดการดูดซับอะตอมหรือโมเลกุลของสารต่างๆ

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



รูปที่ 2.25 ตำแหน่งที่เกิดการดูดซับบนพื้นผิวระหว่างพื้นผิวทองแดง (ตัวดูดซับหรือซับสเตรต) และโมเลกุลของเอทิลีนและอะเซทิลีน (ตัวถูกดูดซับ)

การดูดซับ (Adsorption) หมายถึง การที่โมเลกุลของสารถูกดึงเข้ามาติดผิวของสารดูดซับหรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (Adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำจะถูกดูดซับได้แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ พลังงานอิสระที่ผิวของสารถูกดูดซับจะมีความสัมพันธ์กับแรงตึงผิวและพื้นที่ผิวดังสมการที่ 2.5 เมื่อความตึงผิว (Surface tension) หรือพื้นที่ผิว (Surface area) เปลี่ยนไปซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานอิสระที่ผิว ($\Delta G_{\text{surface}}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีก $\Delta G_{\text{surface}}$ คือ พลังงานอิสระที่ผิว อิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

γ คือ ความตึงผิว

A คือ พื้นที่ผิว

สมการที่ 2.5

$$\Delta G_{\text{surface}} = \gamma A$$

ปริมาณสารที่ถูกดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสมบูรณ์ ความดัน และพลังงานศักย์ของอันตรกิริยา (Interaction potential energy) ระหว่างสารที่ถูกดูดซับซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลวหรือแก๊สกับ สารดูดซับซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันหรือความเข้มข้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง

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

ตารางที่ 2.4 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ [24]

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
ค่าความร้อนของการดูดซับ 100-500 kJ/mol	ค่าความร้อนของการดูดซับประมาณ 20 kJ/mol หรือน้อยกว่า
เกิดได้ที่อุณหภูมิสูง	เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ
ไม่เกิดการผันกลับ	เกิดการผันกลับได้เป็นส่วนใหญ่
เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว	เกิดการดูดซับหลายชั้น
มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้อง	ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการ
แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็น แรงดึงดูดอย่างแข็งแรง	แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็น แรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ

ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ของปริมาณสารที่ถูก ดูดซับที่พื้นผิวกับความดันของแก๊สหรือความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับ ตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของ สารละลาย ที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ ไอโซเทอมการดูดซับแบ่งออกได้เป็นดังนี้

2.5.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ในปี ค.ศ.1916 เออร์วิง แลง เมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอมแบบง่ายสุดโดยมีสมมติฐานคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สง 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) ปกติใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีก 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน ไปใช้

3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน

จากการศึกษาไอโซเทอมของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุลสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายได้ดังสมการที่ 2.6

$$q_e = Q^{\circ} b C_e / (1 + b C_e) \quad \text{สมการที่ 2.6}$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของสารถูกดูดซับบนสารดูดซับหนักหนึ่งกรัม
 C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล
 Q° คือ ปริมาณของสารถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว
 b คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

$$\text{หรือ} \quad C_e / q_e = 1 / b Q^{\circ} + C_e / Q^{\circ} \quad \text{สมการที่ 2.7}$$

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 ไอโซเทอมแบบฟรอยด์ลิช (Freundlich isotherm) ในปี ค.ศ.1880-1941 นักฟิสิกส์เคมีชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ปริมาณของสารถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายดัง สมการที่ 2.8

$$q_e = X/m = k_f C_e^{1/n} \quad \text{สมการที่ 2.8}$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับที่สมดุล
 X/m คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ
 k_f และ n คือ ค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

จากสมการฟรอยด์ลิช เมื่อใส่ลอการิทึม (Logarithm) จะได้สมการ

$$\log q_e = \log X/m = \log k_f + (1/n) \log C_e \quad \text{สมการที่ 2.9}$$

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C_e$ ที่อุณหภูมิคงที่จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกนสามารถนำมาหาค่า k_f ได้และความชันของกราฟเป็น $1/n$ บางกรณีที่พลอตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C_e$ แล้วไม่ได้เส้นตรงแสดงว่าเกิดการเบี่ยงเบนไปจากสมการของฟรอยด์ลิช เช่น การดูดซับสารละลายที่ไม่ได้วัดจากน้ำหนักจริงของสารดูดซับ แต่ค่าจากสารถูกดูดซับในตัวทำละลายปริมาณมากทำให้สารถูกดูดซับที่เหลือที่ความเข้มข้นสูงจึงมีปริมาณลดลง

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 ได้ศึกษาการดูดซับหลายชั้นและเสนอดังสมการที่ 2.10

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

สมการที่ 2.10

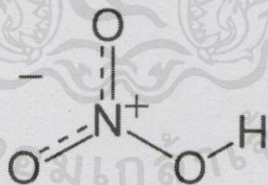
เมื่อ	P	คือ ความดันสมดุลของสารถูกดูดซับ
	V	คือ ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดัน
	V ₀	คือ ปริมาตรที่ถูกดูดซับเพื่อให้เกิดเป็นชั้นเดียว
	P ₀	คือ ความดันไออิ่มตัวของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ
	k	คือ ค่าคงที่

2.6 กรดไนตริก (Nitric acid, HNO₃) [25-26]

กรดไนตริกหรือดินประสิว (Nitric acid, HNO₃) ถูกค้นพบโดยการสังเคราะห์โดย “Muslim alchemist Jabir ibn Hayyan” ประมาณ ค.ศ.800 เป็นกรดที่มีอันตรายมากหากสัมผัสจะทำให้เกิดแผลไหม้ขั้นรุนแรง กรดไนตริกบริสุทธิ์มีความหนาแน่น 1.55 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็นของเหลวใสไม่มีสี หากเก็บไว้นานจะมีสีเหลือง เนื่องจากมีส่วนประกอบของออกไซด์ของไนโตรเจน มีกลิ่นฉุนรุนแรง เป็นของแข็งที่อุณหภูมิ -42 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นผลึกสีขาวและจะเดือดที่อุณหภูมิ 83 องศาเซลเซียส แต่สามารถเดือดในที่ที่มีแสงสว่างที่อุณหภูมิห้องได้ซึ่งจะมีการสลายตัวในรูปแบบไนโตรเจนไดออกไซด์ตามปฏิกิริยาดังนี้



นั่นคือ กรดไนตริกบริสุทธิ์ที่ปราศจากน้ำเจือปน ควรเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียสเพื่อป้องกันการสลายตัวเป็นไนโตรเจนไดออกไซด์ที่ละลายกลับเข้าไปในกรดทำให้กรดไนตริกมีสีเหลืองหรือเป็นสีแดงที่อุณหภูมิสูง หากกรดมีความเข้มข้นสูงเกินกว่าร้อยละ 86 จะมีไอระเหยสีขาวแพร่กระจายในอากาศ ส่วนกรดที่มีไนโตรเจนไดออกไซด์ละลายอยู่จะให้ไอระเหยสีแดงอมน้ำตาล

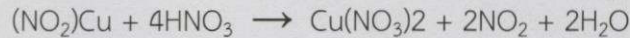


รูปที่ 2.26 โครงสร้างโมเลกุลของกรดไนตริก

กรดไนตริกสามารถละลายน้ำได้ทุกอัตราส่วนที่ความเข้มข้นร้อยละ 68 กรดไนตริกจะเป็นสารละลายอะซีโอโทรพ คือของเหลวที่มีจุดเดือดสูงสุดและต่ำสุดที่สามารถกลั่นออกโดยไม่มีการสลายตัวและเป็นสัดส่วนที่แน่นอน เช่น ไอโซโทรพิลแอลกอฮอล์กับน้ำซึ่งที่ความเข้มข้น 68 เปอร์เซ็นต์นี้ กรดจะเดือดที่อุณหภูมิ 120.5 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ กรดไนตริกสามารถอยู่ในรูปของแข็งไฮเดรตหรือสารประกอบที่มีโมเลกุลของน้ำอยู่ด้วยได้สองรูปแบบ คือโมโนไฮเดรต (Monohydrate, HNO₃·H₂O) และไตรไฮเดรต (Trihydrate, HNO₃·3H₂O) เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรดไนตริกมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์สูงมากสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์หลายชนิด ปฏิกิริยารุนแรงจนสามารถระเบิดได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิ

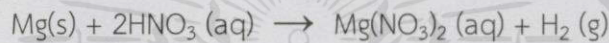
และตัวลวดออกซิเจน ในปฏิกิริยาที่มีออกซิเจนเกี่ยวข้องกับผลของปฏิกิริยาที่ได้มีหลากหลาย ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้กับโลหะแทบทุกชนิดยกเว้นตระกูลโลหะมีค่า เช่น ทองคำ เงิน แพลทินัม พลาเดียม รูทีเนียม โรเดียม ออสเมียม อิริเดียม และโลหะผสมบางชนิด ปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นกับกรดเข้มข้นจะมีแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์เกิดขึ้นดังสมการ



เมื่อเป็นกรดเจือจางทำปฏิกิริยา จะเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เกิดขึ้น



เมื่อกรดไนตริกทำตัวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิไดซิงหรือเมื่อใช้กรดไนตริกเจือจางทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียม (Mg) หรือแมงกานีส (Mn) หรือแคลเซียม (Ca) โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำจะให้แก๊สไฮโดรเจน

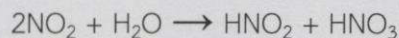


ปฏิกิริยากับโลหะยกเว้นกับซิลิคอนและกลุ่มฮาโลเจน โดยปกติจะเกิดปฏิกิริยารุนแรงซึ่งจะให้แก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์เมื่อใช้กรดเข้มข้นและแก๊สไนโตรเจนออกไซด์เมื่อใช้กรดเจือจาง



ไอกรดไนตริกสีขาวเรียกว่า 100 เปอร์เซนต์กรดไนตริกหรือ WFNA (White fuming nitric acid) ใกล้เคียงกับแอสไฮดรัสไนตริก คือกรดไนตริกที่ไม่มีส่วนผสมของน้ำอยู่เลย ไอกรดไนตริกสีขาวมีส่วนประกอบของน้ำไม่เกินร้อยละ 2 และแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ไม่เกินร้อยละ 0.5 ไอกรดไนตริกสีแดง หรือ RFNA (Red fuming nitric acid) ประกอบไปด้วยแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์จำนวนมาก โดยมีส่วนผสมของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ไม่เกินร้อยละ 17 และอีกสูตรหนึ่งมีส่วนประกอบของแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ไม่เกินร้อยละ 13 สามารถยับยั้งการเกิดไอกรดไนตริก (ทั้ง IWfNA และ IRfNA) โดยการเติมไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) ร้อยละ 0.6-0.7 ลงในกรดไนตริก ฟลูออไรด์ที่ใส่เพื่อเพิ่มการป้องกันการกัดกร่อนของถังโลหะฟลูออไรด์จะสร้างชั้นเมทัลฟลูออไรด์เคลือบผิวป้องกันการโลหะ

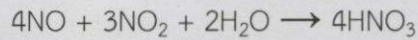
กรดไนตริกสร้างขึ้นโดยการผสมแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์กับน้ำในบรรยากาศที่เติมไปด้วยออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ออกซิไดซ์เป็นกรดไนตริก (HNO₂) และกรดไนตริก (HNO₃) ดังสมการ



กรดไนตริกสามารถสลายตัวเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก 3HNO₂ → HNO₃ + 2NO + H₂O เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไนตริกออกไซด์จะออกซิไดซ์กับไนโตรเจนไดออกไซด์และทำปฏิกิริยากับน้ำอีกครั้งกลายเป็นกรดไนตริก



กรดไนตริกเจือจางสามารถทำให้เข้มข้นได้โดยการกลั่นจนมีความเข้มข้นกรดร้อยละ 68 โดยจุดนี้ส่วนผสมอะซิโตรีปิค (ของเหลวผสมที่มีจุดเดือดสูงสุดและต่ำสุดที่สามารถกลั่นออกโดยไม่มี การสลายตัวและเป็นสัดส่วนที่แน่นอน) ประกอบด้วยน้ำร้อยละ 32 การทำให้เข้มข้นมากกว่านี้ต้อง อาศัยการกลั่นกับกรดซัลฟิวริกซึ่งมีหน้าที่เป็นสารตกจับน้ำ (Dehydrating agent) ในห้องปฏิบัติการ จะกลั่นโดยใช้วัสดุที่เป็นแก้วทั้งหมดและลดแรงดันเพื่อป้องกันการสลายตัวของกรด ในการใช้งานใน เิงพาณิชย์จะใช้สารละลายกรดที่มีความเข้มข้นของกรดไนตริกระหว่างร้อยละ 52 ถึง 68 การผลิตใน เิงพาณิชย์ใช้ขบวนการที่เรียกว่า Ostwald ตามชื่อของ Wilhelm Ostwald กรดยังสามารถสัง- เเคราะห์ได้โดยการออกซิไดซ์แอมโมเนีย ผลผลิตที่ได้จะถูกเจือจางโดยน้ำและเป็นส่วนหนึ่งของ ปฏิกิริยาเคมี

การสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ กรดไนตริกสามารถสังเคราะห์ได้จากคอปเปอร์ไอออนทุไน- เตรด (Copper (II) nitrate) หรือการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างโปแตสเซียมไนเตรด (KNO_3) กับกรด ซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 96 (H_2SO_4) โดยทั้งสองมีน้ำหนักเท่าๆ กันและกลั่นที่อุณหภูมิ 83 องศา เซลเซียส ซึ่งเป็นจุดเดือดของกรดไนตริกจนกระทั่งเหลือแต่ผลึกสีขาวของโปแตสเซียมไฮโดรเจน- ซัลเฟต (KHSO_4) ไอของกรดไนตริกสีแดงที่ได้มาอาจเปลี่ยนเป็นไอสีขาวของกรดไนตริก



แก๊ส NO_x สามารถกำจัดได้โดยการลดความดันลงที่อุณหภูมิห้อง (10-30 นาทีที่ 200 มิลลิ- เมตรปรอทหรือ 27 กิโลปาสกาล) จะให้ไอกรดไนตริกสีขาว โดยขบวนการนี้สามารถทำได้ทั้งลดความ ดันและอุณหภูมิในคราวเดียวกัน

กรดไนตริกในห้องปฏิบัติการ IWFNA ถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิไดซ์ในเชื้อเพลิงเหลว ของจรวด IRFNA เป็น 1 ใน 3 ขององค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวสำหรับจรวดทำลาย BOMARC สารละลายผสมระหว่างกรดไนตริกกับแอลกอฮอล์ (Nitral) ถูกใช้ในขบวนการกัดผิวโลหะกำจัดรอย ชีต (Reveal the microstructure) ในเชิงพาณิชย์มีการใช้ส่วนผสมนี้กับกรดไนตริกความเข้มข้น ร้อยละ 5-30 และกรดฟอสฟอริกร้อยละ 15-40 เพื่อใช้เป็นน้ำยาทำความสะอาดเครื่องใช้ในครัวเรือน โดยสามารถกำจัดคราบของแคลเซียมและแมกนีเซียมหรือตะกรันที่เกิดจากการใช้น้ำกระด้าง กรดไน- ตริกยังถูกใช้ในขบวนการทำระเบิดที่มีไนเตรทเป็นองค์ประกอบ เช่น ไนโตรกลีเซอริน ไตรไนโตรโทลู- อีน (TNT) และไซโครไตรเมทิลีนไตรไนทรามิน (RDX)

สำหรับงานไม้ ในความเข้มข้นต่ำประมาณร้อยละ 10 กรดไนตริกใช้ในการทำให้ไม้สนหรือไม้ เมเปิลดูเก่าโดยสีจะเปลี่ยนเป็นสีเทาทองคล้ายๆ กับขี้ผึ้งเก่าและดูเป็นไม้เก่า

ในการใช้งานอื่นๆ กรดไนตริกยังใช้ในการแยกโลหะออกจากแร่เพราะคุณสมบัติในการทำ ปฏิกิริยากับโลหะแทบทุกชนิด เมื่อใช้ผสมรวมกันกับกรดไฮโดรคลอริกจะเป็นสารละลายกรดที่เรียก ว่า Aqua Regia หรือ Royal Water ที่สามารถละลายทองคำและแพลทินัมได้ กรดไนตริกมีความ สามารถในการออกซิไดซ์สูงมาก ปฏิกิริยาของกรดไนตริกกับสารประกอบ เช่น โซยาไนต์ คาร์ไบด์ และผงโลหะสามารถระเบิดได้ ปฏิกิริยาของกรดไนตริกกับสารประกอบสารอินทรีย์ เช่น เทอร์เพนทิน

(เป็นของเหลวที่ได้จากการกลั่นเรซินที่ได้จากต้นไม้ เช่น ต้นสน) ซึ่งสามารถระเบิดรุนแรงและสามารถจุดระเบิดตัวเองได้ (Self-igniting) กรดไนตริกเข้มข้นสามารถกัดผิวหนังของมนุษย์ เป็นสีเหลืองเนื่องจากทำปฏิกิริยากับเจลาติน จุดคราบสีเหลืองจะเปลี่ยนสีส้มเมื่อถูกทำให้มีสภาพเป็นกลาง

กรดไนตริกเป็นสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูงจึงอาจเป็นอันตรายต่อผิวหนัง ตา เยื่อหู หากมีการสัมผัสกับกรดไนตริกโดยตรงจะทำให้ผิวหนังหรือเยื่อเมือมีสีเหลือง ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของกรดไนตริก หากกรดไนตริกเข้มข้นสัมผัสกับกระจกตาแม้เพียงเวลาสั้นๆ สามารถทำให้เกิดแผลที่กระจกตาและมีการทำลายเนื้อเยื่อและก่อให้เกิดความผิดปกติของการมองเห็นหรือตาบอดชนิดถาวรได้ ผู้ที่รับประทานกรดไนตริกเข้าไปอาจมีอาการคลื่นไส้ อาเจียนเป็นเลือดทางเดินอาหารอักเสบ ชนิดเลือดออกเนื้อเยื่อถูกทำลาย ซ็อก กล้องเสียงวาม แผลทะลุที่บริเวณทางเดินหายใจ เม็ดเลือดแดงถูกทำลายและภาวะที่มีกรดในร่างกายมากเกินไป (Metabolic acidosis) ในกรณีได้รับสัมผัสกรดไนตริกในช่วงเวลาสั้นๆ นั้นผลของไอหรือควันของกรดไนตริกอาจก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตา จมูก ลำคอและผิวหนัง สารละลายกรดไนตริกหรือไอของกรดไนตริกที่ความเข้มข้นสูงๆ อาจทำให้เกิดแผลไหม้รุนแรงและอาจทำให้เกิดการทำลายดวงตาอย่างถาวรทำให้ผิวไหม้เป็นแผล ผิวหนังเปลี่ยนสีเป็นสีเหลือง หากหายใจเอาไอของกรดไนตริกเข้าไปจะทำให้หายใจได้ลำบากซึ่งอาการนี้อาจเกิดขึ้นภายหลังจากหายใจเอาไอกรดไนตริกเข้าไปแล้วเป็นเวลานาน (Delayed onset) นอกจากนี้แล้วยังอาจทำให้เกิดภาวะปอดบวมได้อีกด้วย การกลืนกินกรดไนตริกเข้าไปอาจทำให้ปาก คอ และทางเดินอาหารเป็นแผลไหม้ได้สำหรับผลจากการได้รับสัมผัสกรดไนตริกเป็นระยะเวลานานอาจทำให้ฟันผุรวมทั้งมีการทำลายของปอดได้

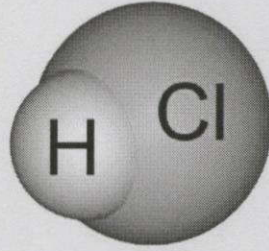
2.7 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) [27]

กรดไฮโดรคลอริก หรือมูเรียติกแอซิดถูกค้นพบโดยจาเบียร์ เฮย์ยัน (Jabir ibn Hayyan) ราวปี ค.ศ.1800 ช่วงปฏิวัติอุตสาหกรรม (Industrial Revolution) ซึ่งถูกใช้อย่างกว้างขวางในการผลิตสารประกอบอินทรีย์ เช่น วินิลคลอไรด์ (Vinylchloride) สำหรับผลิตพอลิไวนิลคลอไรด์พลาสติก (Polyvinylchloride plastic) และ MDI/TDI (Toluene Diisocyanate) สำหรับผลิตพอลิยูรีเทน (Polyurethane) และใช้ในการผลิตขนาดเล็กเช่น การผลิตเจลาติน (Gelatin) สำหรับใช้ปรุงอาหารและใช้ฟอกหนัง มีกำลังผลิตในปัจจุบันประมาณ 20 ล้านเมตริกตันต่อปี (20 Mt/a) ของก๊าซ HCl

กรดไฮโดรคลอริก หรือกรดเกลือเป็นสารประกอบเคมีประเภทกรดละลายในน้ำโดยเป็นสารละลายของไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) เป็นกรดแก่ ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของกรดกระเพาะ (Gastric acid) ทำหน้าที่ช่วยในการทำงานของเอนไซม์เปปซินเพื่อให้เกิดกระบวนการย่อยโปรตีนในกระเพาะอาหาร ซึ่งมีการนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม และเป็นของเหลวที่มีฤทธิ์การกัดกร่อนสูง โดยมีลักษณะเฉพาะดังต่อไปนี้

- 1) เป็นของเหลวไม่มีสีหรือมีสีใสออกเหลือง มีไอระเหย มีกลิ่นฉุน ไม่เป็นสารไวไฟ
- 2) ระเหยเป็นไอได้รวดเร็ว ไอเป็นกรดมีพิษต่อระบบทางเดินหายใจ
- 3) เป็นกรดแก่
- 4) มีมวล 36.46 กรัม/โมล ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
- 5) ความหนาแน่น 1.18 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 6) จุดหลอมเหลว -27.32 องศาเซลเซียส
- 7) จุดเดือด 110 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีหนังสือพิมพ์และสื่ออื่นๆ ที่นำข้อมูลไปใช้โดยไม่แจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

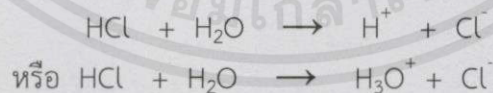


รูปที่ 2.27 รูปแบบโครงสร้างโมเลกุลของกรดไฮโดรคลอริก

ในการผลิตกรดไฮโดรคลอริกปริมาณมากๆ จะเกี่ยวข้องกับการผลิตสารประกอบเคมีตัวอื่นๆ ในเชิงอุตสาหกรรมด้วยในอุตสาหกรรมคลอรีนอัลคาลิ สารละลายเกลือจะถูกอิเล็กโทรไลต์จนได้ผลผลิตออกมาเป็นคลอรีน โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน โดยคลอรีนบริสุทธิ์จะมาผสมกับแก๊สไฮโดรเจนแล้วเกิดเป็นแก๊ส HCl บริสุทธิ์ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ เอ็กโซเทอร์มิก (Exothermic) ระบบติดตั้งนี้เรียกว่า ไฮโดรเจนคลอไรด์โอเวน $\text{Cl}_2 + \text{H}_2 \rightarrow 2\text{HCl}$ แก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์บริสุทธิ์ถูกดูด (Absorption) ลงน้ำดีมีเนอโลซ์ได้เป็นกรดเกลือบริสุทธิ์ต่อไป

กรดเกลือหรือกรดไฮโดรคลอริกเป็นสารประกอบเคมีประเภทกรดละลายในน้ำโดยเป็นสารละลายไฮโดรเจนคลอไรด์ในน้ำมีสูตรเคมีคือ HCl มีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งแก๊สและของเหลว ถ้าพบในรูปแบบของเหลวเรียกว่า กรดเกลือ (Hydrochloric acid) ถ้ามีสถานะเป็นแก๊สเรียกว่า ไฮโดรเจนคลอไรด์ (Hydrogen chloride) กรดเกลือในห้องปฏิบัติการใช้ในการผลิตสารประกอบคลอไรด์ แก๊สไฮโดรคลอริกใช้มากในอุตสาหกรรมผลิตสารเคมีและยาหลายชนิด การชุบและทำความสะอาดโลหะ ปีโตรเลียม ยาง สี ใช้บำบัดขยะที่มีฤทธิ์เป็นด่างสูงเพื่อให้เป็นกลาง เป็นสารเคมีในห้องปฏิบัติการและใช้ในการแยกแร่ให้บริสุทธิ์ เช่น แร่สังกะสี แทนทาลัม เป็นต้น และมักใช้กรดเกลือเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในผลิตภัณฑ์ประเภทน้ำยาล้างห้องน้ำ เพราะกรดเกลือมีคุณสมบัติในการกัดกร่อนคราบสกปรก ทำให้การทำความสะอาดสุขภัณฑ์สามารถทำได้ง่าย

กรดเกลือจัดเป็นกรดแก่เนื่องจากมีความสามารถในการแตกตัวได้ร้อยละ 100 สามารถเขียนสมการแสดงการแตกตัวได้ดังนี้



กรดไฮโดรคลอริกได้จากปฏิกิริยาของเกลือแกงหรือโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride) กับกรดซัลฟิวริก หรือโดยปฏิกิริยาของคลอรีนและไฮโดรเจน ซึ่งอาจเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) ทางอุตสาหกรรม หรือผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) จากเกลือแกงด้วยกระแสไฟฟ้า กรดเข้มข้นที่จำหน่ายในท้องตลาดมีก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ประมาณร้อยละ 37

กรดไฮโดรคลอริกมีความเป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม การเกิดพิษต่อร่างกายโดยการหายใจไอรระเหยหรือละอองกรด ทำให้ระคายเคืองเนื่องจากมีฤทธิ์กัดกร่อนรุนแรง ทำลายเนื้อเยื่อ โดยทำปฏิกิริยาโดยตรงกับโปรตีนทำให้ละลายในกรดเข้มข้นได้ อิมโกลบินในเลือดเปลี่ยนเป็นแอสิด-

ฮีมาติน (Acid hematin) ซึ่งมีสีคล้ำและตกตะกอน ส่วนที่สัมผัสเปลี่ยนเป็นสีดำหรือสีน้ำตาล หายใจติดขัด จมูก ลำคอ และทางเดินหายใจส่วนบนอักเสบ กรณีที่รุนแรงทำให้น้ำท่วมปอด ระบบหายใจล้มเหลวและถึงตายได้ ถ้าสัมผัสถูกตาทำให้ตาแดง และระคายเคืองตา ถ้าความเข้มข้นสูงอาจเกิดแผลไหม้และตาบอดได้ การสัมผัสทางผิวหนังทำให้ระคายเคืองเกิดผื่นแดง เป็นแผลพุพอง ผิวหนังเปลี่ยนสี การกลืนกินจะเกิดอาการปวดร้อนรุนแรง มีแผลไหม้ในปาก คอ ทางเดินอาหาร อาจคลื่นไส้ถึงตายได้

กรดไฮโดรคลอริกกัดกร่อนโลหะเช่นเดียวกับกรดซัลฟิวริก จึงต้องหลีกเลี่ยงหรือระมัดระวังการทำงานกับโลหะรวมทั้งต่างหรือเบส สารออกซิไดเซอร์และสารเคมีอีกหลายชนิด เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดแก๊สที่ติดไฟและแก๊สอันตรายได้

2.8 โลหะผสมนิกเกิล (Nickel and mixed Nickel Metals) [28]

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนสูงเป็นโลหะที่มีสีขาวสวยงาม มีความเหนียว และอ่อนตัวสูง สามารถขึ้นรูปเย็นได้โดยง่าย นอกจากนี้นิกเกิลสามารถละลายกับโลหะอื่นได้ง่ายและให้สารละลายของแข็งที่มีความเหนียวประมาณร้อยละ 60 ของนิกเกิล จะใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าผสม ส่วนที่เหลือจะใช้ทำโลหะนิกเกิลผสมที่ใช้ในงานพิเศษที่ทนการกัดกร่อนสูงๆ และใช้เคลือบผิวเหล็ก (Electroplating) โดยอาศัยคุณสมบัติทนการกัดกร่อนและให้สารละลายของแข็งได้ง่าย เมื่อพิจารณาด้านสมบัติเชิงกลจะพบว่ามีความสมบัติเทียบเท่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่เหนียวกว่าตรงที่สามารถรักษาความเหนียวได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ คุณสมบัติตัวนำไฟฟ้าของนิกเกิลจะสูงไม่เท่าทองแดงและอะลูมิเนียมแต่ก็สูงพอที่จะใช้ในบางกรณีที่ขั้วสายหรือเทอร์มินอลในงานอิเล็กทรอนิกส์ในบรรยากาศใช้งาน ถ้ามีแก๊สของกำมะถันอยู่ด้วยจะมีส่วนทำให้นิกเกิลขาดความต้านทานที่ดีและบางทีอาจจะเปราะแตกง่าย ส่วนใหญ่ไม่ใช้นิกเกิลในสภาพโลหะบริสุทธิ์เพราะนิกเกิลมีราคาสูงเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ จะใช้ในลักษณะโลหะผสมและเฉพาะกรณีที่มีความจำเป็นเพื่ออาศัย

คุณสมบัติพิเศษของนิกเกิลเท่านั้น

คุณสมบัติทางฟิสิกส์

น้ำหนักอะตอม 58.69

โครงสร้างระบบผลึก Face Centered Cubic ($A=3.516^{\circ}A$)

ความหนาแน่น ($25^{\circ}C$) 8.89 g/cm^3

อุณหภูมิหลอมเหลว $1435^{\circ}-1445^{\circ}C$

จุดเดือดกลายเป็นไอ $2730^{\circ}C$

ความร้อนจำเพาะ ($27^{\circ}-100^{\circ}C$) $0.130 \text{ cal/g}^{\circ}C$

ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย 73.8 cal/g

สัมประสิทธิ์การขยาย ($27^{\circ}-100^{\circ}C$) $13 \times 10^{-6}/^{\circ}C$

ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ($20^{\circ}C$) 9.5 microhm.cm

สัมประสิทธิ์ตัวนำความร้อน ($27^{\circ}-100^{\circ}C$) $0.145 \text{ cal.cm/cm}^2.s.^{\circ}C$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส.คุณสมบัติเชิงกล ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ข้อมูลนี้แก่บุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารนี้

ความแข็งแรงหรือความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) 47 kg/mm^2

พิกัดความยืดหยุ่น (Elastic limit) 15 kg/mm^2

อัตราการยืดตัว (Percent elongation) 40%

ความแข็ง (Hardness) 110 HB.

โมดูลัสของการยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) 21000 kg/mm^2

โลหะที่นำมาผสมกับนิกเกิลและใช้ในงานวิศวกรรมที่สำคัญ ได้แก่ ทองแดง โครเมียม และโมลิบดีนัม ส่วนใหญ่จะผสมกับนิกเกิลมากกว่าชนิดเดียว ในการศึกษาโลหะผสมนิกเกิลจะพิจารณาเป็นลักษณะโลหะผสม 2 ชนิดก่อน (Binary system) เป็นพื้นฐาน ดังเช่น โลหะผสมนิกเกิลและทองแดง โลหะผสมนิกเกิลและเหล็ก โลหะผสมนิกเกิลและโครเมียม เป็นต้น

2.8.1 โลหะผสมนิกเกิลและโครเมียม (Nickel-Chromium alloy)

โครเมียมสามารถละลายได้ดีในนิกเกิลเฉพาะในสภาพของเหลวแต่ในสภาวะของแข็งละลายได้บางส่วนให้ปฏิกิริยาอุทกคที่อุณหภูมิ 1345 องศาเซลเซียสโดยมีส่วนผสมยูเทคติกอยู่ที่ร้อยละ 52 โครเมียม โลหะผสมนิกเกิลและโครเมียมเป็นโลหะผสมที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูงใช้ทำลวดต้านทานไฟฟ้าในอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heating element) นอกจากนี้โลหะผสมนิกเกิลและโครเมียมยังมีคุณสมบัติต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันได้ดีแต่ถ้าผสมโครเมียมสูงเกินกว่าร้อยละ 20 โลหะผสมจะมีความแข็งสูงเปราะแตกหักได้ง่าย ส่วนใหญ่โลหะผสมนิกเกิลและโครเมียมจะผสมโลหะที่สามารถไปด้วย เช่น ผสมเหล็กหรือโมลิบดีนัม เพื่อให้เกิดคุณสมบัติเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกผลึกจะมีทั้งความแข็งแรงและความแข็งสูง

โลหะผสมนิกเกิลและโครเมียมที่ใช้ในงานประเภททนความร้อนที่ควรรู้จักมีหลายชนิด ดังเช่น

1) Chromel A หรือลวดนิโครมเป็นโลหะผสมที่ประกอบด้วยนิกเกิลร้อยละ 80 โครเมียมร้อยละ 20 ใช้ทำลวดต้านทานไฟฟ้าให้ความร้อนได้จนถึงอุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส อาจจะมีอีกชั้นคุณภาพหนึ่งคือ Chromel C มีนิกเกิลลดลงเหลือร้อยละ 60 โครเมียมร้อยละ 16 เหล็กร้อยละ 24 ใช้เป็นลวดให้ความร้อนได้เช่นเดียวกันแต่เฉพาะใช้กับเครื่องทำความร้อนกำลังไฟฟ้าต่ำ

2) Inconel เป็นโลหะผสมประกอบด้วยนิกเกิลร้อยละ 80 โครเมียมร้อยละ 14 และเหล็กร้อยละ 6 เป็นโลหะผสมที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูงไม่เกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงมีทั้งความแข็งแรงและความเหนียวสูง ใช้ทำอุปกรณ์ในโรงงานผลิตอาหาร เช่น เครื่องทำความร้อน และเครื่องทำความเย็นอุปกรณ์เครื่องพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurizer) ในโรงงานผลิตนม นอกจากนี้ยังใช้ทำท่อไอเสียเครื่องยนต์ของเครื่องบิน อุปกรณ์เตาอบชุบไนไตรต์ และคาร์บูไรซิง (Carburizing)

3) Hastelloy X เป็นโลหะผสมนิกเกิลร้อยละ 47 โครเมียมร้อยละ 22 เหล็กร้อยละ 18 โมลิบดีนัมร้อยละ 9 และทังสเตนร้อยละ 1 มีคุณสมบัติต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้จนถึงอุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส และยังมีแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์สูง เหมาะสำหรับการใช้ทำส่วนประกอบของเตาหลอมและเครื่องยนต์เทอร์ไบน์

โลหะผสมนิกเกิลที่อยู่ในกลุ่มทนการกัดกร่อนสูง และการใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงที่สำคัญ ได้แก่

1) Hastelloy A นิกเกิลร้อยละ 56 โมลิบดีนัมร้อยละ 22 เหล็กร้อยละ 22

2) Hastelloy B นิกเกิลร้อยละ 62 โมลิบดีนัมร้อยละ 32 เหล็กร้อยละ 6 เป็นโลหะผสมที่มีโครงสร้างเป็นออสเทนไนท์ (Austenite) ไม่สามารถชุบแข็งได้ด้วยกรรมวิธีตกผลึก (Age-hardening) เพิ่มความแข็งแรงได้โดยการขึ้นรูปเย็น มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนจากกรดได้ดี โดยเฉพาะกรดเกลือ กรดฟอสฟอรัส และอื่นๆ ใช้มากในอุตสาหกรรมผลิตกรดดังกล่าว

3) Hastelloy C เป็นโลหะผสมนิกเกิล โมลิบดีนัม โครเมียม และเหล็กซึ่งโดยประกอบไปด้วยนิกเกิลร้อยละ 53 โมลิบดีนัมร้อยละ 19 โครเมียมร้อยละ 17 เหล็กร้อยละ 6 และทั้งสแตนร้อยละ 5 มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนของกรดไนตริก กรดกำมะถัน และกรดโครมิก (Oxidizing agent) ได้ดีและยังมีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันได้จนถึงอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

4) Hastelloy D เป็นโลหะผสมนิกเกิลชนิดต้องการคุณสมบัติทางด้านหล่อหลอม (Casting alloy) มีความแข็งและความเหนียวสูง มีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนกรดกำมะถันร้อนได้ดี เป็นโลหะผสมที่ประกอบไปด้วยนิกเกิลร้อยละ 85 ซิลิคอนร้อยละ 10 ทองแดงร้อยละ 3 และอลูมิเนียมร้อยละ 1

2.8.2 โลหะผสมนิกเกิลและโมลิบดีนัม (Nickel-Molybdenum alloy)

โลหะโมลิบดีนัมส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กโดยใช้ในรูปของเฟอร์โรโมลิบดีนัม ซึ่งจะมีโมลิบดีนัมประมาณร้อยละ 50-60 โลหะโมลิบดีนัมบริสุทธิ์จะใช้ทำหลอดเอกซเรย์ (X-rays tube) และหลอดสำหรับยึดหัวหลอดไฟร่วมกับทั้งสแตน นอกจากนี้โมลิบดีนัมจะถูกใช้อย่างกว้างขวางในกลุ่มของโลหะผสมนอกกลุ่มเหล็กโดยอาศัยคุณสมบัติที่โมลิบดีนัมมีความต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงและมีคุณสมบัติต้านทานต่อการกัดกร่อน ส่วนใหญ่โมลิบดีนัมจะผสมกับโลหะนิกเกิล ซึ่งมีโมลิบดีนัมร้อยละ 15-30 ทำให้ได้โลหะผสมที่ทนต่อการกัดกร่อนของกรดเกลือได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้โลหะผสมนิกเกิลและโมลิบดีนัมแล้วยังมีโลหะผสมนิกเกิล โมลิบดีนัม โครเมียม และเหล็กที่มีชื่อทางการค้าว่า Hastelloy ดังรายละเอียดที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นโลหะผสมที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงและทนการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดี

2.8.3 โลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 (Hastelloy C276) [29-30]

โลหะผสมนิกเกิลที่ใช้ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้เป็นโลหะผสมนิกเกิล โครเมียม และโมลิบดีนัมที่มีชื่อทางการค้าว่า Hastelloy C276 ซึ่งเป็นโลหะผสมที่มีปริมาณคาร์บอนและซิลิคอนต่ำโดยจัดอยู่ในกลุ่มของโลหะผสม Hastelloy C ส่วนใหญ่มักจะนำมาใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 นี้มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีทั้งในสภาวะออกซิไดซ์ (Oxidizing) และสภาวะรีดิวซ์ (Reducing) รวมไปถึงสภาวะที่มีไอออนของธาตุเฮไลเจนเจือปนอยู่ และยังสามารถป้องกันการกัดกร่อนแบบหลุมและการกัดกร่อนแบบชอกได้ดีเมื่ออยู่ในสภาวะที่สัมผัสกับกรดเกลือคลอไรด์ ในกระบวนการทางเคมีโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 เป็นวัสดุที่มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเมื่อสัมผัสกับสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง เช่น กรดคลอไรด์ คลอรีน กรดฟอสฟอริก กรดแอซิติค และกรดแอซิติคแอนไฮไดรด์ นอกจากนี้โลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ยังมีความต้านทานการกัดกร่อนในสารละลายที่มีการกัดกร่อนสูง เช่น แก๊สคลอรีนเปียก ไฮโปคลอไรต์และสารละลายคลอรีน ความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ที่เห็นได้ชัดคือความต้านทานการกัดกร่อนต่อกรดฟอสฟอริกที่ทุกช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเดือดของกรดฟอสฟอริก เมื่อความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกต่ำกว่าร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก อัตราการกัดกร่อนจะน้อยกว่า 5 มิลลิเมตรต่อปีที่ความเข้มข้นของกรดฟอสฟอริกร้อยละ 65-85 โดยน้ำหนัก อัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 จะคล้ายคลึงกันยกเว้นที่อุณหภูมิระหว่าง 240 องศาฟาเรนไฮต์หรือ 116 องศาเซลเซียสถึงจุดเดือดของกรดฟอสฟอริกอัตราการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 อาจจะไม่คงที่และอาจจะสูงถึง 25 มิลลิเมตรต่อปี

2.9 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) [31-32]

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็นอัลลอยของเหล็ก (Iron base alloys) ที่มีคุณสมบัติต้านทานต่อการกัดกร่อนได้สูงกว่าเหล็กทั่วไปจึงทำให้ไม่เป็นสนิม สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากมายในชีวิตประจำวัน อาทิ วัสดุก่อสร้าง อุปกรณ์ทำครัว อุปกรณ์ทางการแพทย์ และเครื่องเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ เหล็กกล้าไร้สนิมทำมาจากเหล็ก (Fe) ซึ่งมีส่วนประกอบของธาตุอื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย ได้แก่ คาร์บอน(C) แมงกานีส (Mn) ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) เนื่องจากเหล็กสามารถถูกกัดกร่อนและเป็นสนิมได้ง่ายจึงนำเหล็กมาผ่านกระบวนการเติมโลหะบางชนิด เช่น โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) หรือวานาเดียม (V) ลงไปทำให้คุณสมบัติของเหล็กดีขึ้นและไม่เป็นสนิมง่าย โลหะที่มักเติมลงไปเป็นปริมาณมากเพื่อทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดีคือโครเมียม โดยเติมลงไปเป็นปริมาณร้อยละ 10 ถึง 30 เมื่อสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ โครเมียมในเหล็กกล้าไร้สนิมจะเกิดเป็นแผ่นฟิล์มที่บางมาก ในรูปของโครมิอออกไซด์ (Cr_2O_3) ซึ่งเราไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ถ้าแผ่นฟิล์มนี้ถูกขูดขีดหรือทำลายก็จะเกิดขึ้นบางๆ ของโครมิอออกไซด์ขึ้นมาใหม่อย่างรวดเร็ว ชั้นบางๆ ของฟิล์มนี้จะกันไม่ให้น้ำหรืออากาศซึมผ่านเข้าไปในเนื้อเหล็กซึ่งช่วยในการป้องกันเหล็กจากการเกิดสนิมได้ อย่างไรก็ตามเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถถูกกัดกร่อนได้เช่นกันโดยเฉพาะสถานะที่ไม่มีออกซิเจนทำให้ไม่สามารถสร้างแผ่นฟิล์มของโครมิอออกไซด์ที่ช่วยป้องกันการเกิดสนิมได้ ทำนองเดียวกันถ้าอยู่ในสถานะที่มีคลอไรด์ไอออนในปริมาณมากจะทำให้เกิดการกัดกร่อนเป็นแบบหลุม (Pitting corrosion) และจะขยายวงกว้างขึ้นไปเรื่อยๆ การเชื่อมหรือการผ่านกระบวนการให้ความร้อนซึ่งทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีความแข็งมากขึ้นสามารถทำให้ความต้านทานต่อการกัดกร่อนลดลง เนื่องจากโครเมียมในเหล็กจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนเกิดเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ (Cr_3C_2) แทนโครมิอออกไซด์ การยับยั้งการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์สามารถทำได้โดยการจุ่มในน้ำเย็นหลังจากให้ความร้อนทันที นอกจากนี้การใช้วิธีเติมโลหะบางชนิด เช่น แลนทานัม (La) ไททาเนียม (Ti) และนีโอเบียม (Nb) ลงไปในเนื้อเหล็กจะทำให้คาร์บอนทำปฏิกิริยากับโลหะเหล่านี้แทนการทำปฏิกิริยากับโครเมียมซึ่งเป็นวิธียับยั้งการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ได้เช่นกัน

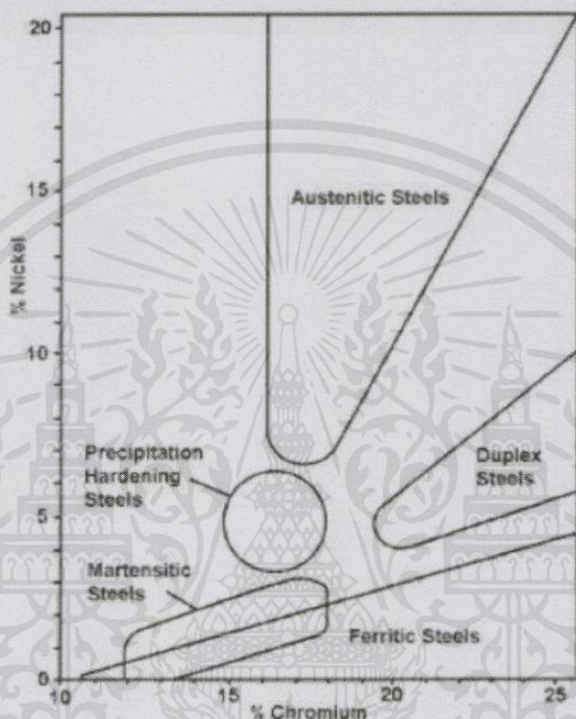
การที่เหล็กกล้าไร้สนิมมีคุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านแรงดึง ความแรงคราก การยืด ความแข็ง และความเหนียวที่แตกต่างกันเนื่องจากมีลักษณะของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ส่วนสำคัญที่ทำให้มีลักษณะโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันคือ ลักษณะของแลตทิซเฟสทรานซิชัน (Phase transition) และองค์ประกอบทางเคมีในขบวนการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมจะต้องควบคุมการเติมธาตุต่างๆ และการให้ความร้อน (Heat treatment) เป็นอย่างดีเพื่อควบคุมให้เหล็กกล้าไร้สนิมที่ผลิตออกมามีโครงสร้างผลึกและเฟสทรานซิชันตามที่ต้องการเหล็กและอัลลอยของเหล็กมีแลตทิซหลายรูปแบบที่รู้จักกันทั่วไปเป็นแบบบอดีเซ็นเตอร์คิวบิก (Body center cubic) หรือเรียกว่าบีซีซี (BCC) และเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก (Faced center cubic) หรือเรียกว่า เอฟซีซี (FCC) สำหรับเหล็กที่บริสุทธิ์แลตทิซแบบเอฟซีซีจะอยู่ที่อุณหภูมิ 910-1400 องศาเซลเซียส ส่วนแลตทิซแบบบีซีซีจะอยู่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 910 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิสูงกว่า 1400 องศาเซลเซียสจนถึงจุดหลอมเหลวที่ 1539 องศาเซลเซียส โลหะที่สำคัญที่ใช้ในการควบคุมให้ได้เฟสทรานซิชันตามต้องการคือโครเมียม และนิกเกิล โดยที่โครเมียมเป็นธาตุที่ทำให้ได้โครงสร้างผลึกแบบเฟอร์ไรต์ และนิกเกิลเป็นธาตุที่ทำให้ได้โครงสร้างผลึกแบบออสติไนต์

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อเผยแพร่ความรู้แก่สาธารณชนโดยไม่หวังผลตอบแทน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.1 ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม (Types of Stainless steel)

โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่มหลักๆ โดย 4 กลุ่มแรกจะแบ่งตามลักษณะเฉพาะของโครงสร้างจุลภาคหรือโครงสร้างผลึกของโลหะผสม ได้แก่ กลุ่มเฟอร์ริติก (Ferritic) กลุ่มมาร์เทนซิติก (Martensitic) กลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic) และกลุ่มดูเพล็กซ์ (Duplex) ส่วนกลุ่มสุดท้ายเป็นโลหะผสมที่เพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอน (Precipitation Hardening) ด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment)



รูปที่ 2.28 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของธาตุนิเกิล และโครเมียมที่ผสมอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มต่างๆ

1) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติก (Austenitic stainless steel) เป็นประเภทที่นิยมใช้กันมากถึงร้อยละ 70 ของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผลิตออกมาขายในท้องตลาด เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้มีปริมาณคาร์บอนไม่เกินร้อยละ 0.15 และมีโครเมียมไม่น้อยกว่าร้อยละ 16 นอกจากนี้ยังมีการเติมนิเกิลหรือโมลิบดีนัม (Mo) เพื่อให้สามารถคงรูปผลึกแบบออสเทนนิติกและทนต่อการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงซึ่งทำให้สามารถใช้เป็นส่วนประกอบของเตาหลอมได้โดยนิเกิลจะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน และทำให้โครงสร้างจุลภาคเป็นออสเทนไนต์ เหล็กกลุ่มออสเทนนิติกนี้จะทนทานต่อการกัดกร่อนดีกว่าเหล็กกลุ่มเฟอร์ริติก ในด้านคุณสมบัติเชิงกลมีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดคราก (Yield strength) ใกล้เคียงกับของเหล็กกลุ่มเฟอร์ริติกแต่จะมีค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และค่าความยืด (Elongation) สูงกว่าจึงสามารถขึ้นรูปได้ดีมาก มีคุณสมบัติที่แม่เหล็กไม่ดูดติดในสภาพผ่านการอบอ่อน ตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้คือ เหล็กกล้าไร้สนิมซีรีส์ 300 ซึ่งนิยมใช้ในการทำบ้านพักประตู่ อ่างล้างมือ เข็มฉีดยา ฯลฯ ตัวอย่างเช่นเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304, 316, 317, 321, 347 ในบางครั้งจะมีตัวอักษร H อยู่ด้านหลังซึ่งเรียกกันว่าเกรดเอช (H-

Grade) ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 304H แสดงว่าเป็นชนิดที่มีปริมาณคาร์บอนสูง ถ้ามีตัวอักษร L อยู่ด้านหลังเรียกว่าเกรดเอล (L Grades) ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 304L แสดงว่าเป็นชนิดที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำ ถ้ามีตัวอักษร M ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 317LM แสดงว่ามีโมลิบดีนัมเป็นองค์ประกอบ และถ้ามีอักษร M และ N อยู่ด้วยตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าไร้สนิม เบอร์ 317LMN แสดงว่ามีทั้งโมลิบดีนัมและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ

2) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทมาร์เทนซิติก (Martensitic stainless steel) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 0.1-1 โครเมียมร้อยละ 12-14 และโมลิบดีนัมร้อยละ 0.2-1 แต่ไม่มีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบ จะทนการกัดกร่อนได้น้อยกว่าประเภทออสเทนนิติกแต่มีความแข็งแรงมากกว่าเนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนมากกว่า สามารถชุบแข็งได้ มีค่าความต้านทานแรงดึงที่จุดครากและความต้านทานแรงดึงสูงมาก แต่จะมีค่าความยืดต่ำ จึงเหมาะที่จะใช้ในการทำมีดหรืออุปกรณ์สำหรับการตัด ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าไร้สนิม เบอร์ 414, 416, 420, 431, 440

3) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทเฟอร์ริติก (Ferritic stainless steel) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครเมียมร้อยละ 10.5-27 มีนิกเกิลน้อยมากซึ่งติดมากับวัตถุดิบ มีโครงสร้างจุลภาคเป็นเฟอร์ไรต์ และมีคุณสมบัติแม่เหล็กสามารถดูดติดได้ มีค่าความต้านทานแรงดึงจุดครากและค่าความต้านทานแรงดึงปานกลาง มีค่าความยืดสูง มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูงกว่าประเภทมาร์เทนซิติกมีราคาถูกกว่าประเภทออสเทนนิติก แต่อาจพบปัญหาเรื่องเกรนหยาบ (Grain coarsening) และสูญเสียความแข็งแรงหลังการเชื่อม นิยมใช้ทำเครื่องประดับ อ่างล้างมือ อุปกรณ์สำหรับรถยนต์ โดยเฉพาะทำท่อไอเสียรถยนต์ ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าไร้สนิม เบอร์ 403, 405, 409, 434, 436, 442, 446

4) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทพรีซิพิเตตฮาร์ดเดน (Precipitate harden stainless steel) เป็นการนำ เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทออสเทนนิติก หรือมาร์เทนซิติกไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนและทำให้เย็นแล้วทิ้งให้ตกตะกอนจะทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมที่ได้มีคุณสมบัติเหนียว แข็ง ทนการกัดกร่อนสูง จึงนิยมนำไปใช้ทำสปริง ตัวอย่างเช่นเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 17-7PH ซึ่งประกอบด้วยโครเมียมร้อยละ 17 และนิกเกิลร้อยละ 7

5) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทดูเพล็กซ์ (Duplex stainless steel) มีโครเมียมผสมประมาณร้อยละ 21-28 และนิกเกิลประมาณร้อยละ 3-7.5 เป็นประเภทเหล็กที่มีโครงสร้างผลึกผสมระหว่างเฟอร์ริติกและออสเทนนิติกในอัตราส่วนที่เท่ากันทำให้ได้เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีคุณสมบัติพิเศษคือมีความแข็งแรงต่อแรงดึงที่สูงกว่า และต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดีกว่าประเภทออสเทนนิติก จึงนิยมนำไปใช้ทำอุปกรณ์ที่ทนต่อความดัน รวมทั้งท่อ และถังสำหรับย่อยเยื่อกระดาษ ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 2205

2.9.2 การเลือกใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิม (Applications of stainless steel)

คุณสมบัติด้านความต้านทานต่อการกัดกร่อน ความสามารถในการขึ้นรูป ความสามารถในการเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมอาจแบ่งเป็นระดับต่างๆ ได้ดังนี้

ความต้านทานต่อการกัดกร่อน

ปานกลาง	เช่น ใช้สัมผัสกับน้ำสะอาด บรรยากาศตามชนบท
ดี	เช่น น้ำตามอุตสาหกรรม บรรยากาศตามเมือง
ดีมาก	น้ำทะเล บรรยากาศตามทะเล กรดสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานาน ในอนาคตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิใช่อ้างอิงเนื้อหาข้อมูลนี้ในเอกสารหรือสิ่งพิมพ์ใดๆที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการขึ้นรูป

ปานกลาง	ใช้กับงานทั่วไป
ดี	ยืดตัวได้สูง
ดีมาก	งานขึ้นรูปลึก (Deep drawing)

ความสามารถในการเชื่อม

ปานกลาง	งานที่ไม่ต้องเชื่อม
ดี	เชื่อมได้ในงานที่ไม่มีกรัดกร่อนแบบขอบเกรน
ดีมาก	เชื่อมได้ในงานที่มีการกรัดกร่อนแบบขอบเกรน

ตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติด้านความต้านทานต่อการกัดกร่อน ความสามารถในการขึ้นรูป ความสามารถในการเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมโดยแบ่งเป็นระดับต่างๆ [31-32]

กลุ่ม	เกรด	ด้านการกัดกร่อน	ขึ้นรูป	เชื่อม	คุณสมบัติ	การใช้งาน
เฟอร์ริติก	430	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง	ผสมโครเมียมประมาณร้อยละ 17 มีนิกเกิลต่ำมาก ใช้ในงานแพร่หลาย แต่มีแนวโน้มที่จะเปราะเมื่อต้องเชื่อมแบบที่มีการหลอมละลาย	งานทางสถาปัตยกรรมภายในงานตกแต่ง เครื่องใช้ภายในบ้าน เครื่องซักผ้า เครื่องครัว
เฟอร์ริติก	430Ti	กลาง	ดี	ดีมาก	คือเกรด 430 ที่ผสมไทเทเนียม	เครื่องใช้ภายในบ้าน อ่างล้างจาน ท่อ
เฟอร์ริติก	409	ปานกลาง	ดี	ดี	เป็นเหล็กกล้าโครเมียมร้อยละ 12 ที่ผสมไทเทเนียม ทนความร้อนและการเกิดออกซิเดชัน	ระบบท่อไอเสียรถยนต์
เฟอร์ริติก	444	ดี	ดี	ดีมาก	เป็นเกรดที่มีคาร์บอนต่ำผสมโมลิบดีนัมและไทเทเนียมทำให้ต้านทานต่อน้ำที่มีคลอไรด์ เป็นองค์ประกอบ มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบ Chloride stress corrosion แบบรู ซอก และขอบเกรน	ถังคั้นน้ำร้อน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
ออสเทนนิติก	304	ดี	ดีมาก	ดี	เป็นเกรดที่นิยมใช้กันมากที่สุด มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดี สามารถขึ้นรูปเย็นและเชื่อมได้ดี	เครื่องใช้ในบ้าน ภาชนะ เครื่องครัว เครื่องหุงต้มความดัน อุตสาหกรรมอาหาร
ออสเทนนิติก	304L	ดี	ดีมาก	ดีมาก	เป็นเกรด 304 ที่ผสมคาร์บอนต่ำ ใช้เมื่อต้องการความต้านทานการกัดกร่อนตามขอบเกรน โดยเฉพาะโครงสร้างหน้าที่ต้องผ่านการเชื่อม	อุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรมเคมีและอุตสาหกรรมอาหารที่ต้องการใช้งานเหล็กที่หนาโดยไม่ต้องทำ Sensitization หม้อไอน้ำ อุตสาหกรรมนิวเคลียร์

ตารางที่ 2.5 (ต่อ) แสดงคุณสมบัติด้านความต้านทานต่อการกัดกร่อน ความสามารถในการขึ้นรูป
ความสามารถในการเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมโดยแบ่งเป็นระดับต่างๆ [31-32]

ออสเตน นิติก	302	ดี	ดีมาก	ดี	ผสมนิกเกิลน้อยกว่าเกรด 304	สปริง
ออสเตน นิติก	301	ดี	ดีมาก	ดี	ผสมโครเมียมและนิกเกิลต่ำ เพื่อเพิ่ม Work hardening มี ความแข็งแรงสูงเมื่อผ่านการ รีดเย็น มีความต้านทานต่อ การสึกหรอสูง	งานชิ้นส่วนรถบรรทุก รถไฟ สปริง สายพานลำเลียง
ออสเตน นิติก	303	ดี	ดีมาก	ดี	เติมซัลเฟอร์เพื่อเพิ่มความ สามารถในการกลึงไส แต่ ความต้านทานต่อการกัด กร่อนน้อยกว่า 302	งานที่ต้องทำการกลึงไส
ออสเตน นิติก	310	ดี	ดีมาก	ดี	ผสมโครเมียม (~25%) และ นิกเกิล (~20%) สูง สามารถ ทนการเกิดออกซิไดซ์ได้ที่ อุณหภูมิสูง	ส่วนประกอบของเตาและ อุปกรณ์ที่ทนต่ออุณหภูมิ 900-1100 °C
ออสเตน นิติก	310S	ดี	ดีมาก	ดี	ส่วนผสมเดียวกับเกรด 310 แต่มีคาร์บอนต่ำกว่า	ใช้ในงานที่ต้องการต้านทาน การกัดกร่อนต่อกรดไนตริก
ออสเตน นิติก	316	ดีมาก	ดี	ดี	ผสมโมลิบดีนัมเพื่อเพิ่มความ ต้านทานต่อการกัดกร่อน	อุปกรณ์ที่ใช้งานทาง ทะเล สามารถเชื่อมที่ความ หนาไม่เกิน 3 มม. โดยไม่ ต้องทำการปรับปรุงโดยความ ร้อนหลังการเชื่อม
ออสเตน นิติก	316L	ดีมาก	ดี	ดีมาก	ส่วนผสมเดียวกับเกรด 316 แต่มีคาร์บอนผสมอยู่ต่ำกว่า	ใช้ในงานที่ต้องเชื่อมเหล็ก หนาโดยไม่ให้เกิดการกัด กร่อนแบบขอบเกรน ทำท่อ หม้อไอน้ำ แท็งค์ขนส่ง
ออสเตน นิติก	316Ti	ดีมาก	ดี	ดีมาก	ส่วนผสมเดียวกับเกรด 316 แต่มีไทเทเนียมผสมเพิ่ม	ใช้กับงานที่ต้องการความ ต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบ ขอบเกรน และต้องการความ แข็งแรงที่อุณหภูมิสูง
ออสเตน นิติก	317	ดีมาก	ดี	ดี	ผสมโครเมียมประมาณร้อยละ 19 นิกเกิลประมาณร้อยละ 13 โมลิบดีนัมประมาณ ร้อยละ 3-4	ใช้ทำอุปกรณ์ตามโรงงานทาง เคมีที่ต้องการความต้านทาน การกัดกร่อนสูงกว่า 316 โดย เฉพาะที่ต้องสัมผัสกับน้ำ ทะเล และเกลือฮาโลเจน
ออสเตน นิติก	321	ดี	ดีมาก	ดีมาก	ผสมโครเมียมประมาณร้อยละ 18 นิกเกิลประมาณร้อยละ 10 ไทเทเนียมประมาณ ร้อยละ 0.5	ทำท่อ แท็งค์ ชิ้นส่วน เครื่องบินไอพ่น งานเชื่อมใน อุตสาหกรรมเคมี เหมาะกับ งานที่ใช้ที่อุณหภูมิสูง ไปใช้ ถึง 800°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

ตารางที่ 2.5 (ต่อ) แสดงคุณสมบัติด้านความต้านทานต่อการกัดกร่อน ความสามารถในการขึ้นรูป
ความสามารถในการเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมโดยแบ่งเป็นระดับต่างๆ [31-32]

ออสเตน นิติก	347	ดี	ดีมาก	ดีมาก	เติมไนโอเบียมและเทนทาลัม	ท่อ
มาร์เทนซิ ติก	420	ปาน กลาง	ปาน กลาง	ปาน กลาง	ชุบแข็งโครเมียมร้อยละ 13	เครื่องมือตัดชิ้นส่วน มีด ข้อน ส้อม บีมและวาล์ว
มาร์เทน ซิติกและ ตะกอน	PH 17-4				Age-hardening by copper	งานด้านอากาศยาน และนิว- เคลียร์แม่พิมพ์สำหรับพลาสติก วาล์ว และข้อต่อ

2.9.3 ผลของธาตุผสม (The effect of mixed elements)

1) คาร์บอน (C) เป็นธาตุที่มีอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมโดยทั่วไปจะไม่เกินร้อยละ 0.15 ยกเว้นเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มมาร์เทนซิติก เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีคาร์บอนต่ำจะเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรน เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็น ตลอดจนเพิ่มความสามารถในการเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมคาร์บอนอยู่ 2 ช่วง คือร้อยละ 0.02 (≤ 0.03) และร้อยละ 0.07 (0.04-0.15) นอกจากนี้ การผสมไทเทเนียมหรือไนโอเบียมไปในเหล็กกล้าไร้สนิมจะช่วยให้จับตัวกับคาร์บอนและให้ผลดีต่อคุณสมบัติทั้งสามข้อที่กล่าวมาเหมือนเหล็กกล้าไร้สนิมคาร์บอนร้อยละ 0.02 เหล็กกล้าไร้สนิมที่ในเกรดมีอักษร L กำกับจะควบคุมคาร์บอนไม่เกินร้อยละ 0.03 ทำให้สามารถเชื่อมได้ดี มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) และความสามารถในการขึ้นรูปเย็นสูงกว่าเกรดที่มีคาร์บอนสูงกว่า

2) โครเมียม (Cr) ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาพบรรยากาศทั่วไป โดยผสมอยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างน้อยร้อยละ 10.5 แต่เพื่อให้มั่นใจว่าเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมมีการกระจายของโครเมียมอย่างน้อยร้อยละ 10.5 อย่างสม่ำเสมอ จึงมักผสมโครเมียมมากกว่าเล็กน้อย เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมโครเมียมอยู่ 2 ช่วง คือร้อยละ 12 (10.5-14.0) และร้อยละ 17 (16.0-24.0) ถ้าผสมโครเมียมเกินกว่าร้อยละ 30 จะทำให้เหล็กเปราะ

3) นิกเกิล (Ni) ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบมุ่มอับในสารละลายกรด เพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็น ตลอดจนเพิ่มความสามารถในการเชื่อม เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมนิกเกิลอยู่ 2 ช่วง คือร้อยละ 0 (ปริมาณเล็กน้อยติดมากับเหล็ก) และร้อยละ 9 (6.0-15.0)

4) โมลิบดีนัม (Mo) ช่วยเสริมผลความต้านทานต่อการกัดกร่อนของโครเมียม โดยเฉพาะการกัดกร่อนแบบมุ่มอับ และช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในสภาพคลอไรด์ด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมโมลิบดีนัมอยู่ 2 ช่วง คือร้อยละ 0 (ปริมาณเล็กน้อยติดมากับเหล็ก) และร้อยละ 2 (1.0-3.0)

5) ไทเทเนียม (Ti) หรือไนโอเบียม (Nb) ช่วยปรับปรุงความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบขอบเกรน (Intergranular corrosion) โดยสารทั้งสองตัวจะช่วยป้องกันการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ นอกจากนี้ ไทเทเนียมหรือไนโอเบียมยังเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็นและความสามารถในการเชื่อมด้วย

ก็สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.4 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 (304 Stainless steel) [33]

เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ประกอบด้วยสารประกอบ โครเมียม นิกเกิล และคาร์บอนต่ำ ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติกมีประโยชน์หลายอย่างและใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม โดยเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ประกอบด้วยโครเมียมร้อยละ 18 นิกเกิลร้อยละ 8 โดยการใช้งานของเหล็กกล้าไร้สนิมกลุ่มนี้มีความหลากหลาย และมีสมบัติที่คล้ายคลึงกัน ในด้านต้านทานออกซิไดซ์ ด้านการกัดกร่อน และความแข็งแรง ทนทาน ซึ่งทั้งหมดนี้ยังสะดวกในการผลิต และทำความสะอาด เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 นี้ยังพบได้ว่ามีความหลากหลายทางด้านกายภาพ ทำให้เหล็กชนิดนี้เป็นวัสดุที่ดีและเหมาะสมในงานขึ้นรูปสำเร็จรูป ล้อแม็ก อุปกรณ์เครื่องใช้ในครัว แหวนรัดสาย แก๊ส สปริง ตัวรถแทรกซ์ ข้อต่อ ถังบรรจุ ท่อความดัน และท่อขนส่ง

การต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 โครเมียมร้อยละ 18 และ นิกเกิลร้อยละ 8 ส่งผลให้มีความต้านทานที่ดีในเหล็กกล้าชนิดนี้ ในสภาวะที่เป็นกรด หรือด่าง เหล็กประเภท 304 ได้มีการพิจารณาในส่วนการใช้งาน ที่ไม่ค่อยทนการใช้งานในกรณีการเชื่อม ดังนั้นคาร์บอนต่ำ (304 แอล) จึงเป็นโลหะผสมที่ถูกแนะนำ เพราะเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนตามขอบเกรนด้วย

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Dey และ Ismail [34] เนื่องจากกรดไนตริกมีบทบาทสำคัญในปฏิกิริยาการเกิดไนโตรเจนของโมเลกุลสารอินทรีย์ และสารลดแรงตึงผิวมีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นคณะผู้ทำการวิจัยจึงได้ทำการศึกษารวมตัวกันเกิดเป็นไมเซลล์ของโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตในสารละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้วิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้าในการวิเคราะห์ลักษณะการเกิดไมเซลล์ และใช้วิธีการวัดแรงตึงผิว และวิธี Steady-state fluorescence ในการหาค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองของงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า ถ้าโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตละลายในสารละลายกรดไนตริก โดยที่ความเข้มข้นของกรดไนตริกมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.02 โมลาร์ จะทำให้สามารถนำสารละลายนี้ไปใช้ในปฏิกิริยาการเกิดไนโตรเจนของโมเลกุลสารอินทรีย์ได้

Ningshen และคณะ [35] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ในสารละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.01 1 และ 5 โมลาร์ ในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริก คณะผู้ทำงานวิจัยได้ทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเริ่มจากอุณหภูมิห้อง 50 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งวัตถุประสงค์หลักในงานวิจัยนี้คือ เพื่อประเมินค่าความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L ซึ่งใช้เป็นส่วนประกอบของถังบรรจุกากกัมมันตภาพรังสีโดยใช้เทคนิค Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) และเทคนิค Laser Raman spectroscopy (LRS) ในการวิเคราะห์ผล จากการวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิค LSR พบว่า เกิดไอออนที่ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ได้แก่ ไนเตรตไอออน (NO_3^-) โครเมตไอออน (CrO_4^-) และไดโครเมตไอออน ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) ซึ่งไอออนเหล่านี้จะช่วยเร่งกระบวนการกัดกร่อน ส่วนเทคนิค EIS ใช้ในการวิเคราะห์ความเสถียรของชั้นฟิล์ม โดยพบว่าค่าความต้านทานโพลาไรเซชันของชั้นฟิล์มต่ำ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริก และอุณหภูมิ จากการวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการเกิดไอออนที่เป็นตัวออกซิไดซ์จะส่งผลให้เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304L เกิดการกัดกร่อนง่ายขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริกและอุณหภูมิ

Zhao และ Mu [36] 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 เมื่อใดที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเข้าใกล้ค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์จะพบว่า สารลดแรงตึงผิวสามารถดูดซับบนพื้นผิวอลูมิเนียมได้ดี น้ำหนักของอลูมิเนียมหายไปน้อย และมีคุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดี ซึ่งจากผลการทดลองของงานวิจัยนี้ จะได้กราฟน้ำหนักที่หายไปเพื่อใช้ในการคำนวณค่าต่างๆ และจากกราฟที่ได้สามารถบอกได้ว่า การยับยั้งการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นจนถึงค่าความเข้มข้นหนึ่ง หลังจากนั้นกราฟจะคงที่ เนื่องจากค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเข้าถึงค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์เมื่อถึงค่าความเข้มข้นนี้การดูดซับ และการปกคลุมของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวอลูมิเนียมจะไม่มี การเปลี่ยนแปลง

Zhang และคณะ [37] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะผสมนิกเกิลเฮสเทลลอส ซี 276 ในสภาวะน้ำยั้งยวดที่อุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียสและความดันบรรยากาศ 25 เมกะปาสคาล โดยทำการวิเคราะห์จากการวัดน้ำหนัก ศึกษาขนาดและรูปร่างของออกไซด์รวมถึงองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy, SEM) และการวิเคราะห์ธาตุด้วยเอกซเรย์ (Energy dispersive X-ray, EDX) ศึกษาเฟสของออกไซด์ด้วยเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction, XRD) ศึกษาสภาวะพื้นผิวของธาตุที่เป็นฟังก์ชันกับความลึกของผลึกออกไซด์ด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) โดยจากผลการทดลองพบว่า ที่ชั้นบนสุดเกิดชั้นนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ชั้นถัดมาคือชั้นนิกเกิลโครเมียมออกไซด์ (NiCr₂O₄) และพบชั้นโครเมียมออกไซด์ (Cr₂O₃) ด้านในสุดซึ่งติดกับพื้นผิวโลหะผสมนิกเกิลเฮสเทลลอส ซี 276 หลังจากทำการทดลองผ่านไป 1000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิสูงขึ้น พบว่าชั้นออกไซด์มีความหนาเพิ่มมากขึ้น น้ำหนักเพิ่มมากขึ้น แต่มีแนวโน้มการแตกเป็นเสี่ยงมากขึ้นเช่นกัน

Wei และคณะ [38] ได้ทำการศึกษาสารลดแรงตึงผิวที่มีความสามารถในการเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนแบบหุ้มของวัสดุจำพวกเหล็กกล้าไร้สนิมและโลหะผสมอลูมิเนียม โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาสารลดแรงตึงผิว 3 ชนิดที่มีประจุแตกต่างกัน ได้แก่ สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS, สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก Dodecyltrimethylammonium chloride (DTAC) และสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ Triton-X-100 (Triton) ในการเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนแบบหุ้มของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ จากผลการทดลองพบว่า SDS จะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบหุ้มของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในขณะที่ DTAC และ Triton ไม่ช่วยยับยั้งการกัดกร่อนแบบหุ้มเท่าที่ควร จึงสามารถสรุปได้ว่า สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบสามารถยับยั้งการกัดกร่อนได้ดีกว่า คณะผู้ทำงานวิจัยใช้เทคนิคการทดสอบการดูดซับแบบซ้ำ (Batch adsorption technique) ในการวิเคราะห์กลไกการยับยั้งการกัดกร่อน และการดูดซับของอนุภาคของสารลดแรงตึงผิวบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304

Ma และคณะ [39] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะทองแดงในสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.5 โมลาร์ โดยใช้สารลดแรงตึงผิว 4 ตัวเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน ได้แก่ Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB), Sodium dodecyl sulfate (SDS), Sodium oleate และ Polyoxyethylene sorbitan monooleate (TWEEN-80) ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า Impedance spectroscopy สารลดแรงตึงผิวเหล่านี้แสดงพฤติกรรมเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนประเภทผสมและช่วยทำให้เกิดการกัดกร่อนน้อยลงโดยสารลดแรงตึงผิวเหล่านี้จะไปดูดซับบนพื้นผิวของโลหะทองแดง จากผลการทดลอง CTAB มีความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อนได้ดีที่สุด โดยพิจารณาการดูดซับของ CTAB บนพื้นผิวของโลหะทองแดงซึ่งมีประจุเป็นบวกเมื่ออยู่ในสารละลายกรดซัลฟูริกที่ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนซึ่งไม่ชอบดูดซับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก จากโครงสร้างโมเลกุลของ CTAB ประกอบไปด้วยประจุลบของโบรมไนด์ไอออนและประจุบวกของแอมโมเนียมไอออนนั้นแสดงให้เห็นว่า $C_{16}H_{33}N(CH_3)_4^+$ อาจจะไปดูดซับบนพื้นผิวของโลหะทองแดงที่ถูกปกคลุมไปด้วยโบรมไนด์ไอออนอยู่ก่อนแล้ว ทางคณะผู้ทำงานวิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ในการจำลองรูปแบบการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ตัวบนพื้นผิวของโลหะทองแดงเมื่ออยู่ในสารละลายกรด

Javadiana และคณะ [40] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก CTAB และสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ SDS เป็นสารยับยั้งในการกัดกร่อน วิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพรไฟล์เซชัน เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า Electrochemical impedance spectroscopy, EIS) และ SEM ผลการทดลองพบว่า เมื่อนำสารลดแรงตึงผิวทั้งสองชนิดมาผสมกันจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนดีกว่าใช้ CTAB หรือ SDS เพียงชนิดใดชนิดหนึ่ง เนื่องจากมีการดูดซับที่แข็งแรงบนพื้นผิวของโลหะและทำให้เกิดการสร้างชั้นป้องกันขึ้น ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพรไฟล์เซชันสามารถบ่งบอกได้ว่า สารยับยั้งการกัดกร่อนที่คณะผู้ทำการวิจัยศึกษาเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนแบบผสม สำหรับการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวทั้งสองชนิดนี้สามารถอธิบายได้จากไอโซเทอมการดูดซับของฟลอรีและฮักกินส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1) สารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 68 โดยน้ำหนัก (HNO_3 68%) จากบริษัท Carlo Erba Reagents.

2) สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก (HCl 37%) จากบริษัท RCI Labscan Limited.

3) น้ำปราศจากไอออน

4) เอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก (Ethanol 95%) จากบริษัท Carlo Erba Reagents

5) โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate, SDS) จากบริษัท Lobachemie

3.2 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1) โลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276

2) เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304

3) บริภัณฑ์เครื่องแก้ว

4) เครื่องเป่าลมร้อน

5) เครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท (Potentiostat/Gulvanostat) รุ่น Autolab PGSTAT302N

6) อ่างล้างความถี่สูง (Ultrasonic cleaner) รุ่น E30H

7) กระจาดทราย หมายเลข 280 600 1200 และ 2000

8) ถังมือยาง

9) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดคาโลเมลล์อิ่มตัว

10) ขั้วแพลทินัม

11) คีมหนีบ

12) เครื่องพ่นไนโตรเจน

13) เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น ED224S

14) เครื่องวัดมุมสัมผัส (Contact Angle Goniometer) รุ่น GYSP-360

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมชิ้นงาน

1) ตัดโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 เซนติเมตร และหน้า 0.3 เซนติเมตร

2) ขัดผิวชิ้นงานด้วยกระจาดทรายขัดโลหะหมายเลข 280 เพื่อกำจัดออกไซด์และสารปนเปื้อนที่บริเวณผิวหน้าออก ตามด้วยกระจาดทรายขัดโลหะหมายเลข 600 และ 1200 เพื่อให้

ผิวหน้าของชิ้นงานมีความเรียบ และขัดละเอียดสุดท้ายด้วยกระดาษทรายขัดโลหะหมายเลข 2000 โดยใช้น้ำร่วมในการขัดเพื่อลดความร้อนและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการขัด

- 3) ล้างชิ้นงานด้วยน้ำปราศจากไอออนให้สะอาด
- 4) นำชิ้นงานไปแช่ในเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 เพื่อไล่สิ่งสกปรกในอ่างล้างความถี่สูง (Ultrasonic cleaner) 44 kHz เป็นเวลา 2 นาที
- 5) นำชิ้นงานที่สะอาดแล้วจากข้อ 4 มาเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที

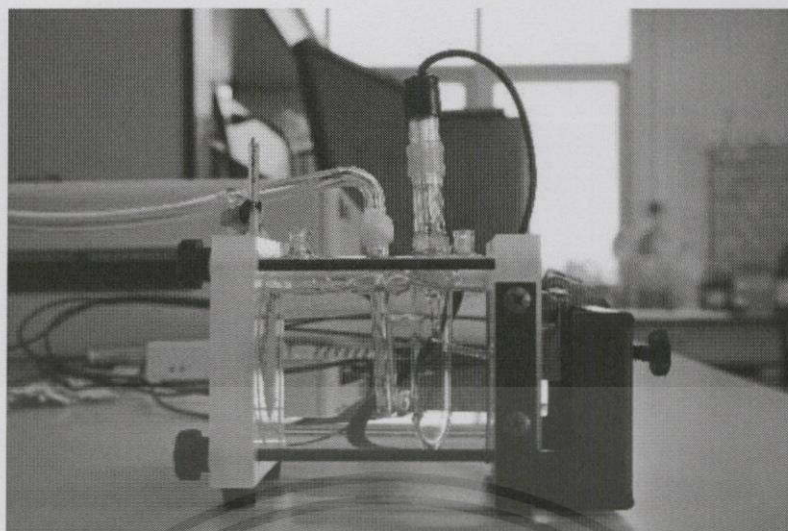
3.3.2 การเตรียมสารละลาย

- 1) ปิเปตกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 68 มา 0.7 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร
- 2) ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจะได้สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร
- 3) นำสารละลายที่ได้ไปผ่านแก๊สไนโตรเจน เป็นเวลา 30 นาที
- 4) ทำซ้ำข้อ 1-3 โดยเปลี่ยนเป็นกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 37 ปริมาตร 0.83 มิลลิลิตร จะได้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

3.3.3 การวัดทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน

- 1) ล้างชุดทดสอบการกัดกร่อนด้วยน้ำปราศจากไอออน ทิ้งไว้ให้แห้ง
- 2) เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตทเลือกโปรแกรมควบคุม กรอกข้อมูลพื้นที่ผิวของชิ้นงานตัวอย่าง เลือกสภาวะทดสอบ ใช้อัตราเร็วในการปรับค่าศักย์ไฟฟ้า 0.0055 V/s ปรับค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงตั้งแต่ -500 ถึง 2000 mV เทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit potential, OCP)
- 3) ต่อขั้วไฟฟ้าจากเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตทกับชุดทดสอบการกัดกร่อน โดยต่อขั้วอ้างอิงเป็นขั้วไฟฟ้าชนิดคาโลเมลลิมิตซ์ ขั้วตรงข้ามเป็นแผ่นแพลทินัม ขั้วทำงานเป็นโลหะที่จะใช้ทดสอบและเติมสารละลายที่เตรียมไว้ลงในเซลล์ทดสอบการกัดกร่อนพร้อมทั้งพ่นแก๊สไนโตรเจนตลอดการทดลอง ดังรูปที่ 3.1
- 4) เริ่มปรับค่าศักย์ไฟฟ้า และวัดค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อวัดเสร็จจึงทำการบันทึกข้อมูล
- 5) หาค่า i_{corr} และ E_{corr} โดยการประมาณการนอกช่วงตามแบบทาเฟิล (Tafel extrapolation)
- 6) ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนเป็นสารละลายกรดไนตริกและไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ที่มีปริมาณของโซเดียมโอดีเดซิลซัลเฟตเท่ากับ 0.1092 กรัม 0.4371 กรัม และ 0.8742 กรัม ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์ของเซลล์ทดสอบการกักความร้อนสำหรับเครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท

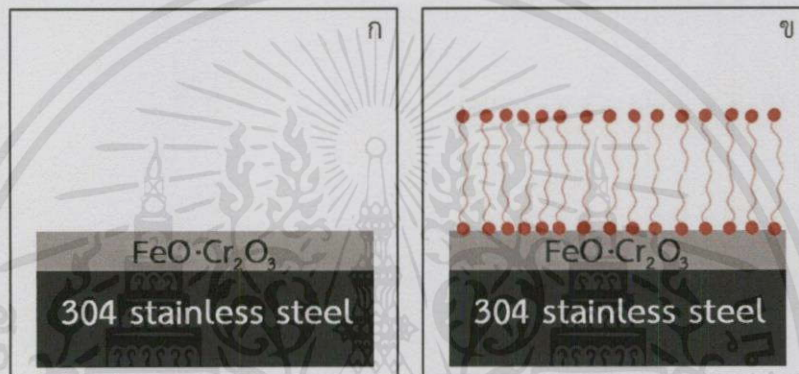


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

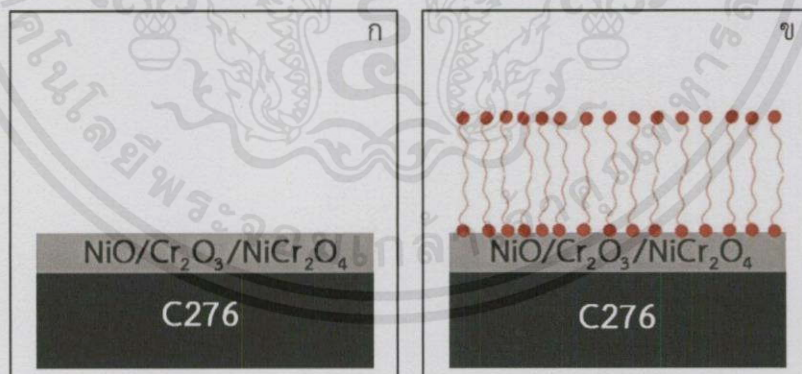
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาผลการยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะ 2 ชนิด คือโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 และเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 โดยใช้โซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตเป็นสารยับยั้งในสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ และสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นเดียวกัน ซึ่งวัดค่าพีเอชของสารละลายกรดทั้งสองชนิดได้เท่ากับ 1.92 ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่มีผลต่อการยับยั้งการกัดกร่อน และทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกโพลาริเซชันที่อัตราเร็วในการตรวจวัดเท่ากับ 0.0055 โวลต์ต่อวินาที



รูปที่ 4.1 กลไกการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 โดยโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟต (ก) ชั้นป้องกันที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (ข) เกิดชั้นของโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟต

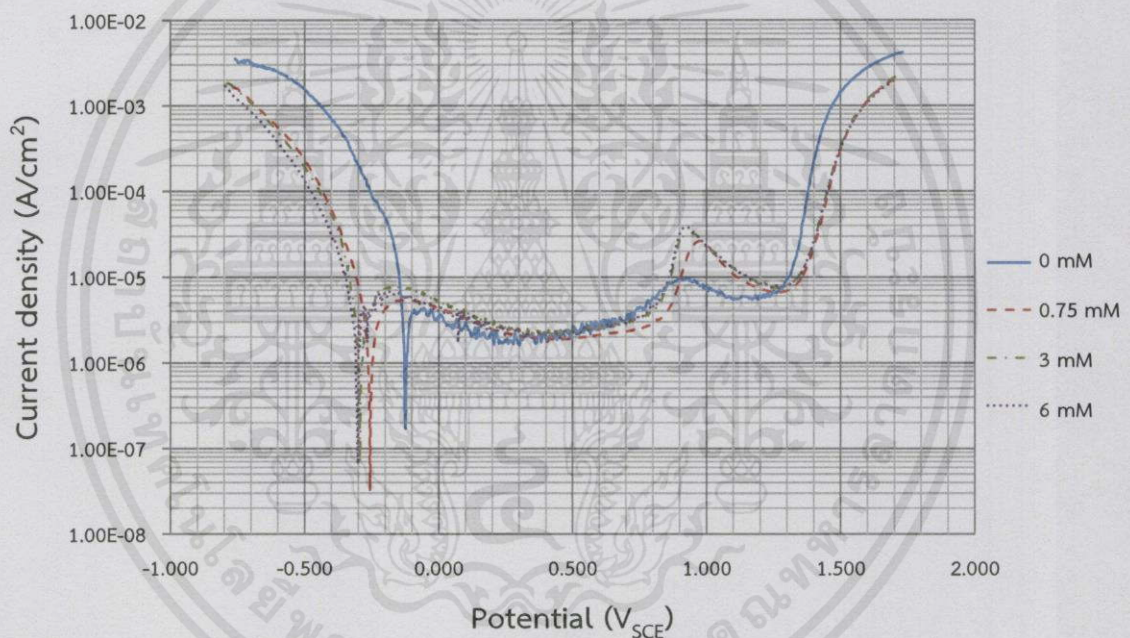


รูปที่ 4.2 กลไกการเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 โดยโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟต (ก) ชั้นป้องกันที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (ข) เกิดชั้นของโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
 เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ประกอบไปด้วยโครเมียมร้อยละ 18 และนิกเกิลร้อยละ 8 ส่วนที่เหลือเป็นเหล็กและมีธาตุอื่นๆ เจือปนเล็กน้อย ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 มีการสร้างชั้นเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์ ($\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) เป็นชั้นป้องกันขึ้นมาเองได้ตามธรรมชาติ [35]

ดังรูปที่ 4.1 (ก) สำหรับโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ที่มีส่วนประกอบหลัก คือนิกเกิลร้อยละ 57 โมลิบดีนัมร้อยละ 16 และโครเมียมร้อยละ 15.5 ทำให้โลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 สามารถสร้างชั้นป้องกันของนิกเกิลออกไซด์ โครเมียมออกไซด์และนิกเกิลโครเมียมออกไซด์ ($\text{NiO}/\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{NiCr}_2\text{O}_4$) ขึ้นมาเองได้ตามธรรมชาติ [37] ดังรูปที่ 4.2 (ก) เมื่อเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวประจุลบลงไปในการละลาย โซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตจะไปดูดซับบนพื้นผิวโลหะ โดยหันส่วนที่มีขั้วเข้าหาพื้นผิวของโลหะ และด้านที่ไม่มีขั้วอยู่ในส่วนของสารละลายกรดที่มีความเป็นขั้วสูงทำให้ไม่มีความเสถียร ส่งผลให้เกิดการสร้างชั้นของโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตอีกชั้นหนึ่งโดยหันส่วนที่ไม่มีขั้วเข้าหากัน และหันส่วนที่มีขั้วออกสู่สารละลายเกิดเป็นชั้นของโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตสองชั้น (Bilayer) [40] ดังรูปที่ 4.1 (ข) และ 4.2 (ข)

4.1 การยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไนตริก 0.02 โมลาร์ โดยโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟต



รูปที่ 4.3 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ในสถานะที่ไม่เติมและเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.75 3 และ 6 มิลลิโมลาร์

รูปที่ 4.3 เป็นกราฟที่ได้จากการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตในการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ซึ่งสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองใช้โซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตในการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์

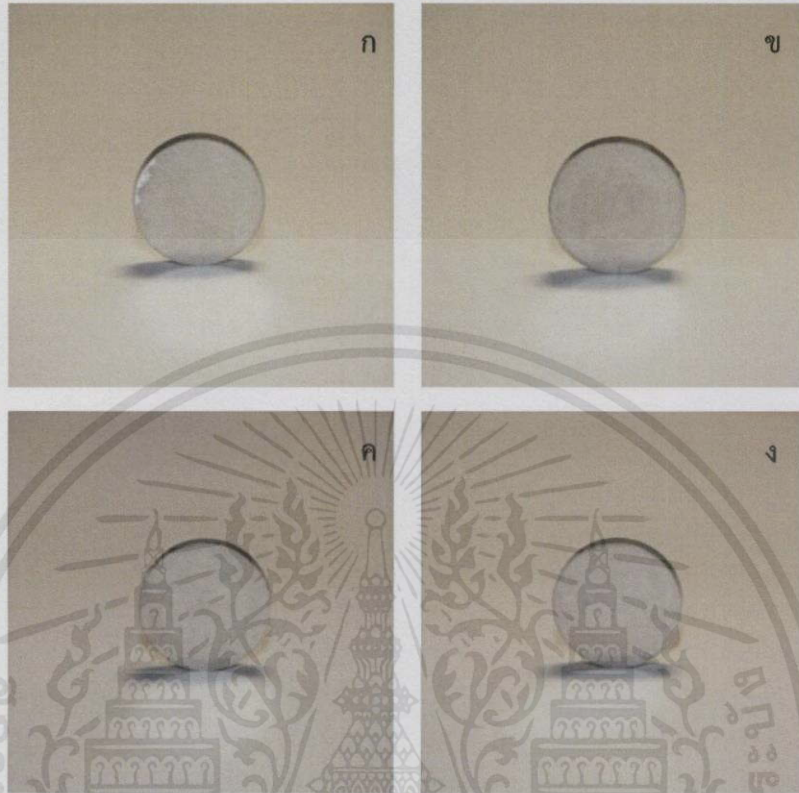
ความเข้มข้นของ SDS (mM)	E_{corr} (V _{SCE})	i_{corr} (A/cm ²)	E_{tran} (V _{SCE})
0	-0.127	4.94E-06	0.770
0.75	-0.252	3.94E-06	0.855
3	-0.297	5.95E-06	0.845
6	-0.300	5.78E-06	0.842

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสภาวะที่ไม่เติมและเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.75 3 และ 6 มิลลิโมลาร์ มีการกระจายตัวอยู่ในช่วงแคบๆ โดยพบว่าการเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตในทุกความเข้มข้นส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเลื่อนไปทางซ้ายเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารละลายกรดไนตริกที่มีโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตนั้นมีความสามารถในการออกซิไดซ์ลดลง และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ว่าโลหะจะถูกกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใดมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 มีการสร้างชั้นป้องกันขึ้นมาเองได้ตามธรรมชาติ จึงมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอได้ค่อนข้างดีอยู่แล้ว ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจึงมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก และจากรูปที่ 4.4 พื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 หลังจากการทดสอบการกัดกร่อนพบว่าไม่เกิดการกัดกร่อนแบบหลุมทั้งในสภาวะที่ไม่เติมและเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟต อาจมีสาเหตุมาจากกรดไนตริกเป็นกรดออกซิไดซ์ ซึ่งมีคุณสมบัติที่เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ต้องการเพื่อใช้ในการรักษาสภาพของชั้นป้องกันการกัดกร่อนจึงทำให้ไม่พบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในกรดไนตริกความเข้มข้น 0.02 โมลาร์

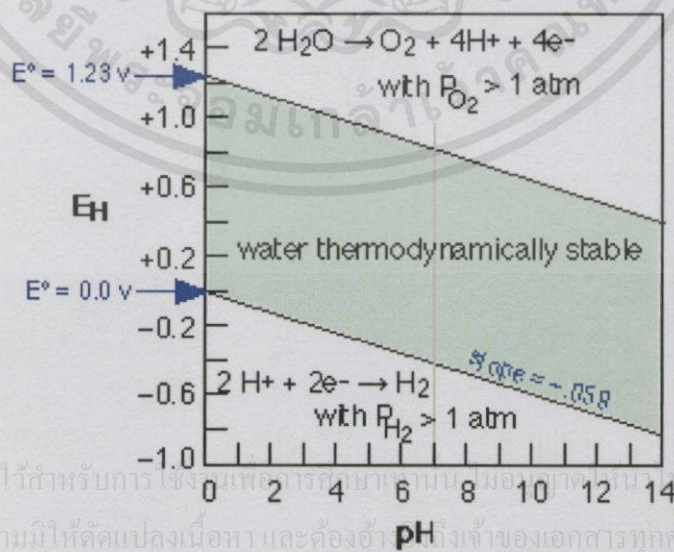
จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟในสภาวะที่ยังไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตมีค่าเท่ากับ 0.770 V_{SCE} และในสภาวะที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.75 3 และ 6 มิลลิโมลาร์ มีค่าเท่ากับ 0.855 V_{SCE} 0.845 V_{SCE} และ 0.842 V_{SCE} ตามลำดับ จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าการเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตทุกความเข้มข้นลงในสารละลายกรดไนตริกทำให้ช่วงของการมีชั้นป้องกันเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาจากแผนภาพพัวเบของน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.5 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันของออกซิเจน (Oxygen evolution potential) ที่พีเอช 1.92 มีค่าเท่ากับ 1.117 V_{SHE} เมื่อทำการเปรียบเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดคาโลเมลล์ในตัวที่ใช้ในการทดลอง ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันของออกซิเจนจึงมีค่าเท่ากับ 0.873 V_{SCE} จากการทดลองพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟในทุกการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันของออกซิเจน นั้นเป็นไปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟดังกล่าวเกิดจากการผลิตออกซิเจน ไม่ใช่การเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม ทั้งนี้ยังพบว่าพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ไม่พบร่องรอยของการ

กักร่อนแบบหลุมหลังจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4



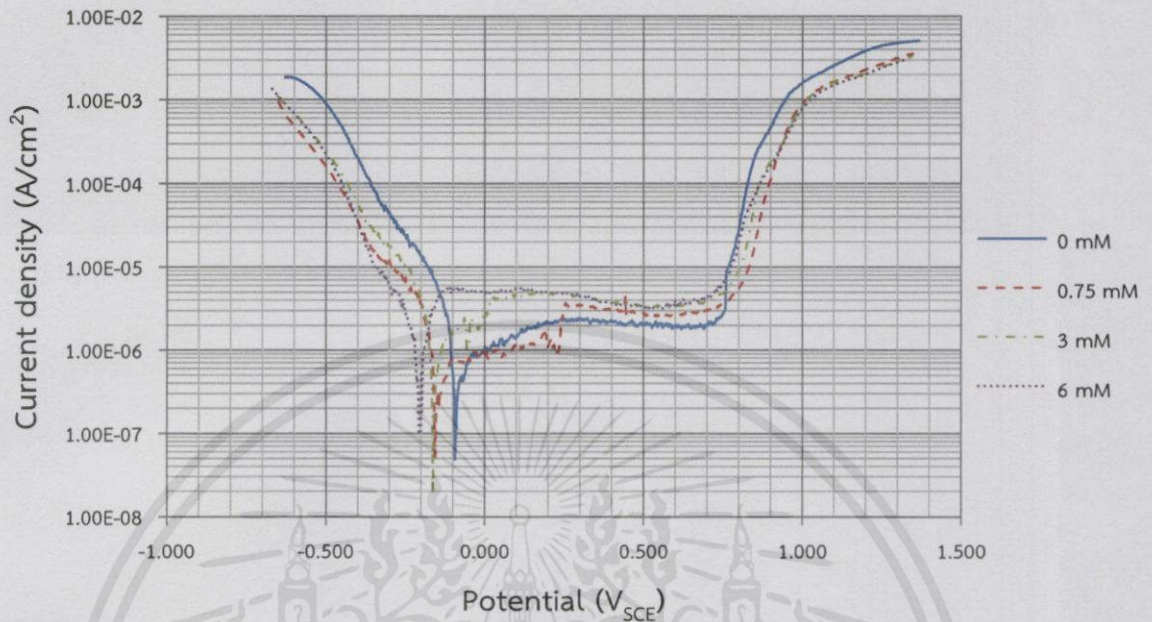
รูปที่ 4.4 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 หลังทำการทดลองในสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ (ก) ไม่เติมโซเดียมโตนเตคซิลลิลเฟต (ข) เติมโซเดียมโตนเตคซิลลิลเฟตความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ (ค) เติมโซเดียมโตนเตคซิลลิลเฟตความเข้มข้น 3 โมลาร์ (ง) เติมโซเดียมโตนเตคซิลลิลเฟตความเข้มข้น 6 โมลาร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 แผนภาพพัวเบของน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส [10]

4.2 การยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ในสารละลายกรดไนตริก 0.02 โมลาร์ โดยโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต



รูปที่ 4.6 กราฟโพเทนซีโอโดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ในสถานะที่ไม่เติมและเติมโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.75 3 และ 6 มิลลิโมลาร์

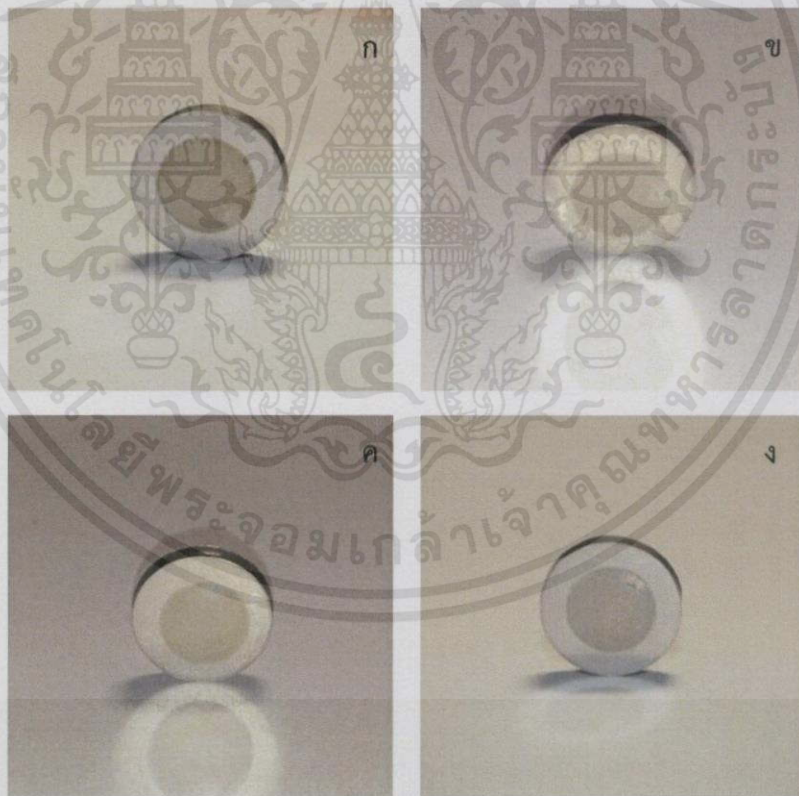
รูปที่ 4.6 เป็นกราฟที่ได้จากการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตในการยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ซึ่งสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองใช้โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตในการยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์

ความเข้มข้นของ SDS (mM)	E_{corr} (V_{SCE})	i_{corr} (A/cm^2)	E_{tran} (V_{SCE})
0	-0.098	1.15E-06	0.757
0.75	-0.156	4.25E-07	0.829
3	-0.162	1.29E-06	0.816
6	-0.201	2.36E-06	0.800

ไม่ว่าการมีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดูแปลมเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ในสถานะที่ไม่เติมและเติมโซเดียมโด-

เดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.75 3 และ 6 มิลลิโมลาร์ มีการกระจายตัวอยู่ในช่วงแคบๆ และยังพบว่า การเติมโซเดียมโตนีเดคซิลซัลเฟตทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเลื่อนไปทางซ้ายเล็กน้อยเช่นเดียวกันกับที่พบในการทดลองของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ยืนยันได้ว่าสารละลายกรดไนตริกจะสามารถในการออกซิไดซ์ลดลงเมื่อมีการเติมโซเดียมโตนีเดคซิลซัลเฟต และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เนื่องจากโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 สามารถสร้างชั้นป้องกันขึ้นมาเองได้ตามธรรมชาติ ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอและการกัดกร่อนในสารละลายกรดได้ค่อนข้างดี และด้วยปริมาณของนิกเกิลที่สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ที่มีส่วนประกอบหลักเป็นเหล็ก ทำให้โลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 นี้ มีการป้องกันการกัดกร่อนที่ดีกว่า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ในทุกการทดลองจึงอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 และจากรูปที่ 4.7 พื้นผิวของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 หลังจากการทดสอบการกัดกร่อนพบว่าไม่เกิดการกัดกร่อนแบบหลุมทั้งในสภาวะที่ไม่เติมและเติมโซเดียมโซเดียมโตนีเดคซิลซัลเฟต อาจมีสาเหตุมาจากการดไนตริกเป็นกรดออกซิไดซ์ซึ่งมีคุณสมบัติที่โลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ต้องการเพื่อใช้ในการรักษาสภาพของชั้นป้องกันการกัดกร่อนจึงทำให้ไม่พบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ในกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์

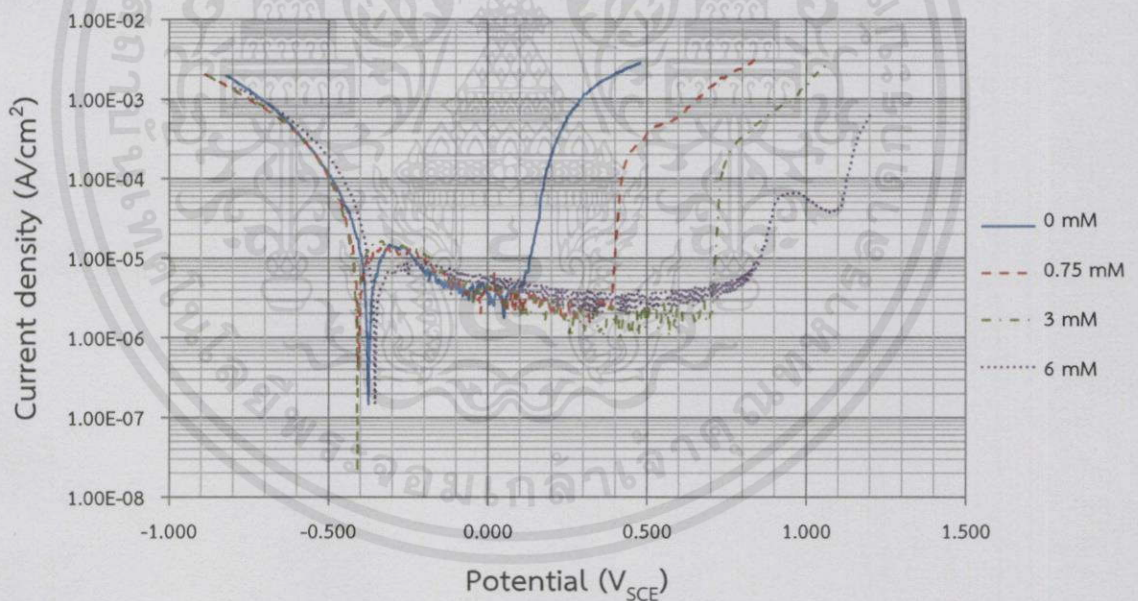


รูปที่ 4.7 โลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 หลังทำการทดลองในสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ (ก) ไม่เติมโซเดียมโตนีเดคซิลซัลเฟต (ข) เติมโซเดียมโตนีเดคซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ (ค) เติมโซเดียมโตนีเดคซิลซัลเฟตความเข้มข้น 3 โมลาร์ (ง) เติมโซเดียมโตนีเดคซิลซัลเฟตความเข้มข้น 6 โมลาร์

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟในสภาวะที่ไม่เติมและเติมสารลดแรงดึงผิวโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟในสภาวะที่ไม่เติมสารลดแรงดึงผิวโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตมีค่าเท่ากับ $0.757 V_{SCE}$ และในสภาวะที่มีการเติมสารลดแรงดึงผิวโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.75 3 และ 6 มิลลิโมลาร์ ค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟมีค่าเท่ากับ $0.829 V_{SCE}$ $0.816 V_{SCE}$ และ $0.800 V_{SCE}$ ตามลำดับ จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า การเติมโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตทุกความเข้มข้นลงไป ในสารละลายกรดไนตริก ทำให้ช่วงของการมีชั้นป้องกันเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาจากแผนภาพพื้นผิวของน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.5 ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันของออกซิเจนมีค่าเท่ากับ $0.873 V_{SCE}$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟจากการทดลอง นั้นแสดงว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ ดังกล่าว น่าจะเกิดจากการผลิตออกซิเจน ไม่ใช่การกัดกร่อนแบบหลุมเช่นเดียวกับที่พบในการทดลองกับเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นผิวของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ไม่พบร่องรอยของหลุมหลังจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.7

4.3 การยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.02 โมลาร์ โดยโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต



รูปที่ 4.8 กราฟโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ในสภาวะที่ไม่เติมและเติมโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.75 3 และ 6 มิลลิโมลาร์

รูปที่ 4.8 เป็นกราฟที่ได้จากการใช้สารลดแรงดึงผิวชนิดประจุลบโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตในการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ซึ่งสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3

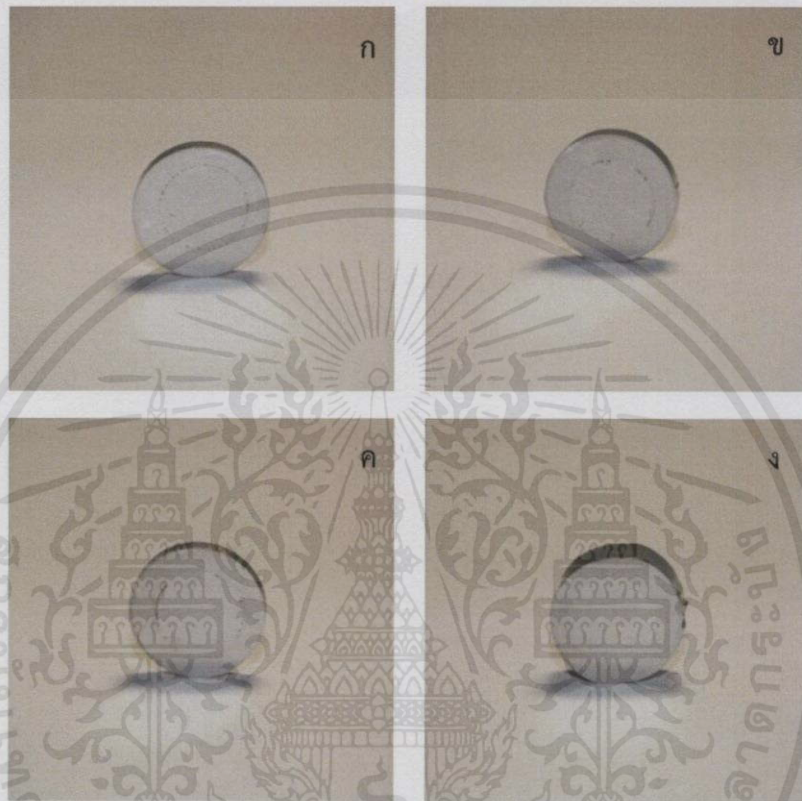
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองใช้โซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตในการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์

ความเข้มข้นของ SDS (mM)	E_{corr} (V_{SCE})	i_{corr} (A/cm^2)	E_{tran} (V_{SCE})
0	-0.375	1.34E-05	0.100
0.75	-0.408	5.71E-05	0.389
3	-0.410	5.21E-05	0.709
6	-0.351	4.18E-05	0.810

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.3 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ในสถานะที่ไม่เติมและเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.75 3 และ 6 มิลลิโมลาร์ มีการกระจายตัวอยู่ในช่วงแคบๆ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากมีชั้นป้องกันตามธรรมชาติของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ดังที่กล่าวมาข้างต้นอยู่แล้วจึงสามารถป้องกันการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอได้ค่อนข้างดี ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะจึงมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักสำหรับทั้ง 4 สถานะ แต่เมื่อความสามารถในการออกซิไดซ์ของสารละลายมีค่ามากขึ้นชั้นป้องกันนี้จะถูกทำลายลง ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 เกิดการกัดกร่อนแบบหลุมได้ เมื่อเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตลงไปโดยสารละลายโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวจะจะไปดูดซับบนพื้นผิวของโลหะเกิดเป็นชั้นของโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตอีกชั้นหนึ่ง ดังรูปที่ 4.1 (ข) ซึ่งช่วยป้องกันการเข้าทำปฏิกิริยาของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกกับพื้นผิว และสามารถเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ได้ จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟในสถานะที่ยังไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตมีค่าเท่ากับ $0.100 V_{SCE}$ และค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟในสถานะที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.75 3 และ 6 มิลลิโมลาร์ มีค่าเท่ากับ $0.389 V_{SCE}$ $0.709 V_{SCE}$ และ $0.810 V_{SCE}$ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาแผนภาพพัวเบของน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 4.5 ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันของออกซิเจนมีค่าเท่ากับ $0.873 V_{SCE}$ และจากรูปที่ 4.9 พื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมหลังจากการทดสอบการกัดกร่อน แสดงให้เห็นว่าในสถานะที่ไม่เติมและเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.75 และ 3 มิลลิโมลาร์ มีการกัดกร่อนแบบหลุมเกิดขึ้น โดยจากผลการทดลองที่ไม่ได้เติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตแสดงให้เห็นว่ากรดไฮโดรคลอริกซึ่งมีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบและจัดเป็นกรดรีดิวซ์ นั่นคือไม่มีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ที่เหล็กกล้าไร้สนิมต้องการเพื่อรักษาสภาพของชั้นป้องกันที่ใช้ด้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม กรดไฮโดรคลอริกจึงมีฤทธิ์กัดกร่อนต่อเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ได้ นอกจากนี้ช่วงของการมีชั้นป้องกันยังสั้นมากเมื่อเทียบกับการทดลองที่ไม่ได้เติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตในสารละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้นเดียวกัน จึงทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบหลุมได้ง่ายกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ที่อยู่ในสารละลายกรดไนตริก และเมื่อเติมโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตลงไป 0.75 และ 3 มิลลิโมลาร์ ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตมากขึ้น โซเดียมโตะเดคซิลซัลเฟตจะไปเพิ่มความเกาะที่

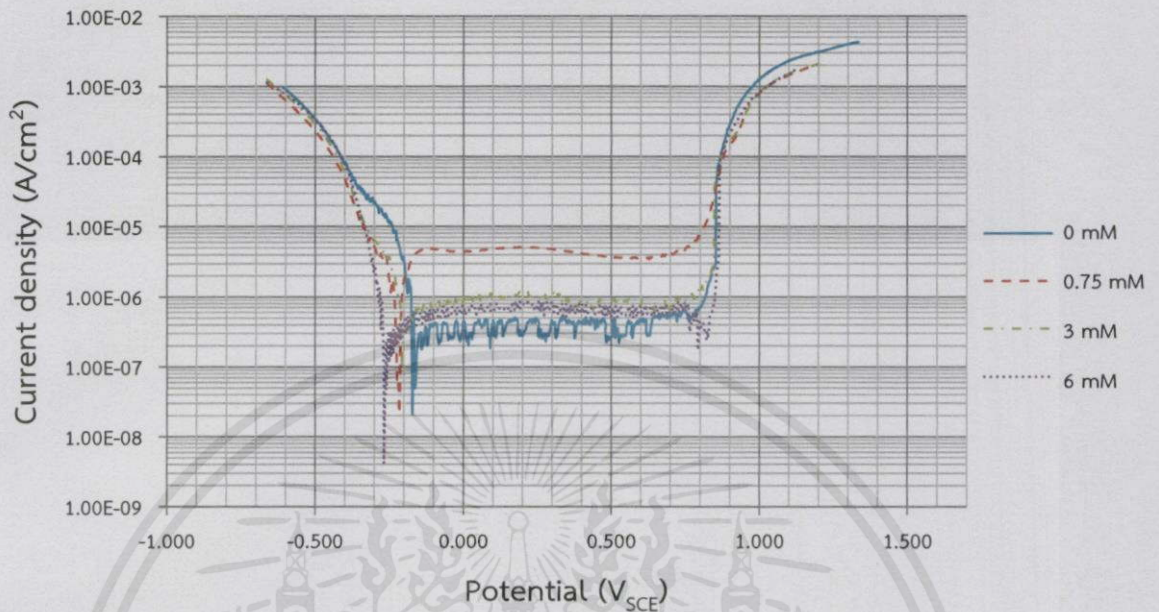
พื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ทำให้คลอไรด์ไอออนเข้าไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวได้ยากขึ้น นั่นคือความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมจะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้น 6 มิลลิโมลาร์ ไม่พบการกัดกร่อนแบบหลุมแต่พบค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟที่ $0.810 \text{ V}_{\text{SCE}}$ มีค่าใกล้เคียงกับค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันของออกซิเจน นั่นแสดงว่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟดังกล่าวเกิดการผลิตออกซิเจนไม่ใช่จากการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม



รูปที่ 4.9 เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 หลังทำการทดลองในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ (ก) ไม่เติมโซเดียมโตนิกซิลลเฟต (ข) เติมโซเดียมโตนิกซิลลเฟตความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ (ค) เติมโซเดียมโตนิกซิลลเฟตความเข้มข้น 3 โมลาร์ (ง) เติมโซเดียมโตนิกซิลลเฟตความเข้มข้น 6 โมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.02 โมลาร์ โดยโซเดียมโอดีเดคซิลซัลเฟต



รูปที่ 4.10 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ในสถานะที่ไม่เติมและเติมโซเดียมโอดีเดคซิลซัลเฟต ความเข้มข้น 0.75 3 และ 6 มิลลิโมลาร์

รูปที่ 4.10 เป็นกราฟที่ได้จากการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบโซเดียมโอดีเดคซิลซัลเฟตในการยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ซึ่งสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน และค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟ ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.4

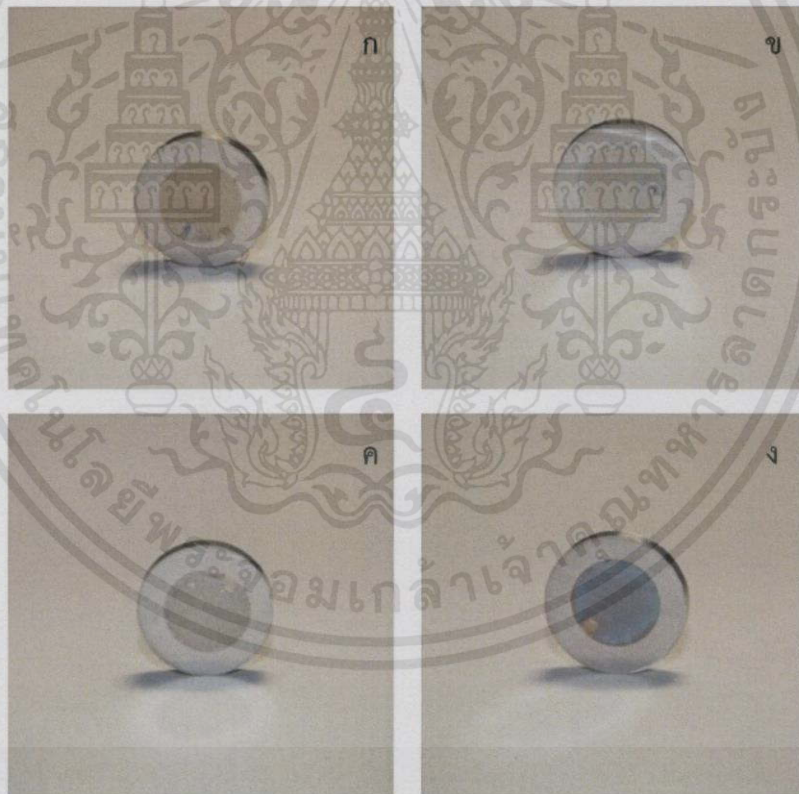
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองใช้โซเดียมโอดีเดคซิลซัลเฟตในการยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์

ความเข้มข้นของ SDS (mM)	E_{corr} (V_{SCE})	i_{corr} (A/cm^2)	E_{tran} (V_{SCE})
0	-0.162	3.74E-07	0.780
0.75	-0.223	1.89E-06	0.750
3	-0.198	4.27E-07	0.750
6	-0.256	3.64E-07	0.825

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

นอกจากนี้เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
 จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ในสถานะที่ไม่เติมและเติมโซ-

เติมโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 0.75 3 และ 6 มิลลิโมลาร์ มีการกระจายตัวอยู่ในช่วงแคบๆ และยิ่งพบว่าการเติมโซเดียมคลอไรด์ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเลื่อนไปทางซ้ายเล็กน้อย เช่นเดียวกันกับที่พบในการทดลองของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ยืนยันได้ว่าสารละลายกรดไฮโดรคลอริกจะมีความสามารถในการออกซิไดซ์ลดลงเมื่อมีการเติมโซเดียมคลอไรด์ และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เนื่องจากโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 สามารถสร้างชั้นป้องกันขึ้นมาเองได้ตามธรรมชาติ ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ ในสารละลายกรดได้ค่อนข้างดี และด้วยปริมาณของนิกเกิลที่สูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 ที่มีส่วนประกอบหลักเป็นเหล็ก ทำให้โลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 นี้มีการป้องกันการกัดกร่อนที่ดีกว่า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ในทุกการทดลองจึงอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 และจากรูปที่ 4.11 พื้นผิวของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 หลังจากการทดสอบการกัดกร่อนพบว่าไม่เกิดการกัดกร่อนแบบหลุมทั้งในสภาวะที่ไม่เติมและเติมโซเดียมคลอไรด์ อาจมีสาเหตุมาจากโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 มีชั้นป้องกันตามธรรมชาติที่ทนต่อสภาวะกรดไฮโดรคลอริกได้ดี จึงทำให้ไม่พบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276

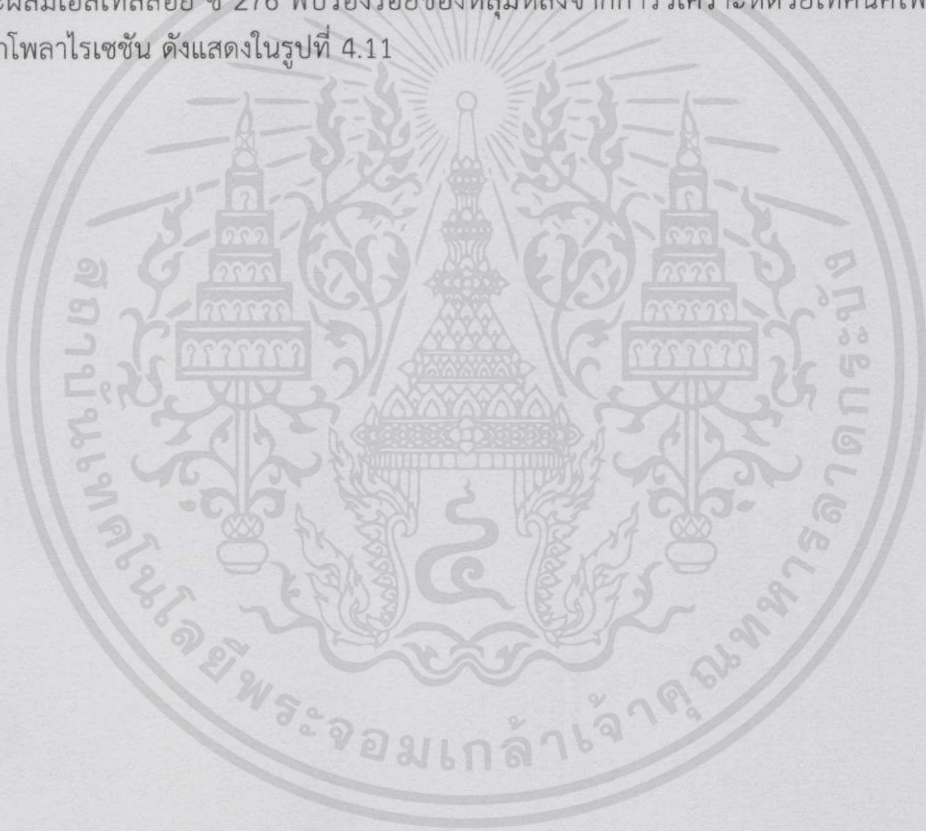


รูปที่ 4.11 โลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 หลังทำการทดลองในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ (ก) ไม่เติมโซเดียมคลอไรด์ (ข) เติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.75 โมลาร์ (ค) เติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3 โมลาร์ (ง) เติมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 6 โมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่
ไม่ผ่านการพิจารณา
เอกสารนี้
ไม่ผ่านการพิจารณา
เอกสารนี้
ไม่ผ่านการพิจารณา

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟในสถานะที่ไม่เติมและเติมสารลดแรงดึงผิวโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟในสถานะที่ไม่เติมสารลดแรงดึงผิวโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตมีค่าเท่ากับ $0.780 V_{SCE}$ และในสถานะที่มีการเติมสารลดแรงดึงผิวโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.75 3 และ 6 มิลลิโมลาร์ ค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟมีค่าเท่ากับ $0.750 V_{SCE}$ $0.750 V_{SCE}$ และ $0.825 V_{SCE}$ ตามลำดับ จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าการเติมโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตในทุกความเข้มข้นลงไป สารละลายกรดไฮโดรคลอริกทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาจากแผนภาพพัวเบของน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 4.5 ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันของออกซิเจนมีค่าเท่ากับ $0.873 V_{SCE}$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟจากการทดลอง เป็นไปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่าศักย์ไฟฟ้าทรานพาสซีฟดังกล่าวน่าจะเกิดจากการผลิตออกซิเจนไม่ใช่จากการกัดกร่อนแบบหลุม เนื่องจากไม่พบว่าพื้นผิวของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 พบร่องรอยของหลุมหลังจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 และโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 ในสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ และกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นเดียวกัน โดยใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) การเติมโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตในสารละลายกรดทั้งสองชนิด ส่งผลให้ความสามารถในการออกซิไดซ์ของกรดลดลงเล็กน้อย

2) ชั้นป้องกันที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติของโลหะตัวอย่างทั้งสองชนิดมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอได้ค่อนข้างดี ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

3) การเติมโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกช่วยเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304 อย่างเห็นได้ชัด โดยค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต และการเติมโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตทุกความเข้มข้นในสารละลายกรดไนตริกทำให้ช่วงของชั้นป้องกันยาวขึ้นเล็กน้อยแต่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

4) เนื่องจากชั้นป้องกันที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติของโลหะผสมเฮสเทลลอย ซี 276 มีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนได้เป็นอย่างดี เมื่อเติมโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตทุกความเข้มข้นในสารละลายกรดที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ และกรดที่มีความสามารถในการรีดิวซ์จึงไม่พบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรทำการทดลองเพื่อศึกษาความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อนของสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่นๆ นอกจากสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ และนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ม.ป.ป. การกัดกร่อนและการป้องกัน. [Online]. Available : http://www.most.go.th/portalweb/index.php/summary-technology/metal-and-materials-technology/1351-2010-01-27-08-03-55.html__
- [2] Herbert H. Uhlig, R. Winston Revie. 1984. **Corrosion and corrosion control**. Third Edition. Wiley.
- [3] วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. 2554. โลหะและการกัดกร่อนของโลหะ. [Online]. Available : <http://sc.sci.rmutp.ac.th/sctank/appchem/wcs-metal.pdf>
- [4] สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. ม.ป.ป. การกร่อน. [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/emedial/electrochemistry/web/electrochem04>
- [5] สถาบันนวัตกรรมการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. ม.ป.ป. ไฟฟ้าเคมี. [Online]. Available : http://www.il.mahidol.ac.th/emedial/electrochemistry/web/electrode_potential
- [6] กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ โรงเรียนพรหมานุสรณ์จังหวัดเพชรบุรี. 2013. ไฟฟ้าเคมี. [Online]. Available : <http://www.promma.ac.th/chemistry/electrochem>
- [7] ChemWiki. n.d. **The standard hydrogen electrode**. [Online]. Available : http://chemwiki.ucdavis.edu/Analytical_Chemistry/Electrochemistry
- [8] Wikipedia. 2014. **Pourbaix diagram**. [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Pourbaix_diagram
- [9] ChemWiki. n.d. **Pourbaix diagram water**. [Online]. Available : http://chemwiki.ucdavis.edu/Analytical_Chemistry/Electrochemistry/Electrochemistry_4%3A_The_Nernst_Equation
- [10] N. L. Sukiman, X. Zhou, N. Birbilis, A.E. Hughes, J. M. C. Mol, S. J. Garcia, X. Zhou and G. E. Thompson. 2012. "Durability and corrosion of aluminium and its alloys." *Materials Science*.
- [11] Scimath. 2558. **ลักษณะของการกัดกร่อน**. [Online]. Available : <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/2423-ลักษณะการกัดกร่อน?>
- [12] Petroleum recovery research center. 2558. **CO₂ Corrosion**. [Online]. Available : <http://octane.nmt.edu/waterquality/corrosion/CO2.aspx>
- [13] The multimedia corrosion guide. 2556. **3-Corrosion Caverneuse**. [Online]. Available : http://www.cdcorrosion.com/mode_corrosion
- [14] Wikipedia. 2558. **Corrosion**. [Online]. Available : <http://en.m.wikipedia.org/wiki/Corrosion>
- [15] Metallurgical Technologies, Inc. 2558. **Stress corrosion cracking and intergranular corrosion of A 316Ti stainless steel preheater tube**. [Online]. Available : <http://met-tech.com/preheater-tube-failure.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [16] สยาม แก้วคำไสย์. 2558. การกัดกร่อนของวัสดุ (โลหะ). [Online]. Available : <http://siamkaewkumsai.blogspot.com/2010/05/blog-post.html>
- [17] พรวิสา วงศ์ปัญญา. 2555. “เอกสารประกอบการสอนการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตท.” กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. เอกสารอัดสำเนา.
- [18] Philip A. Schweitzer, P.E. 1996. “Corrosion engineering handbook.” Marcel Dekker, Inc.
- [19] วิสาขา ภูจินดา. 2549. มารู้อัจฉริยะกัดกร่อนที่ผิดกว่า. [Online]. Available : <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=3>
- [20] Myers D. 2006. “Surfactant science and Technology.” Third Edition. New Jersey : John Wiley & Sons.
- [21] Myers D. 1988. “Surfactant science and Technology.” New York : VCH Publishers.
- [22] Wikipedia. 2558. Sodium dodecyl sulfate. [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_dodecyl_sulfate
- [23] พรเพ็ญ วีระวัฒน์กานนท์. 2548. “การเกิดปฏิกิริยาเคมีในสารละลายไมเซลล์.” วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์การแพทย์. 19(2) : 168-171.
- [24] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2558. การดูดซับ. [Online]. Available : http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2551/chem0451sk_ch1.pdf
- [25] Thai Poly Chemicals Co., Ltd. 2558. Nitric acid. [Online]. Available : <http://thaipolychemicals.weebly.com/nitric-acid.html>
- [26] สำนักควบคุมเครื่องสำอางและวัตถุอันตราย สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. 2555. กรดไนตริก (Nitric acid). [Online]. Available : <http://www.fda.moph.go.th/psiond/download/km/Nitric%20acid.pdf>
- [27] วิกิพีเดีย. 2558. กรดไฮโดรคลอริก. [Online]. Available : <http://th.wikipedia.org/wiki/กรดไฮโดรคลอริก>
- [28] มนัส สติรจินดา. 2538. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [29] C.M. Schillmoller. Selection and use of stainless steels and nickel-bearing alloys in organic acids. Nickel Development Institute.
- [30] Special Metals. 2558. INCONEL alloy C-276. [Online]. Available : <http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20C-276.pdf>
- [31] กิตติพร เหล่าแสงธรรม, ดำรงค์ดี เหล่าแสงธรรม. 2549. เหล็กกล้าไร้สนิม. [วิทยุกระจายเสียง]. กรุงเทพฯ : สถานีวิทยุกระจายเสียงแห่งประเทศไทย.
- [32] บริษัท ซี-ฟอร์ม จำกัด. 2558. ความหมายของเหล็กกล้าไร้สนิม. [Online]. Available : <http://www.c-formth.com/index.asp?catid=1&contentID=1000004&getarticle>

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [33] AJMFG. 2555. **304 VS. 316 Stainless**. [Online]. Available : <http://www.ajmfg.com/faq/304-vs-316-stainless.html>
- [34] Jahar Dey, Kochi Ismail. 2012. "Aggregation of sodium dodecyl sulfate in aqueous nitric acid medium." *Journal of Colloid and Interface Science*. 378 : 144–151.
- [35] S. Ningshen, U. Kamachi Mudali, S. Ramya, Baldev Raj. 2011. "Corrosion behaviour of AISI type 304L stainless steel in nitric acid media containing oxidizing species." *Corrosion Science*. 53 : 64–70.
- [36] Tianpei Zhao, Guannan Mub. 1999. "The adsorption and corrosion inhibition of anion surfactants on aluminium surface in hydrochloric acid." *Corrosion Science*. 41 : 1937-1944.
- [37] Qiang Zhang a, Rui Tang, Kaiju Yin a, Xin Luo, Lefu Zhang. 2009. "Corrosion behavior of Hastelloy C-276 in supercritical water." *Corrosion Science*. 51 : 2092–2097.
- [38] Zhenqiang Wei, Ponisseril Somasundaran, Paul Doby. 2003. "Pitting Inhibition by Surfactants." *The Electrochemical Society*. 6 (151) : B304-B308.
- [39] Houyi Ma, Shenhao Chen, Bingsheng Yin, Shiyong Zhao, Xiangqian Liu. 2003. "Impedance spectroscopic study of corrosion inhibition of copper by surfactants in the acidic solutions." *Corrosion Science*. 45 : 867–882.
- [40] 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้