

การยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316  
ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% โดยสารประกอบโซเดียมลอริลซาร์โคซิเนต  
และไดออกทิล ซัลโฟซัคซิเนต โซเดียมซอลต์  
Corrosion Inhibition of 316 Stainless Steel  
in 3% Sodium Chloride Solution using Sodium Lauroyl Sarcosinate  
and Dioctyl Sulfosuccinate Sodium Salt



T123265

ณัฐภัทสร

จงอาจกลาง

นัฐพนธ์

หลักดี

ประภัสสร

ศรวิรัชชัย

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....123265  
วัน, เดือน, ปี.....1 พย. 2555



โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาเคมีอุตสาหกรรม  
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2554  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**CORROSION INHIBITION OF 316 STAINLESS STEEL IN 3%  
SODIUM CHLORIDE SOLUTION USING SODIUM LAUROYL  
SARCOSINATE AND DIOCTYL SULFOSUCCINATE SODIUM SALT**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ** การยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ในสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ 3% โดยสารประกอบโซเดียมลอริลซาร์โคซิเนตและ ไดออกทิล ซัลโฟซัคซิเนต โซเดียมซอลต์

Corrosion Inhibition of 316 Stainless Steel in 3% Sodium Chloride Solution using Sodium Lauroyl Sarcosinate and Dioctyl Sulfosuccinate Sodium Salt

**ชื่อนักศึกษา** นางสาวณัฐภััสสร จงอาจกลาง  
 นายณัฐพนธ์ หลักดี  
 นางสาวประภัสสร ศรีวงษ์ชัย

**ปริญญา** วิทยาศาสตรบัณฑิต

**สาขาวิชา** เคมีอุตสาหกรรม

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ดร.สุชา สุทธิเรืองวงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2554

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธิ	
ผศ.ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์ โนน	
ดร. สุชา สุทธิเรืองวงศ์	

**ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% โดยสารประกอบโซเดียมลอริลซัลเฟตและไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์	
ผู้นักศึกษา	นางสาวณัฐภัศร	จงอาจกลาง
	นายรัฐพนธ์	หลักดี
	นางสาวประภัสสร	ศรีวงษ์ชัย
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม	
ปีการศึกษา	2554	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์	

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อนของสารลดแรงตึงผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% โดยใช้โซเดียมลอริลซัลเฟตและไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์ ค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (Critical micelle concentration, CMC) ของสารลดแรงตึงผิวสามารถหาได้จากการวัดแรงตึงผิวของสารละลาย การศึกษาการยับยั้งการกัดกร่อนใช้ค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเท่ากับ 0.1 เท่าของ CMC 1 เท่าของ CMC 2 เท่าของ CMC และไม่มีสารเติมสารลดแรงตึงผิว ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาริกราฟี โดยใช้อิเล็กโทรดทำงานเป็นขั้วอ้างอิง และแผ่นแพลทินัมเป็นขั้วตรงข้าม เพื่อหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{cor}$ ) ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{cor}$ ) และศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม ( $E_{pit}$ ) โดยพบว่าสารไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์มีความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อนแบบหลุมดีที่สุดที่ความเข้มข้น 2 เท่าของ CMC โดยมีค่า  $E_{pit}$  เท่ากับ 0.301 V ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของทุกการทดลองอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำมากอยู่ในช่วง  $10^{-5}$  mA/cm<sup>2</sup> เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีชั้นป้องกันตามธรรมชาติ ส่วนสารโซเดียมลอริลซัลเฟตมีความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อนแบบหลุมเช่นกัน มีค่า  $E_{pit}$  แกว่งตัวอยู่ประมาณ 0.324 V ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าเลื่อนไปทางลบมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มสารลดแรงตึงผิวลงในสารละลายแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการออกซิไดซ์ (Oxidizing power) ของสารละลายลดลง

**คำสำคัญ :** ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน, ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน, ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม, ความสามารถในการออกซิไดซ์

Project	Corrosion Inhibition of 316 Stainless Steel in 3% Sodium Chloride Solution using Sodium Lauroyl Sarcosinate and Dioctyl Sulfosuccinate Sodium Salt	
Students	Miss Nathphatsorn	Jongardklang
	Mr. Nattapon	Lakdee
	Miss Prapassorn	Sriwongchai
Degree	Bachelor of Science	
Major	Industrial Chemistry	
Academic Year	2011	
Advisor	Dr.Sutha Sutthiruangwong	

## ABSTRACT

The corrosion inhibition of 316 stainless steel was studied in 3% NaCl using sodium lauroyl sarcosinate and dioctyl sulfosuccinate sodium salt. The critical micelle concentration (CMC) was determined by surface tension measurement of the solution. The corrosion inhibition study applied the concentration of the surfactants equal to 0.1xCMC, CMC, 2xCMC, and without surfactant addition. Potentiodynamic polarization was performed using saturated calomel electrode as a reference and platinum plate as a counter electrode to determine the corrosion current density ( $i_{corr}$ ), corrosion potential ( $E_{corr}$ ), and pitting potential ( $E_{pit}$ ). It has been found that the pitting potential obtained from the 3% sodium chloride solution with 2xCMC of dioctyl sulfosuccinate sodium salt was the highest at 0.301 V. The corrosion current densities of all experiment were nearly the same in a range of  $10^{-5}$  mA/cm<sup>2</sup> because the stainless steel has a natural protective layer. Sodium lauroyl sarcosinate also inhibited pitting corrosion. The pitting potential was around 0.324 V. The corrosion potential was shifted to more negative value as the surfactant concentration was increased. This indicated that the oxidizing power of the solution has been decreased.

**Keywords :** The critical micelle concentration, corrosion current density, corrosion potential, pitting potential, oxidizing power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความเมตตาอนุเคราะห์ของหลายๆ ฝ่าย ทางคณะผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ ดร.สุธา สุทธิเรืองวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่คอยให้คำแนะนำช่วยเหลือและชี้แจงข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติมาโดยตลอดและทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จบรรลุผลไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธีและ ผศ.ดร.ปยุตมา ศิริพันธ์ โนน ที่ช่วยในการตรวจสอบข้อผิดพลาดและคำแนะนำในการแก้ไขโครงการนี้ให้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คุณพิมพ์ภากรณ์ มั่นพิริยะกุล ที่คอยให้คำแนะนำ ให้ความรู้และคอยดูแลในเรื่องต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณปราณี บุญวัฒน์ เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาด้วยความอภัยข้อยินดี ด้านเครื่องมือวิทยาศาสตร์ ทำให้การทำงานสะดวกรวดเร็วมากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มอบความรู้ด้านวิชาการ ประสบการณ์ และคุณธรรมในการดำรงชีวิต อีกทั้งยังสนับสนุนงบประมาณในการทำโครงการพิเศษของเราในครั้งนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณเพื่อนๆ สาขาเคมีอุตสาหกรรม และพี่น้องชาวสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการและด้านอื่นๆ และเป็นกำลังใจตลอดมา

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้องทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจให้ตลอดระยะเวลาการศึกษา คอยตักเตือน สั่งสอนตลอดจนสนับสนุนเรื่องทุนทรัพย์ในการศึกษาทำให้เราประสบความสำเร็จ

นางสาวณัฐภััสสร

จงอาจกลาง

นายณัฐพนธ์

หลักดี

นางสาวประภัสสร

ศรีวิงษ์ชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและ III อังอาจอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX

<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีการศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 การกัดกร่อน (Corrosion)	3
2.1.1 ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical reaction)	3
2.1.2 ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction)	3
2.1.3 แผนภูมิพิวเบ	6
2.1.4 หลักการ โพลาริเซชัน (Polarization)	8
2.1.5 การสร้างชั้นป้องกัน (Passivity)	9
2.2 โลหะเหล็กกล้าไร้สนิม 316	10
2.2.1 เหล็กกล้าไร้สนิม	10
2.2.2 ประเภทและเกรดเหล็กกล้าไร้สนิม	11
2.3 การกัดกร่อนและสมบัติของการกัดกร่อน	12
(Corrosion and corrosion properties)	
2.3.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion)	12
2.3.2 การกัดกร่อนแบบหลุมและในที่อับ (Pitting and crevice corrosion)	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 การแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน (Stress corrosion cracking)	15
2.3.4 การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion)	17
2.3.5 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion)	18
2.3.6 เทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization)	19
2.4 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)	22
2.4.1 ชนิดของสารลดแรงตึงผิว	22
2.4.1.1 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Anionic surfactant)	22
2.4.1.2 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (Cationic surfactant)	22
2.4.1.3 สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)	22
2.4.1.4 สารลดแรงตึงผิวชนิดสองประจุ (Amphoteric surfactant)	23
2.4.2 ประเภทของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่นิยม	23
2.4.2.1 ซัลเฟต เอสเทอร์	24
2.4.2.2 กรดเกลือซัลโฟนิต	24
2.4.2.3 สบู่และผงซักฟอกจากคาร์บอกซิเลต	25
2.4.3 โซเดียมลอริลซาร์โคซิเนต (Sodium lauroyl sarcosinate)	25
2.4.4 ไดออกทิล ซัลโฟซัคซิเนต โซเดียมซอลต์ (Dioctyl sulfosuccinate sodium salt)	26
2.4.5 แรงตึงผิว (Surface tension)	27
2.4.5.1 การเกิดหยดของเหลว (Droplet)	28
2.4.5.2 คาพิลลาริตี (Capillarity)	28
2.4.6 ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (Critical micelle concentration, CMC)	29
2.4.7 ทฤษฎีการหาแรงตึงผิวของคูนอยริง (Do noüy ring)	31
2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)	34
2.5.1 ประเภทการดูดซับ	34
2.5.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์อื่น การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)	35
2.5.2.ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับ	35
2.5.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherms)	36
2.5.3.1 แบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)	37
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน</b>	<b>43</b>
3.1 สารเคมี	43
3.2 อุปกรณ์เครื่องมือ	43
3.3 วิธีการทดลอง	44
3.3.1 การเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316	44
3.3.2 การเตรียมสารเคมีในการทดลอง	44
3.3.3 วิธีการวัดแรงดึงผิว	44
3.3.4 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิค โพเทนชิโอสแตติกโพลาไรเซชัน	45
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	<b>47</b>
4.1 ผลจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316	47
4.2 ค่าความเข้มข้นวิกฤติของการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์	50
4.3 การยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 โดย ไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3%	51
4.4 ค่าความเข้มข้นวิกฤติของการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ โซเดียมลอริลซัลเฟต	53
4.5 การยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 โดยโซเดียมลอริลซัลเฟต ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3%	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5	สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	56
5.1	สรุปผลการทดลอง	56
5.2	ข้อเสนอแนะ	56
เอกสารอ้างอิง		57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานรีดักชันในสารละลายความเข้มข้น 1 M, ที่ความดัน 1 atm อุณหภูมิ 25C°	4
ตารางที่ 2.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง	6
ตารางที่ 2.3 ความแตกต่างของประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม	11
ตารางที่ 2.4 การแสดงการใช้งานของสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ	23
ตารางที่ 2.5 สมบัติต่างๆของโซเดียมลอร์ริธาโคซิเนต	25
ตารางที่ 2.6 สมบัติของไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์	26
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองใช้ไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์ในการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3%	52
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองใช้โซเดียมลอร์ริธาโคซิเนต ในการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3%	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการกัดกร่อนที่เกิดสลายตัวของโลหะเข้าสู่สารละลาย	3
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างขั้วอิเล็กโทรดคาโทดที่อิมมิตัว	5
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างขั้วซิลเวอร์ – ซิลเวอร์คลอไรด์	6
รูปที่ 2.4 แผนภูมิพิวเบของระบบ Fe – H <sub>2</sub> O	7
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าเมื่อศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนไป	8
รูปที่ 2.6 Anodic polarization ของโลหะ passivity	10
รูปที่ 2.7 Isocorrosion diagram ของกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ภายใต้อัตราการกัดกร่อน 0.1 mm/year	13
รูปที่ 2.8 ความเข้มข้นจำกัดของกรดซัลฟิวริกที่ชั้นป้องกันของเหล็กจะไม่ถูกทำลาย	13
รูปที่ 2.9 การกัดกร่อนแบบหลุมบนท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ในน้ำกร่อย	14
รูปที่ 2.10 การกัดกร่อนในที่อับภายใต้ประเถ็นขางใน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในน้ำกร่อย	14
รูปที่ 2.11 กราฟระหว่าง Critical pitting temperature (CPT) ใน NaCl 1 M กับค่า PRE	15
รูปที่ 2.12 การแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนที่รอยเชื่อมของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมประกอบด้วยสิ่งแวดล้อมที่มีคลอไรด์และอุณหภูมิ 100°C	16
รูปที่ 2.13 SCC กับปริมาณนิกเกิล	17
รูปที่ 2.14 การกัดกร่อนตามขอบเกรนที่ใกล้กับรอยเชื่อมในขอเกี่ยวของเหล็กกล้าไร้สนิม 316 ใช้ในการบรรจุกรดซัลฟิวริก	17
รูปที่ 2.15 ลักษณะการกัดกร่อนแบบกัลวานิก	18
รูปที่ 2.16 การกัดกร่อนแบบกัลวานิกของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กเหนียวในน้ำทะเล	18
รูปที่ 2.17 กราฟโพลาริเซชันจากการทดลองวิธีโพเทนชิโอสแตติกโพลาริเซชัน	19
รูปที่ 2.18 แผนผังอย่างง่ายของโพเทนชิโอสแตต	20
รูปที่ 2.19 กราฟโพลาริเซชันระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้กับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น	21
รูปที่ 2.20 ลักษณะของสารลดแรงตึงผิว	22
รูปที่ 2.21 โครงสร้างของโซเดียมลอริลซัลเฟตโคซินเนต	25
รูปที่ 2.22 โครงสร้างของไดออกทิล ซัลโฟซัลโฟเนต โซเดียมซอลต์	26
รูปที่ 2.23 ชนิดของแรงต่างๆที่มีผลต่อแรงตึงผิว	27
รูปที่ 2.24 การรวมตัวของสารลดแรงตึงผิว	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 ไม่ว่าจะโดยปริยายหรือโดยนัยใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัยหรือข้อผิดพลาดประการใด กรุณาแจ้งมาที่ [book@scs.ac.th](mailto:book@scs.ac.th) หรือ โทร. 02-2545434

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า ( $\kappa$ ), แรงตึงผิว ( $\gamma$ ), และ แรงดันออสโมติก ( $\pi$ ) ณ จุดความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์	30
รูปที่ 2.26 ลักษณะ Micelle ที่ความเข้มข้นต่างๆ	30
รูปที่ 2.27 เครื่องมือที่ใช้วัดด้วยเทคนิควงแหวนดุนอย	31
รูปที่ 2.28 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวและอุณหภูมิของน้ำมันมะกอก	32
รูปที่ 2.29 ลักษณะการทำงานของดุนอยริง	33
รูปที่ 2.30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและเวลาในการทำงานที่ตำแหน่งต่างๆ ของวงแหวนดุนอย	33
รูปที่ 2.31 ไอโซเทอมของการดูดซับ	36
รูปที่ 2.32 ลักษณะของ Langmuir adsorption isotherm ในรูปกราฟเส้นตรง	38
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ของเซลล์การกักกรองสำหรับเครื่องโพเทนชิโอสแตท	46
รูปที่ 4.1 พื้นผิวชิ้นงานหลังขัดกระดาษทราย กำลังขยาย 50 เท่า	47
รูปที่ 4.2 พื้นผิวชิ้นงานหลังจากการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนซิโอดีนามิกโพลาริเซชัน ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% ที่มีสารลดแรงตึงผิวไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์ที่ความเข้มข้น 2 เท่าของ CMC (A) กำลังขยาย 50 เท่าและ (B) กำลังขยาย 100 เท่า	48
รูปที่ 4.3 การเพิ่มความต้านทานการกักกรองของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ โซเดียมลอริลซัลโฟซักซิเนต	49
รูปที่ 4.4 การเพิ่มความต้านทานการกักกรองของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์	49
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวกับความเข้มข้นของ ไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์	50
รูปที่ 4.6 กราฟโพเทนซิโอดีนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3% ที่ไม่เติมและเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์ที่ความเข้มข้น 0.1, 1 และ 2 เท่าของ CMC	51
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวกับความเข้มข้นของโซเดียมลอริลซัลโฟซักซิเนต	53
รูปที่ 4.8 กราฟโพเทนซิโอดีนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3% ที่ไม่เติมและเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ โซเดียม ลอริลซัลโฟซักซิเนตที่ความเข้มข้น 0.1, 1 และ 2 เท่าของ CMC	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการศึกษา  
ไม่ว่าในรูปแบบใดๆ ทั้งสิ้น ยินดีให้พิมพ์และเผยแพร่โดยไม่คิดค่าใช้จ่ายของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในอุตสาหกรรมปัจจุบันโลหะต่างๆ ได้มีบทบาทสำคัญต่อชีวิตประจำวันเป็นอย่างมากและมีแนวโน้มการใช้งานที่มากขึ้นเรื่อยๆ โดยเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 มีประโยชน์ต่อการใช้งานต่างๆ มากมายในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ท่อในโรงงานอุตสาหกรรม ถึงปฏิกิริยาในกระบวนการเคมี ประสิทธิภาพ ท่อส่งน้ำมันปิโตรเลียม โดยปัญหาส่วนมากที่มักพบขณะใช้งานคือ การเกิดการกัดกร่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตที่มีความเป็นกรดสูง นับเป็นความเสียหายจำนวนมากต่อผู้ประกอบการทั้งทางตรงและทางอ้อม จึงนำไปสู่การศึกษาสาเหตุของการกัดกร่อน หาวิธีป้องกันและยับยั้งการกัดกร่อนในโลหะในแบบต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์ที่มีความต้านทานการกัดกร่อนโดยใช้เทคโนโลยีในการเคลือบผิววัสดุและการปรับเปลี่ยนสถานะแวดล้อมเพื่อหลีกเลี่ยงสถานะที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน ซึ่งหนึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมในการป้องกันปัญหาการกัดกร่อนสำหรับโลหะหลายๆชนิดคือการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน (Corrosion inhibition)

ทางคณะผู้จัดทำได้ศึกษางานวิจัยต่างๆ พบว่าสารช่วยยับยั้งการกัดกร่อนนั้น มักมีส่วนประกอบของธาตุดอกซิเจน ในโครเจน พันธะคู่ และสารประกอบเฮเทอโรไซคลิก [1] ซึ่งทางคณะผู้จัดทำได้นำสารลดแรงตึงผิวโซเดียม ลอริลซาร์โคซิเนต (Sodium lauroyl sarcosinate) ซึ่งมีองค์ประกอบของหมู่ไนโตรเจนมาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของหมู่ไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบของสารลดแรงตึงผิวในการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% ส่วนสารลดแรงตึงผิวไดออกทิล ซัลโฟซัคซิเนต โซเดียมซอลต์ (Diocetyl sulfosuccinate sodium salt) ที่ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของโครงสร้างที่มีสายไฮโดรคาร์บอน 2 สาย ในการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% เมื่อเทียบกับโครงสร้างที่สายไฮโดรคาร์บอนสายเดียว

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 โดยใช้โซเดียม ลอริลซาร์โคซิเนต (Sodium lauroyl sarcosinate) และไดออกทิล ซัลโฟซัคซิเนต โซเดียมซอลต์ (Diocetyl sulfosuccinate sodium salt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาและทดลองใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ โซเดียมลอริลซัลเฟต โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต และไดออกทิล ซัลโฟซัคซิเนต โซเดียมซอลต์ในการยับยั้งการกักตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 โดยสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่างๆ ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% การทดลองนั้นเริ่มจากการหาค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (CMC) ของสารลดแรงตึงผิว เพื่อใช้ค่าความเข้มข้นนี้เป็นเกณฑ์ในการทดสอบความที่เข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 0.1 เท่าของ CMC 1 เท่าของ CMC 2 เท่าของ CMC และไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวในการทดสอบเพื่อหาอัตราการกักตัวที่เกิดขึ้นในเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 เพราะค่าความเข้มข้นที่ CMC นี้เป็นค่าที่มีการดูดซับมากที่สุดก่อนการเกิดไมเซลล์โดยใช้เทคนิคโพเทนซิโอดีนามิกโพลาริเซชันในการตรวจวิเคราะห์การกักตัว

### 1.4 วิธีการศึกษา

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการกักตัว การยับยั้งการกักตัวในโลหะต่างๆ สมบัติของสารตัวอย่าง
2. ศึกษาเทคนิคการวัดแรงตึงผิว
3. ศึกษาเทคนิคโพเทนซิโอดีนามิกโพลาริเซชัน
4. จัดหาอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
5. ทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล
6. วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถบอกถึงความสามารถในการยับยั้งการกักตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 โดยสารลดแรงตึงผิว
2. สามารถบอกถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของสาร โซเดียมลอริลซัลเฟต โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต และไดออกทิล ซัลโฟซัคซิเนต โซเดียมซอลต์ในการยับยั้งการกักตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

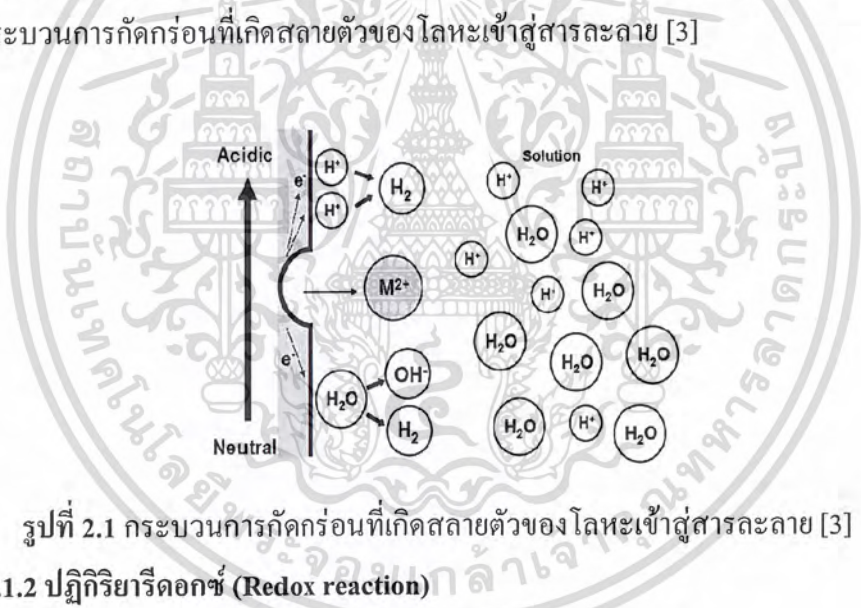
# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การกัดกร่อน (Corrosion)

จากนิยามตามมาตรฐาน DIN EN ISO 8044 การกัดกร่อน (Corrosion) คือปฏิกิริยาระหว่างวัสดุกับสิ่งแวดล้อมซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพของวัสดุนั้นๆ และส่งผลให้ความสามารถในการทำหน้าที่ของวัสดุดังกล่าวเสียไป ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเป็นได้ทั้งปฏิกิริยาเคมี ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า หรือปฏิกิริยาทางกายภาพของวัสดุ [2]

#### 2.1.1 ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical reaction)

การกัดกร่อน (Corrosion) ในสารละลายคือการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีซึ่งเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทประจุไฟฟ้าออกซิเดชันจะสูญเสียอิเล็กตรอนและรีดักชันเพิ่มพูนอิเล็กตรอนจากรูปที่ 2.1 เป็นกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดสลายตัวของโลหะเข้าสู่สารละลาย [3]



รูปที่ 2.1 กระบวนการกัดกร่อนที่เกิดสลายตัวของโลหะเข้าสู่สารละลาย [3]

#### 2.1.2 ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction)

- ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation or Anodic reaction)



- ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction or Cathodic reaction) ขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อม

Hydrogen



Oxygen



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาติดต่อผู้จัดทำเพื่อขออนุญาตเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานรีดักชันในสารละลายความเข้มข้น 1 M ที่ความดัน 1 atm  
อุณหภูมิ 25°C [4]

**TABLE 1**  
**Alphabetical Listing**

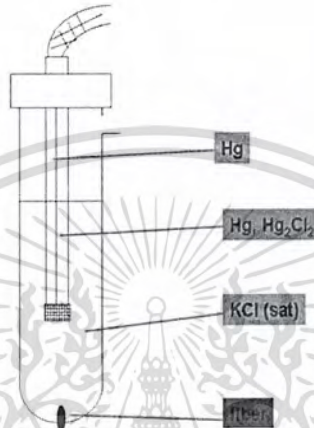
Reaction	$E^\circ/V$	Reaction	$E^\circ/V$
$\text{Ac}^{3+} + 3e \rightleftharpoons \text{Ac}$	-2.20	$\text{Al(OH)}_4^- + 3e \rightleftharpoons \text{Al} + 4\text{OH}^-$	-2.328
$\text{Ag}^+ + e \rightleftharpoons \text{Ag}$	0.7996	$\text{H}_2\text{AlO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 3e \rightleftharpoons \text{Al} + 4\text{OH}^-$	-2.33
$\text{Ag}^{2+} + e \rightleftharpoons \text{Ag}^+$	1.980	$\text{AlF}_6^{3-} + 3e \rightleftharpoons \text{Al} + 6\text{F}^-$	-2.069
$\text{Ag(ac)} + e \rightleftharpoons \text{Ag} + (\text{ac})^-$	0.643	$\text{Am}^{4+} + e \rightleftharpoons \text{Am}^{3+}$	2.60
$\text{AgBr} + e \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{Br}^-$	0.07133	$\text{Am}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Am}$	-1.9
$\text{AgBrO}_3 + e \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{BrO}_3^-$	0.546	$\text{Am}^{3+} + 3e \rightleftharpoons \text{Am}$	-2.048
$\text{Ag}_2\text{C}_2\text{O}_4 + 2e \rightleftharpoons 2\text{Ag} + \text{C}_2\text{O}_4^{2-}$	0.4647	$\text{Am}^{3+} + e \rightleftharpoons \text{Am}^{2+}$	-2.3
$\text{AgCl} + e \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{Cl}^-$	0.22233	$\text{As} + 3\text{H}^+ + 3e \rightleftharpoons \text{AsH}_3$	-0.608
$\text{AgCN} + e \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{CN}^-$	-0.017	$\text{As}_2\text{O}_3 + 6\text{H}^+ + 6e \rightleftharpoons 2\text{As} + 3\text{H}_2\text{O}$	0.234
$\text{Ag}_2\text{CO}_3 + 2e \rightleftharpoons 2\text{Ag} + \text{CO}_3^{2-}$	0.47	$\text{HASO}_2 + 3\text{H}^+ + 3e \rightleftharpoons \text{As} + 2\text{H}_2\text{O}$	0.248
$\text{Ag}_2\text{CrO}_4 + 2e \rightleftharpoons 2\text{Ag} + \text{CrO}_4^{2-}$	0.4470	$\text{AsO}_2^- + 2\text{H}_2\text{O} + 3e \rightleftharpoons \text{As} + 4\text{OH}^-$	-0.68
$\text{AgF} + e \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{F}^-$	0.779	$\text{H}_3\text{AsO}_4 + 2\text{H}^+ + 2e \rightleftharpoons \text{HASO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	0.560
$\text{Ag}_4[\text{Fe(CN)}_6] + 4e \rightleftharpoons 4\text{Ag} + [\text{Fe(CN)}_6]^{4-}$	0.1478	$\text{AsO}_4^{3-} + 2\text{H}_2\text{O} + 2e \rightleftharpoons \text{AsO}_2^- + 4\text{OH}^-$	-0.71
$\text{AgI} + e \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{I}^-$	-0.15224	$\text{At}_2 + 2e \rightleftharpoons 2\text{At}^-$	0.3
$\text{AgIO}_3 + e \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{IO}_3^-$	0.354	$\text{Au}^+ + e \rightleftharpoons \text{Au}$	1.692
$\text{Ag}_2\text{MoO}_4 + 2e \rightleftharpoons 2\text{Ag} + \text{MoO}_4^{2-}$	0.4573	$\text{Au}^{3+} + 2e \rightleftharpoons \text{Au}^+$	1.401
$\text{AgNO}_2 + e \rightleftharpoons \text{Ag} + 2\text{NO}_2^-$	0.564	$\text{Au}^{3+} + 3e \rightleftharpoons \text{Au}$	1.498
$\text{Ag}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + 2e \rightleftharpoons 2\text{Ag} + 2\text{OH}^-$	0.342	$\text{Au}^{2+} + e \rightleftharpoons \text{Au}^+$	1.8
$\text{Ag}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} + 2e \rightleftharpoons 2\text{Ag} + 2\text{OH}^-$	0.739	$\text{AuOH}^{2+} + \text{H}^+ + 2e \rightleftharpoons \text{Au}^+ + \text{H}_2\text{O}$	1.32
$\text{Ag}^{3+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ag}^+$	1.9	$\text{AuBr}_2^- + e \rightleftharpoons \text{Au} + 2\text{Br}^-$	0.959
$\text{Ag}^{3+} + e \rightleftharpoons \text{Ag}^{2+}$	1.8	$\text{AuBr}_4^- + 3e \rightleftharpoons \text{Au} + 4\text{Br}^-$	0.854
$\text{Ag}_2\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + e \rightleftharpoons 2\text{Ag} + 2\text{H}_2\text{O}$	1.802	$\text{AuCl}_4^- + 3e \rightleftharpoons \text{Au} + 4\text{Cl}^-$	1.002
$2\text{Ag}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + 2e \rightleftharpoons \text{Ag}_2\text{O} + 2\text{OH}^-$	0.607	$\text{Au(OH)}_3 + 3\text{H}^+ + 3e \rightleftharpoons \text{Au} + 3\text{H}_2\text{O}$	1.45
$\text{AgOCN} + e \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{OCN}^-$	0.41	$\text{H}_2\text{BO}_3^- + 5\text{H}_2\text{O} + 8e \rightleftharpoons \text{BH}_4^- + 8\text{OH}^-$	-1.24
$\text{Ag}_2\text{S} + 2e \rightleftharpoons 2\text{Ag} + \text{S}^{2-}$	-0.691	$\text{H}_2\text{BO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 3e \rightleftharpoons \text{B} + 4\text{OH}^-$	-1.79
$\text{Ag}_2\text{S} + 2\text{H}^+ + 2e \rightleftharpoons 2\text{Ag} + \text{H}_2\text{S}$	-0.0366	$\text{H}_3\text{BO}_3 + 3\text{H}^+ + 3e \rightleftharpoons \text{B} + 3\text{H}_2\text{O}$	-0.8698
$\text{AgSCN} + e \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{SCN}^-$	0.08951	$\text{B(OH)}_3 + 7\text{H}^+ + 8e \rightleftharpoons \text{BH}_4^- + 3\text{H}_2\text{O}$	-0.481
$\text{Ag}_2\text{SeO}_3 + 2e \rightleftharpoons 2\text{Ag} + \text{SeO}_3^{2-}$	0.3629	$\text{Ba}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ba}$	-2.912
$\text{Ag}_2\text{SO}_4 + 2e \rightleftharpoons 2\text{Ag} + \text{SO}_4^{2-}$	0.654	$\text{Ba}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ba(Hg)}$	-1.570
$\text{Ag}_2\text{WO}_4 + 2e \rightleftharpoons 2\text{Ag} + \text{WO}_4^{2-}$	0.4660	$\text{Ba(OH)}_2 + 2e \rightleftharpoons \text{Ba} + 2\text{OH}^-$	-2.99
$\text{Al}^{3+} + 3e \rightleftharpoons \text{Al}$	-1.662	$\text{Be}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Be}$	-1.847
$\text{Al(OH)}_3 + 3e \rightleftharpoons \text{Al} + 3\text{OH}^-$	-2.31	$\text{Be}_2\text{O}_3^{2-} + 3\text{H}_2\text{O} + 4e \rightleftharpoons 2\text{Be} + 6\text{OH}^-$	-2.63

การวัดศักย์ไฟฟ้าของโลหะนั้นจะต้องมีขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน (Standard reference electrode) อยู่ด้วยขั้วหนึ่งคือวัดกับขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนมาตรฐาน (Standard hydrogen electrode, SHE) ในการใช้จะเขียนว่า (vs.SHE) ที่มาตรฐาน

ในทางการกักต่อน้ำที่นิยมใช้สำหรับเทคนิคโพเทนชิโอเมตรีได้แก่ ขั้วอิเล็กโทรดคาลอเมลที่อิ่มตัว (Saturated calomel electrode, SCE) ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์ - คลอไรด์ (Silver - silver chloride electrode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

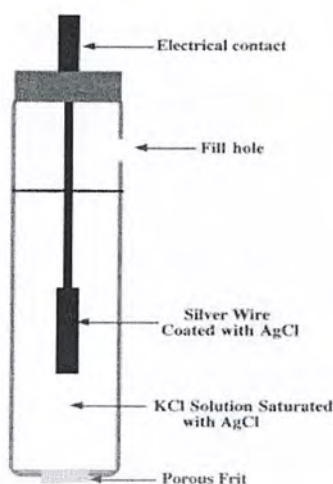
- ขั้วอิเล็กโทรดคาโลเมลที่อิ่มตัว (SCE) ประกอบด้วย หลอดแก้วสวมกัน 2 ชั้น หลอดแก้วชั้นในมีหลอดตัวนำจุ่มอยู่ในส่วนผสมของโลหะปรอทและเมอร์คิวไรต์คลอไรด์ ( $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ) หรือ คาโลเมล หลอดแก้วชั้นนอกเป็นสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) อิ่มตัว สารละลายจากหลอดแก้วทั้งสองชั้นติดต่อกันทางรูเล็กๆ ที่ก้นของหลอดแก้วตัวในที่หลอดแก้วตัวนอกซึ่งเป็นส่วนของขั้วไฟฟ้าที่ใช้จุ่มในสารละลายตัวอย่างมีรูที่ส่วนปลายหลอดรูปทรงแท่งทำหน้าที่เป็นสะพานเกลือของขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างขั้วอิเล็กโทรดคาโลเมลที่อิ่มตัว (Saturated calomel electrode, SCE) [5]

- ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์ - ซิลเวอร์คลอไรด์ ประกอบด้วย หลอดแก้วที่มีหลอดโลหะเงินเคลือบด้วยซิลเวอร์คลอไรด์จุ่มอยู่ในสารละลายอิ่มตัวของโพแทสเซียมคลอไรด์และซิลเวอร์คลอไรด์ ส่วนปลายของหลอดแก้วเป็นแผ่นรูพรุนกึ่งส่วนของโพแทสเซียมคลอไรด์กับสารละลายตัวอย่างดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างขั้วซิลเวอร์ – ซิลเวอร์คลอไรด์ (Silver - silver chloride electrode) [5]

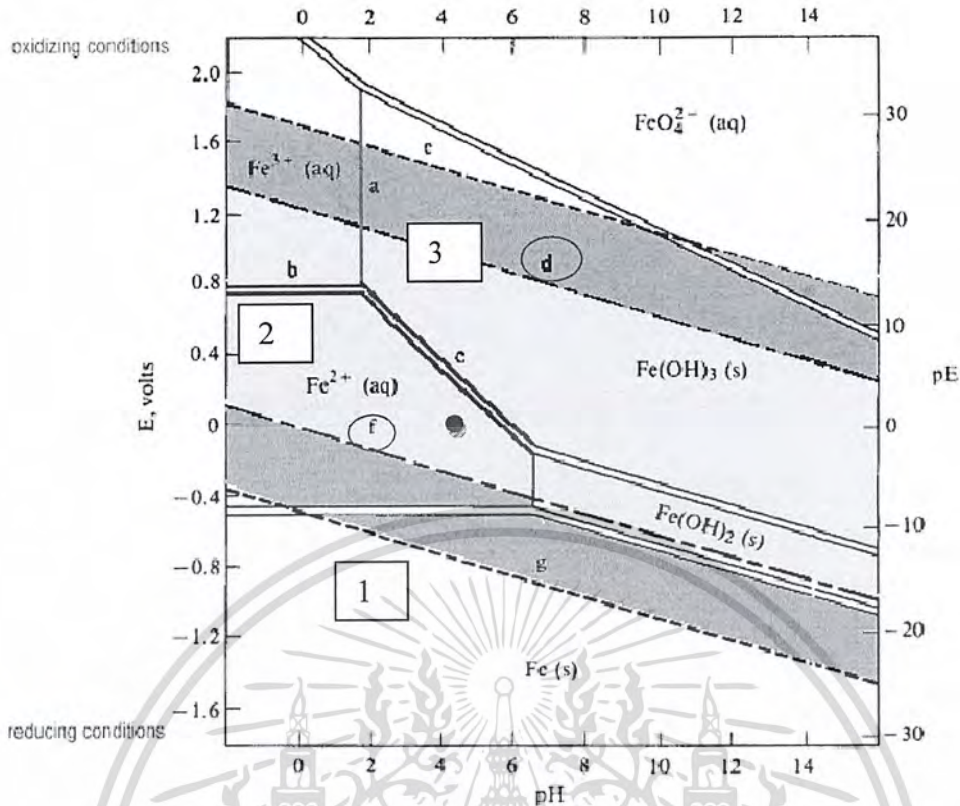
ตาราง 2.2 ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง [6]

Name	Half-Cell Reaction	Potential V vs. SHE
Mercury–Mercurous Sulfate	$\text{HgSO}_4 + 2e^- = \text{Hg} + \text{SO}_4^{2-}$	+0.615
Copper - Copper Sulfate	$\text{CuSO}_4 + 2e^- = \text{Cu} + \text{SO}_4^{2-}$	+0.31
Saturated Calomel	$\text{Hg}_2\text{Cl}_2 + 2e^- = 2\text{Hg} + 2\text{Cl}^-$	+0.241
Silver - Silver Chloride	$\text{AgCl} + e^- = \text{Ag} + \text{Cl}^-$	+0.222
Standard Hydrogen	$2\text{H}^+ + 2e^- = \text{H}_2$	+0.000

### 2.1.3 แผนภูมิพัวเบ

ปฏิกิริยาของโลหะกับน้ำเป็นปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งความสัมพันธ์กับความต่างศักย์ pH การศึกษาต้องใช้สมการของเนินสต์และความสามารถในการละลาย (Solubility) ของสารประกอบแต่ละชนิดของโลหะ นอกจากนั้นยังสามารถตรวจสอบดูได้ว่า โลหะ อีออน หรือ สารประกอบที่เกิดมีเสถียรภาพอยู่ที่สภาวะใด ดังรูปที่ 2.4 [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แผนภูมิพั่วของระบบ Fe - H<sub>2</sub>O [7]

จากรูป เส้นประ f และ d แสดงถึงความต่างศักย์ที่มีความสมดุลของขั้วที่เกิดไฮโดรเจนและขั้วที่เกิดออกซิเจนบริเวณใต้เส้นประ f จะเป็นสภาวะที่เกิดก๊าซไฮโดรเจนได้ ส่วนบริเวณเหนือเส้นประ d นั้นก็จะเกิดก๊าซออกซิเจนได้

จากแผนภูมิจะแบ่งเป็น 3 บริเวณด้วยกันคือ เลข 1 บริเวณที่ไม่เกิดการกัดกร่อน (Immune) เลข 2 บริเวณที่มีฟิล์มป้องกันเคลือบอยู่ (Passive) และเลข 3 บริเวณที่การกัดกร่อนจะดำเนินไปได้ (Active)

จากแผนภูมินี้สามารถทำนายเกี่ยวกับเงื่อนไขการเกิดการกัดกร่อนและป้องกันการกัดกร่อนโลหะได้ยกตัวอย่างเช่น เหล็กจะเกิดการกัดกร่อนแบบมีก๊าซ H<sub>2</sub> ในบริเวณใต้เส้นประ f และในเขตที่มีการเกิดการกัดกร่อนส่วนในบริเวณระหว่างเส้นประ f และ d บวกกับเขตที่มีการกัดกร่อนจะเกิดการกัดกร่อนแบบก๊าซ O<sub>2</sub> ถูกใช้ไป ในกรณี pH มากกว่า 9.5 ก็จะไม่เกิดการกัดกร่อน นอกจากนั้นหากนำชิ้นเหล็กแช่ในสารละลาย เช่น จุด ● จะสามารถคาดการณ์ได้ว่าสามารถป้องกันชิ้นเหล็กไม่ให้เกิดการกัดกร่อนได้โดยปรับความต่างศักย์ไปทางบวกคือเข้าไปในเขต passive หรือเพิ่มค่า pH เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

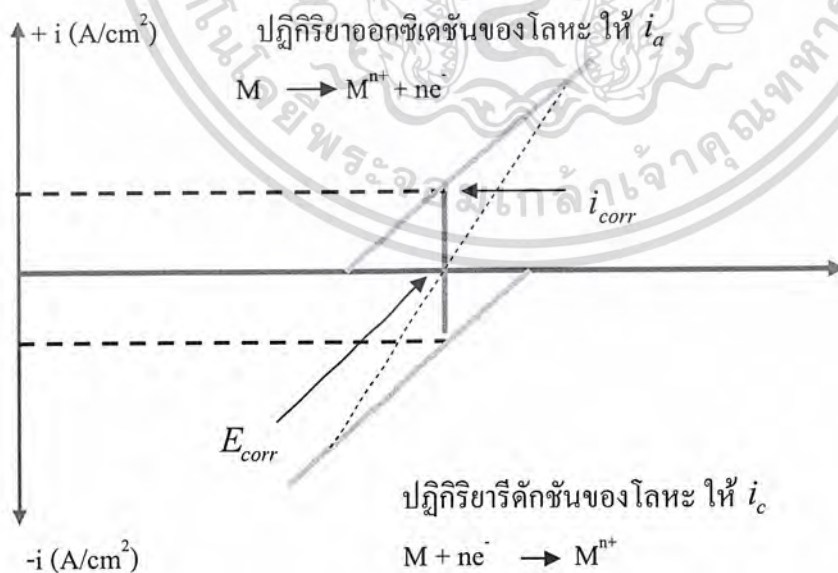
### 2.1.4 หลักการโพลาริเซชัน (Polarization)

เมื่อโลหะเกิดการกัดกร่อนขึ้น โดยเกิดการลัดวงจร (Shot circuiting) ชั้นของเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันขึ้นบนผิวโลหะศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณแอโนดและแคโทดจะเสียดสมดุลและจะเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าให้เข้าสู่ค่าศักย์ไฟฟ้าใหม่ การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าจากค่าสมดุลเข้าสู่ค่าใหม่นี้จะทำให้เกิดกระแสไหลเกิดขึ้นที่เรียกว่าโพลาริเซชัน (Polarization) ซึ่งพฤติกรรมที่ผิวโลหะมี 2 แบบดังนี้

- หากมีอิเล็กตรอนมาคั่งอยู่ที่ผิวโลหะมาก ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวโลหะมีค่าเป็นลบมากขึ้น แสดงว่าในเวลาดังกล่าวปฏิกิริยาไม่ได้ดำเนินไปอย่างรวดเร็วเท่าจำนวนอิเล็กตรอนที่อยู่ในระบบทำให้การเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนจะถูกควบคุม โดยอัตราเร็วของปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด เหตุการณ์นี้เรียกว่าแคโทดิกโพลาริเซชัน (Cathodic polarization)

- หากอิเล็กตรอนที่ผิวโลหะมีไม่เพียงพอทำให้ศักย์ไฟฟ้าบนผิวโลหะมีค่าเป็นบวกมากขึ้น และมีผลในการเร่งอัตราการกัดกร่อน การเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วของปฏิกิริยาการกัดกร่อนจะถูกควบคุมโดยอัตราของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนดแทน ซึ่งเหตุการณ์นี้เราเรียกว่าแอโนดิกโพลาริเซชัน (Anodic polarization) อาจกล่าวได้ว่าถ้าวัดศักย์ไฟฟ้าที่ผิวโลหะได้ค่าบวกมากขึ้น หมายความว่าฤทธิ์กัดกร่อนของสารละลายจะเพิ่มสูงขึ้นเพราะแอโนดิกโพลาริเซชัน

การวิเคราะห์การกัดกร่อน โดยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงไปของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (ค่ากระแสไฟฟ้า) เมื่อเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของระบบไป ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ ดังรูปที่ 2.5 [8]



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าเมื่อศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนไป [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโลหะจะสูญเสียอิเล็กตรอนมากขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้มากทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆเมื่อศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปทางบวกสูงขึ้น โดยกระแสไฟฟ้านี้เราเรียกว่ากระแสไฟฟ้าแอโนดิก ( $i_a$ ) ในขณะที่เดียวกันเมื่อเกิดปฏิกิริยารีดักชันจะทำให้เกิดการลดลงของอิเล็กตรอนที่หน้าขั้ว จนกระทั่งเมื่ออิเล็กตรอนที่หน้าขั้วไม่เกิดการคั่งอแล้วกระแสไฟฟ้าที่จุดนี้ก็จะหมดไป เนื่องจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจะมีเพิ่มมากขึ้นและเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะเกิดการขาดแคลนอิเล็กตรอนแทน ซึ่งเราเรียกกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระแสไฟฟ้าแคโทดิก ( $i_c$ ) จากรูปที่ 2.5 กระแสแลกเปลี่ยน ( $i_a = i_c$ ) ณ จุดนี้เราเรียกค่ากระแสไฟฟ้านี้ว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current,  $i_{corr}$ ) โดยที่ศักย์ไฟฟ้าจุดดังกล่าวเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential,  $E_{corr}$ ) ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการส่งผ่านของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นครั้งแรกเป็นปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าที่เป็นค่าทำให้วัสดุเกิดการกัดกร่อนขึ้น

### 2.1.5 การสร้างชั้นป้องกัน (Passivity)

การสร้างชั้นฟิล์มป้องกันสามารถอธิบายได้ว่า เป็นกระบวนการบำบัดทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยสารออกซิเดนต์อ่อนๆ (Mild oxidizing agent) เช่น สารละลายกรดไนตริก เพื่อสร้างสภาวะที่เหมาะสมของผิวหน้าให้สร้างฟิล์มป้องกันการกัดกร่อนสม่ำเสมอทั่วผิวหน้า [9]

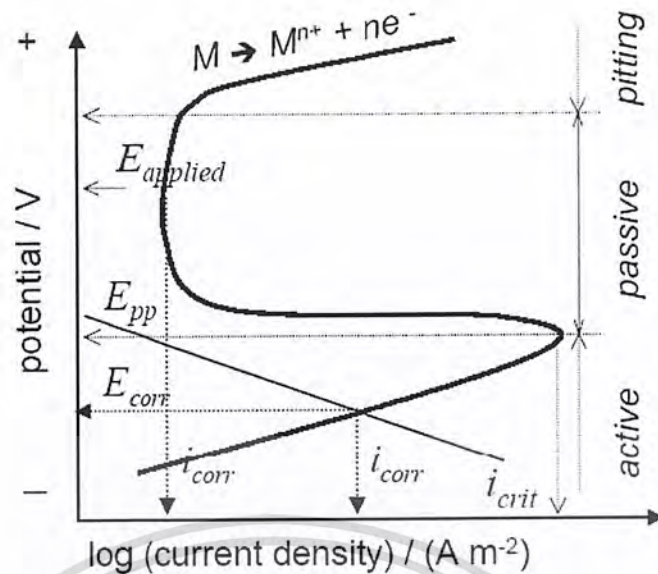
ทฤษฎีการสร้างชั้นป้องกันนั้นจะมีการเกิดฟิล์มบางมากนิยามด้วยสมมติฐานของฟิล์มออกซิเดชันกับสมมติฐานของการดูดซับ

- สมมติฐานออกซิเดชัน กล่าวไว้ว่าการสร้างชั้นฟิล์มบนผิวโลหะเกิดจากไฮดรอกไซด์สารประกอบอื่นๆจากปฏิกิริยา ฟิล์มนี้เหมือนเกราะป้องกันการแพร่ทำให้เนื้อโลหะถูกตัดจากสิ่งแวดล้อมจึงทำให้ความเร็วของการกัดกร่อนลดลง

- สมมติฐานการดูดซับ กล่าวไว้ว่าเป็นเพราะออกซิเจนหรือไอออนของออกไซด์เกิดการดูดซับทางเคมีของโมเลกุลของโลหะ ทำให้น้ำซึ่งดูดซับอยู่ก่อนที่ผิวของโลหะนั้นถูกขับไล่ออกก่อน ผลก็คือความเร็วของการละลายของโลหะช้าลง โดยเฉพาะโลหะทรานซิชันจะเกิดการสร้างฟิล์มป้องกัน ได้ง่ายเพราะภายในอะตอมของโลหะที่ระดับพลังงานย่อย d (Sub shell, d) จะมีอิเล็กตรอนเดี่ยวอยู่ อิเล็กตรอนนี้สามารถเกิดพันธะโคเวเลนต์อย่างเหนียวแน่นกับอิเล็กตรอนเดี่ยวของออกซิเจนได้ดี [10]

การสร้างชั้นฟิล์มป้องกันในทางเคมีไฟฟ้า โดยการนำเหล็กจุ่มในกรดกำมะถัน 1 N ซึ่งได้ขจัดออกซิเจนออกไปแล้ว โดยมีการต่อขั้วเข้าด้วยกันตั้งให้ได้ความต่างศักย์ระดับปกติของเหล็กแล้วค่อยๆให้ค่าเป็นบวกทีละขั้น โดยอาศัยอุปกรณ์โพเทนชิโอสแตต (Potentiostat) แล้ววัดค่ากระแสที่เปลี่ยนแปลงนำค่าที่ได้เขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความหนาแน่น

เอกสารเชิงกระแสแสดงรูปที่ 2.6 สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 Anodic polarization ของโลหะ passivity [10]

## 2.2 เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316

### 2.2.1 เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)

เหล็ก (Iron) สิ่งหลักที่จะถูกมองคือในเรื่องของการกัดกร่อน เช่น การทำปฏิกิริยากับอากาศเกิดเป็นสนิม การกัดกร่อนในกรดและระดับไอจากบรรยากาศในเตา (Furnace atmospheres) จนกระทั่งได้มีโลหะผสมของเหล็ก (Iron-base alloys) และโลหะผสมโครเมียม – นิกเกิล (Iron-chromium-nickel alloys) ในนามที่เรารู้จักกันดีคือ เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steels) ซึ่งจะไม่เกิดสนิมในน้ำทะเลด้านความเข้มข้นของกรดจึงเป็นที่นิยมใช้เพราะมีสมบัติทางกลที่ดีอีกด้วย

การพัฒนาเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steels) ได้เกิดเมื่อมีการเริ่มศตวรรษแรกแต่ก็ยังไม่เป็นที่นิยมมากต่อมาประมาณปี ค.ศ. 1910 การทำงานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุได้เกิดปัญหา ในกระบวนการผลิตหลายที่ทั่วโลก จึงมีผู้ทดลองและพัฒนาเหล็กกล้าไร้สนิมขึ้น

ในเมือง Sheffield ในประเทศอังกฤษ H. Brearly ได้พยายามคิดค้นวัสดุใหม่ที่สามารถป้องกันปืนหนัก (Heavy gun) ซึ่งมันจะมีประสิทธิภาพมากในการทนการกัดกร่อนเนื่องจากการขัดสี (Abrasive wear) โดยการผสมโครเมียมลงในส่วนประกอบของเหล็กและทดลองว่าเหล็กที่มีส่วนผสมของโครเมียมจะไม่ถูกกัดกร่อน โดยใช้กรดในการทดลองนี้นำไปสู่การจดสิทธิบัตรของเหล็กที่มีโครเมียม 9-16% และมีคาร์บอนน้อยกว่า 0.7% ทำให้เกิดเหล็กกล้าไร้สนิมขึ้นเป็นครั้งแรก

ในเวลาใกล้เคียงกัน B. Strauss ทำงานอยู่ในประเทศเยอรมันค้นพบวัสดุที่ใช้ในการทำท่อที่ใช้สำหรับทำเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples) และไพโรมิเตอร์ (Pyrometers) โดยใช้โลหะผสมของเหล็ก (Iron-base alloys) และโลหะผสมโครเมียม-นิกเกิล (Iron-chromium-nickel alloys)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรเอาไปใช้ในเชิงพาณิชย์ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีส่วนผสมโครเมียมที่สูงจึงทดลองทดสอบตัวอย่างโลหะผสมพบว่ามีส่วนผสมของ 20% Cr ซึ่งทำให้ไม่เกิดสนิม การทดลองนี้นำไปสู่เหล็กที่มีส่วนผสม 0.25% C 20% Cr 7% Nickel ทำให้เกิดเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดกลุ่มออสเทนนิติก (Austenitic) ขึ้นครั้งแรก

ขณะที่มีการทดลองที่ประเทศอังกฤษและเยอรมัน F.M. Becket ได้กำลังคิดค้นอยู่ในน้ำตกในแอ่งการ่าในประเทศสหรัฐอเมริกาเพื่อหาวัสดุที่ทนและทนความร้อนสูง (Scaling-resistant) สำหรับทำรางน้ำที่ใส่เข้าไปในเตาเผาที่มีอุณหภูมิสูงถึง 1200°C เขาได้ค้นพบว่า ที่ 20% Cr ทนต่อการต้านทานการกัดกร่อน (Achieve resistance) นี้เป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาของเหล็กกล้าที่ทนความร้อน (Heat-resistant steels) เมื่อผ่านจากสงครามโลกครั้งที่ 2 มีการเจริญโตและใช้เหล็กกล้าไร้สนิมแพร่หลายมากทั่วโลก [11]

### 2.2.2 ประเภทและเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิม

มากกว่า 1 ปีตั้งแต่เริ่มมีการพัฒนาเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดและเกรดของเหล็กกล้ามีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งในตารางได้แสดงแบ่งชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมตามมาตรฐานที่ใช้ในสหรัฐอเมริกาและยุโรป เหล็กกล้าไร้สนิม แบ่งออกเป็น 6 กลุ่มคือ Martensitic Martensitic-austenitic Ferritic Ferritic-austenitic Austenitic และ Precipitation hardening steels โดย 5 ชื่อแรกได้มาจากส่วนผสมของโครงสร้างระดับจุลภาคที่แตกต่างกัน ส่วนชื่อท้ายสุดได้มาจากการบ่มแข็งโดยการตกผลึก (Precipitation) ของสารประกอบระหว่างโลหะในเนื้อเหล็กซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการบ่มแข็ง ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความแตกต่างของประเภทเหล็กกล้าไร้สนิม [11]

Steel category	Composition (wt%)					Hardenable	Ferro-magnetism
	C	Cr	Ni	Mo	Others		
Martensitic	>0.10	11-14	0-1	-	V	Hardenable	Magnetic
	>0.17	16-18	0-2	0-2			
Martensitic-austenitic	<0.10	12-18	4-6	1-2		Hardenable	Magnetic
Precipitation hardening		15-17	7-8	0-2	Al	Hardenable	Magnetic
		12-17	4-8	0-2	Al,Cu,Ti,Nb		
Ferritic	<0.08	12-19	0-5	<5	Ti	Not hardenable	Magnetic
	<0.25	24-28	-	-			
Ferritic-austenitic (duplex)	<0.05	18-27	4-7	1-4	N, W	Not hardenable	Magnetic
Austenitic	<0.08	16-30	8-35	0-7	N,Cu,Ti,Nb	Not hardenable	Non-magnetic

เอกสารนี้เป็นเอกสารของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ เมื่อผู้ผู้คิดค้นพบใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่อาจละเลยที่จะเป็นพื้นฐานของผลของธาตุต่างๆที่ผสมลงในเหล็ก จะใช้ 2 สมการในการคำนวณคือ

Chromium equivalent = %Cr + 1.5 x %Si + %Mo

Nickel equivalent = %Ni + 30 x (%C + %N) + 0.5 x (%Mn + %Cu + %Co)

สมการค่าเทียบเท่าโครเมียม (Chromium equivalent) และค่าเทียบเท่า निकเกิล (Nickel equivalent) โดยธาตุที่มีแนวโน้มของพฤติกรรมคล้ายกับโครเมียมนั้นจะทำให้เกิดโครงสร้างเฟอร์ไรท์ (Ferrite) และในขณะเดียวกันกับธาตุที่มีแนวโน้มของพฤติกรรมคล้ายกับนิกเกิลจะทำให้เกิดโครงสร้างออสเตนไนท์ (Austenite) ดังปรากฏอยู่ใน 2 สมการในการคำนวณค่าเทียบเท่าของโครเมียมและนิกเกิลนั้นจะใช้การวิเคราะห์ทางเคมีของโลหะชิ้นงาน (Base metal)

## 2.3 การกัดกร่อนและสมบัติของการกัดกร่อน (Corrosion and corrosion properties)

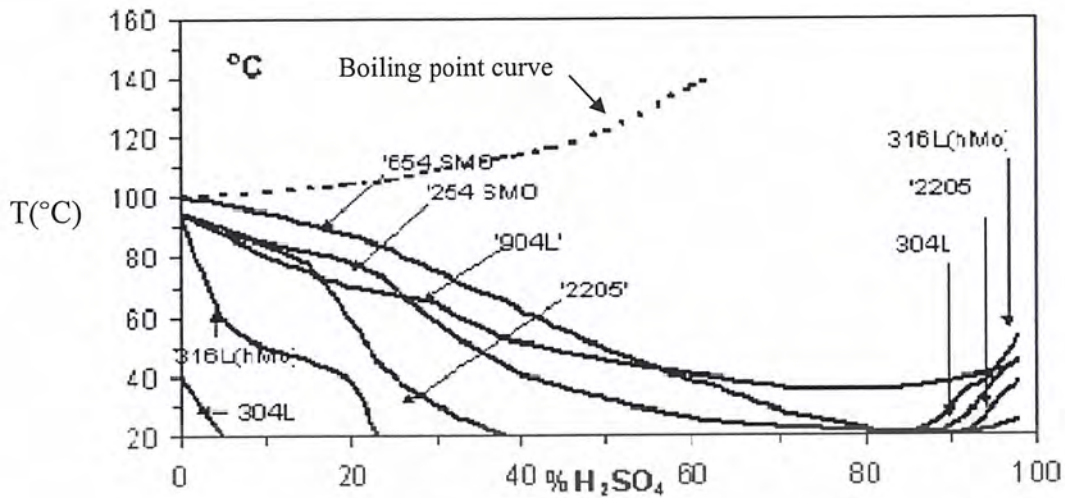
สิ่งสำคัญของสมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิมที่นิยมใช้คือทนทานต่อการกัดกร่อนแต่อย่างไรก็ตามเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถที่เกิดสนิมและกัดกร่อนถ้านำไปใช้อย่างไม่ถูกต้อง

### 2.3.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion)

การกัดกร่อนแบบนี้สามารถพบเห็นได้ทั่วไปโลหะจะถูกกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวหน้าของโลหะมีผลให้โลหะบางลงเรื่อยๆหรือมีน้ำหนักรายไปกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวหน้าปกติจะเกิดขึ้นในกรดและสารละลายที่ประกอบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Hot caustic solutions) การต้านทานการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มปริมาณโครเมียม นิกเกิลและโมลิบดีนัม แต่ก็มีข้อยกเว้นถ้าถูกออกซิไดซ์ด้วยกรดไนตริกหรือกรดโครมิกเข้มข้นที่ร้อนการเพิ่มโมลิบดีนัมจะไม่มีผล

สถานะจะรุนแรงเพิ่มมากขึ้นถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิและมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรด ในกรดชนิดเดียวกันกรดที่มีความเข้มข้นจะรุนแรงมากกว่ากรดที่เจือจาง ซึ่งในการพิจารณาผลของอุณหภูมิและผลของความเข้มข้นต่อการต้านทานการกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวหน้าของวัสดุในแต่ละสถานะสิ่งแวดล้อมภายใต้อัตราการกัดกร่อน 0.1 mm/year อธิบายโดยใช้ Isocorrosion diagram ดังรูปที่ 2.7

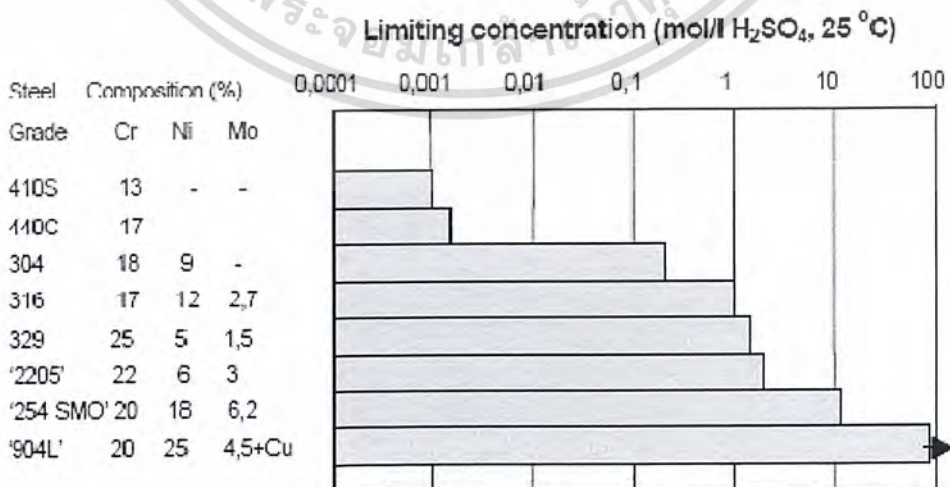
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 Isocorrosion diagram ของกรดซัลฟิวริกบริสุทธิ์ภายใต้อัตราการกัดกร่อน 0.1 mm/year [12]

จาก Isocorrosion diagrams จะแสดงให้เห็นว่าความรุนแรงของกรดซัลฟิวริกจะเพิ่มมากขึ้นถ้าอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น ซึ่งความรุนแรงสูงสุดที่ความเข้มข้นในช่วง 40-70 % กรดซัลฟิวริก เข้มข้นรุนแรงจะน้อยกว่ากรดซัลฟิวริกเจือจางเกรด 904L ประกอบด้วย 20Cr-25Ni-4.5Mo-1.5Cu แสดงให้เห็นว่าด้านทานการกัดกร่อนดีเหลือเกินนี้จึงถูกพัฒนาให้ใช้ในสภาวะแวดล้อมที่มีกรดซัลฟิวริก

ผลของธาตุที่ผสมลงในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมอธิบายได้ในรูปที่ 2.8 บอกถึงขีดจำกัดของความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นสูงสุดของแต่ละเกรดก่อนที่จะสูญเสียชั้นป้องกัน เป็นผลมาจากปริมาณ โครเมียม นิกเกิล โมลิบดีนัมที่สูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม

### 2.3.2 การกัดกร่อนแบบหลุมและการกัดกร่อนในที่อับ (Pitting and crevice corrosion)

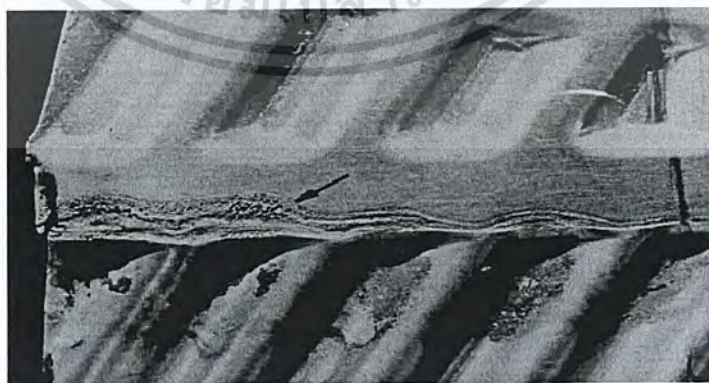
การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเฉพาะจุด (Localized attack) ที่รุนแรงมากการป้องกันด้วยชั้นฟิล์มไม่ได้ดีเสมอไปแต่บ่อยที่จะเกิดจุดบกพร่องถ้ามีหมู่ฮาโลเจน เช่น คลอไรด์อยู่ในสภาวะสิ่งแวดล้อม จะสามารถทำลายชั้นป้องกันได้และปรากฏชั้นฟิล์มที่เติบโตใหม่เป็นจุดเริ่มต้นในการเกิด การกัดกร่อนเฉพาะที่ ทั้งการกัดกร่อนแบบหลุมและการกัดกร่อนในที่อับจะเกิดขึ้นในสารละลายที่มีคลอไรด์ เช่น น้ำทะเล

การกัดกร่อนแบบหลุมหรือเรียกว่าการกัดกร่อนแบบสนิมขุมซึ่งเกิดขึ้นเมื่อ โลหะถูก สารละลายกัดกร่อนเฉพาะจุดส่งผลให้เกิดหลุมขนาดเล็กเกิดขึ้น

การกัดกร่อนในที่อับเป็นรูปแบบการกัดกร่อนในที่อับเกิดขึ้นในพื้นที่อับบนผิวโลหะ ที่สัมผัสโดยตรงกับสารกัดกร่อนการกัดกร่อนประเภทนี้เกี่ยวข้องกับปริมาณของสารละลายที่ค้าง อยู่ตามพื้นที่ที่เป็นหลุมหรือซอกบริเวณแคบๆที่มีสารละลายเข้าไปขังอยู่ได้เป็นเวลานาน โดยไม่มีการถ่ายเท ทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำหรือสารละลายภายในซอกไม่เท่ากับภายนอก ส่งผลให้เกิดสภาวะการครบเซลล์การกัดกร่อนชนิดเซลล์ความเข้มข้น (Concentration cell)



รูปที่ 2.9 การกัดกร่อนแบบหลุมบนท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ในน้ำกร่อย [14]



รูปที่ 2.10 การกัดกร่อนในที่อับภายใต้ประเก็นยางใน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้

ในน้ำกร่อย [14]

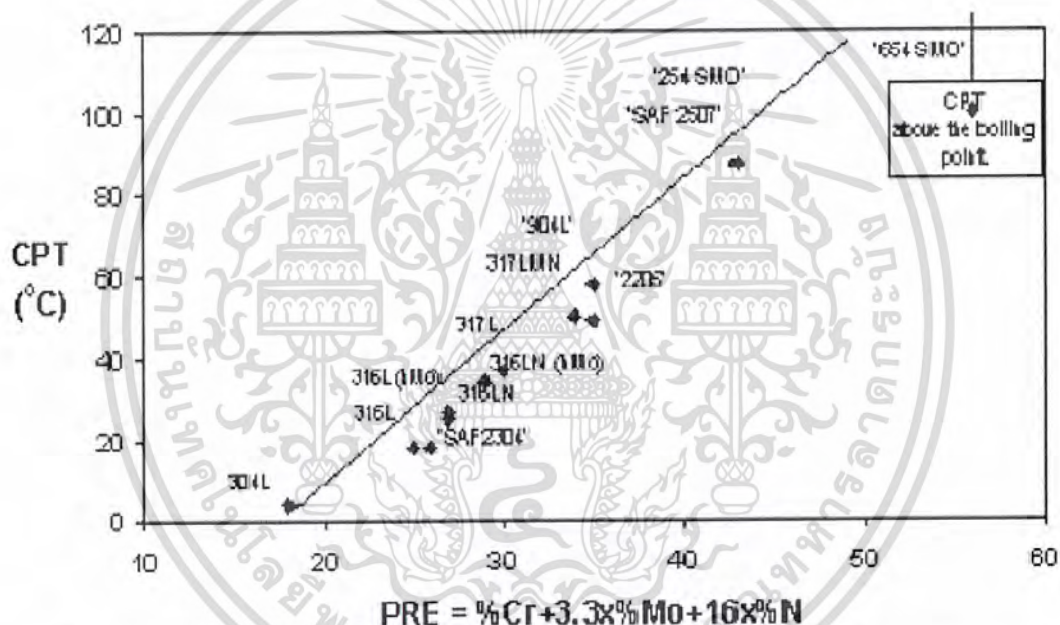
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครเมียม (Chromium) โมลิบดีนัม (Molybdenum) และไนโตรเจน (Nitrogen) คือธาตุผสมที่เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมและการกัดกร่อนในที่อับ การต้านทานการกัดกร่อนเฉพาะที่ในน้ำทะเลต้องการโมลิบดีนัม 6% หรือมากกว่า

นอกจากนี้การที่จะบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานจากการกัดกร่อนแบบหลุมของการผสมกันของธาตุที่เจือในเหล็กกล้าไร้สนิมคือ Pitting Resistance Equivalent (PRE)

$$PRE = \%Cr + 3.3 \%Mo + 16 \%N$$

ค่า PRE จะมีการต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมได้จนถึงอุณหภูมิหนึ่งเท่านั้นซึ่งก็คือ Critical pitting temperature (CPT) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง PRE และ CPT แล้วจะได้กราฟเส้นตรง ซึ่งหมายความว่าเมื่อธาตุต่างๆผสมลงไปมากขึ้นจะทำให้ต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น

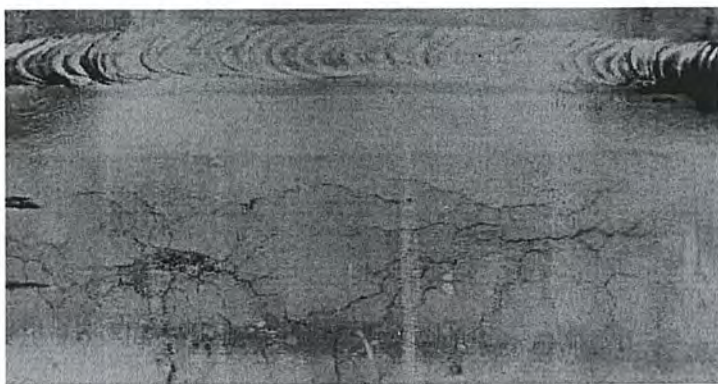


รูปที่ 2.11 กราฟระหว่าง Critical pitting temperature (CPT) ใน NaCl 1 M กับค่า PRE [14]

### 2.3.3 การแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน (Stress corrosion cracking)

การกัดกร่อนชนิดนี้จะเกิดกับโลหะที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีสารกัดกร่อนและมีความเค้นแรงดึงกระทำกับโลหะ ความเค้นนี้อาจเป็นความเค้นตค้างหรือความเค้นภายนอกที่มากระทำ การเสียหายแบบนี้ผิวโลหะอาจไม่ถูกกัดกร่อนหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลยแต่ในเนื้อโลหะจะมีรอยร้าวเล็ก ๆ อยู่มากมาย ตัวอย่างโลหะที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ เช่น ทองเหลืองจะไม่ทนต่อแอมโมเนีย ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมจะไม่ทนต่อไอออนของคลอไรด์ เป็นต้น ลักษณะของการกัดกร่อนที่มีความเค้นเข้ามาเกี่ยวข้องจะมีลักษณะรอยร้าวเป็นกิ่งก้าน โดยที่รอยร้าวนี้อาจเกิดตามขอบ

เอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

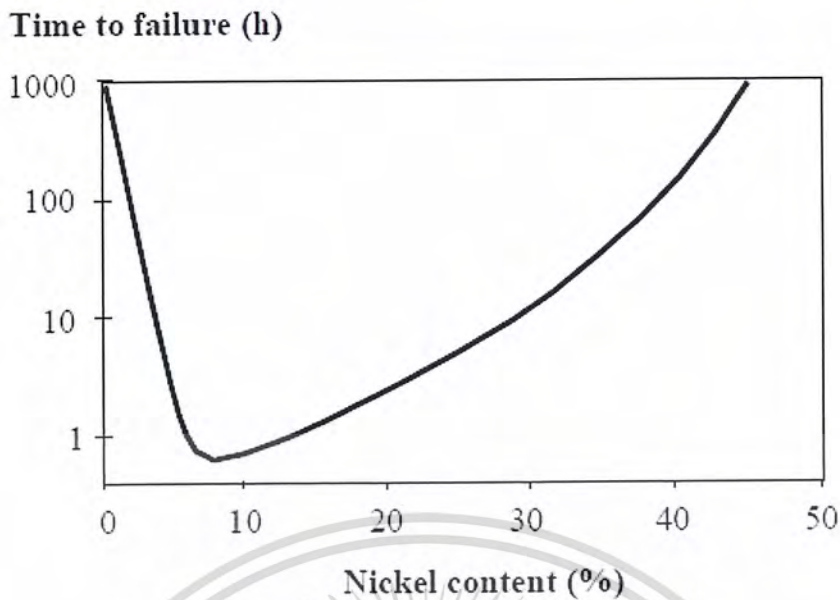


รูปที่ 2.12 การแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อนที่รอยเชื่อมของท่อเหล็กกล้าไร้สนิม ประกอบด้วยสิ่งแวดล้อมที่มีคลอไรด์และอุณหภูมิ 100°C [14]

ปริมาณ นิกเกิลและโครงสร้างระดับจุลภาคมีผลต่อการเกิด SCC ปริมาณของนิกเกิล ไม่ว่าจะมากหรือน้อยก็ส่งผลต่อการแตกร้าวเนื่องจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน (Stress corrosion cracking) ในกรณีที่ประกอบด้วยนิกเกิลในปริมาณที่น้อย โครงสร้างจะเป็นเฟอร์ริติก (Ferritic) หรือ เฟอร์ริติก-ออสเทนนิติก (Ferritic-Austenitic) เฟสของเฟอร์ริติก (Ferrite) ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีการต้านทานการกัดกร่อนแบบ SCC มาก

ความแข็งแรงของเหล็กเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความต้านทานต่อการเกิดการแตกร้าวจากไฮโดรเจน (Hydrogen embrittlement) ถ้ามีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นก็จะเพิ่มความต้านทานการแตกร้าวจากไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 2.13 จะเห็นว่าแสดงถึงผลของปริมาณนิกเกิลในเหล็กโครเมียมมีผลต่อการกัดกร่อนแบบ SCC ปริมาณนิกเกิลน้อยหรือมากมีผลต่อการต้านทานการกัดกร่อน ที่ปริมาณนิกเกิลน้อยเนื่องมาจากโครงสร้างเฟอร์ริติก หรือ เฟอร์ริติก-ออสเทนนิติก เฟสเฟอร์ริติกต้านทานการกัดกร่อนที่นิกเกิลมากมาจากการต้านทานการแตกร้าวจากไฮโดรเจนยังมีค่ามากยิ่งขึ้นแข็งแรงมาก



รูปที่ 2.13 SCC กับปริมาณนิกเกิล [14]

#### 2.3.4 การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion)

การกัดกร่อนตามขอบเกรนเกิดขึ้นเนื่องจากเกิดการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์ บริเวณขอบเกรน ที่อุณหภูมิสูงประมาณ  $550^{\circ}\text{C} - 800^{\circ}\text{C}$  สาเหตุเกิดจากการเชื่อมของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic stainless steels) ให้เย็นตัวผ่านช่วงวิกฤตอย่างช้าๆ คาร์บอนในเหล็กกล้าไร้สนิมจะตกผลึกออกจากสารละลายของแข็งและรวมตัวกับโครเมียมกลายเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ ดังนั้นปริมาณโครเมียมในเนื้อโลหะที่ใกล้เคียงกับขอบเกรนจะลดลงและความต้านทานการกัดกร่อนจะลดลงอย่างรุนแรง ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า "การตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์" (Chromium carbide precipitation)

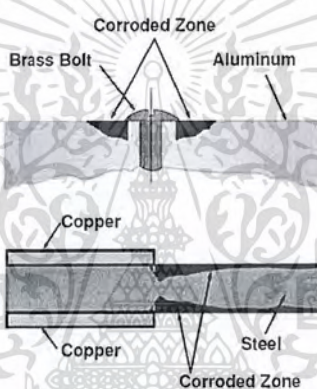


รูปที่ 2.14 การกัดกร่อนตามขอบเกรนที่ใกล้กับรอยเชื่อมในขอเกี่ยวของเหล็กกล้าไร้สนิม 316 ใช้ในการบรรจุกรดซัลฟิวริก [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.5 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion)

การกัดกร่อนแบบกัลวานิกเป็นรูปแบบหนึ่งของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเมื่อมีวัสดุที่ต่างกัน 2 ชนิด มาเชื่อมทางไฟฟ้าต่อกันหรือสัมผัสกันทางกายภาพ หรือสัมผัสกับสารละลายที่นำไฟฟ้า เช่น อิเล็กโทรไลต์ เมื่อครบองค์ประกอบดังกล่าวจะเกิดการสร้างเซลล์ทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical cell) ส่งผลให้วัสดุที่มีศักย์ทางไฟฟ้าต่ำกว่าซึ่งมีแสดงตัวเป็นขั้วแอโนดมีอัตราการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้น ในขณะที่วัสดุที่มีศักย์ทางไฟฟ้าสูงกว่าซึ่งแสดงตัวเป็นขั้วแคโทดจะมีความต้านทานการกัดกร่อนดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.15 ในขณะที่ตัวอย่างการกัดกร่อนแบบกัลวานิกที่เกิดขึ้นจริงแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งส่วนใหญ่มักจะสังเกตเห็นได้ในบริเวณที่วัสดุต่างชนิดกันสัมผัสกัน เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าและความแตกต่างของโลหะจึงมีการเรียกการกัดกร่อนแบบนี้ว่า การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion)



รูปที่ 2.15 ลักษณะการกัดกร่อนแบบกัลวานิก [16]

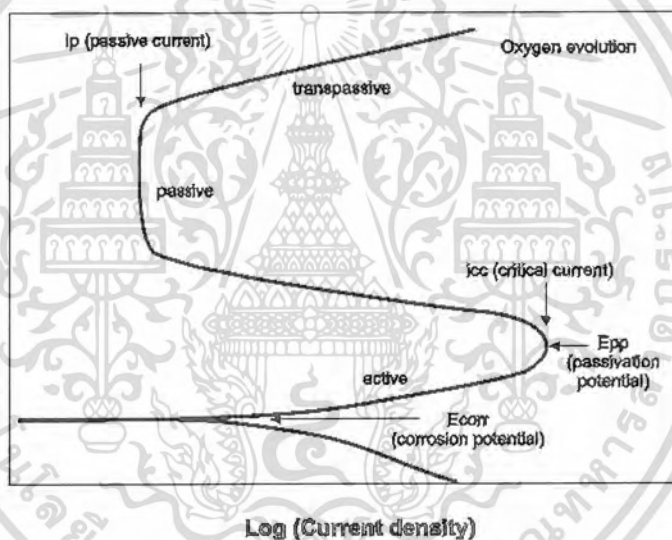


รูปที่ 2.16 การกัดกร่อนแบบกัลวานิกของการเชื่อมเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กเหนียวในน้ำทะเล [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.6 เทคนิคโพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชัน (Potentiodynamic polarization)

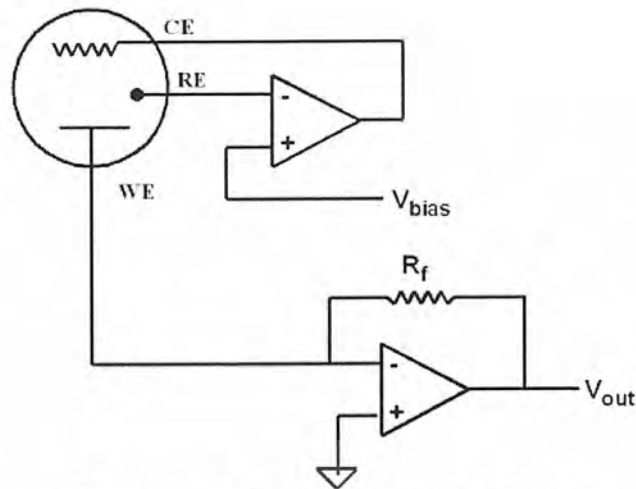
เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานตัวอย่างในสภาพสิ่งแวดล้อมที่กำหนดโดยเฉพาะโลหะผสมที่มีสมบัติ Active-passive หรือโลหะผสมที่มีฟิล์มป้องกัน (Passive film) โดยจะใช้ชิ้นงานโลหะตัวอย่างเป็นขั้วทำงาน (Working electrode) โดยอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีสถานะของความเข้มข้น อุณหภูมิ หรือปริมาณออกซิเจนในสารละลายตามกำหนดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมาตรฐาน (Reference electrode) ทำการต่อให้ครบวงจรทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าเพื่อเร่งการกัดกร่อนผ่านขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode) ทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าเริ่มที่ค่าต่ำกว่าค่าศักย์ไฟฟ้า  $E_{\text{corr}}$  ไปทางบวกที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แล้วติดตามตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆ ซึ่งกระแสจะลดลงเมื่อเกิดฟิล์มป้องกันและจะเพิ่มขึ้นทันทีเมื่อฟิล์มแตกจะได้เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าหรือกราฟโพลาริเซชันแสดงดังรูปที่ 2.17 [18]



รูปที่ 2.17 กราฟโพลาริเซชันจากการทดลองวิธี โพเทนซิโอดนามิกโพลาริเซชัน [18]

รูปแบบของการติดตั้งการทดสอบโดยวิธีโพเทนซิโอสแตทประกอบด้วยชิ้นโลหะทดสอบขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและขั้วไฟฟ้าช่วยจุ่มลงไปนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำการเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องโพเทนซิโอสแตท กระแสที่ออกมาจะถูกบันทึกในรูปแบบของของกราฟที่ได้จากเครื่องบันทึกโพเทนซิโอสแตท ฟังก์ชันจะเป็นการวัดความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้กับค่าที่ปรับไว้ก่อนแล้ว โดยสัญญาณผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะทำให้จ่ายกระแสเข้าไปในชิ้นงานโลหะทดสอบเปลี่ยนแปลงซึ่งจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าของชิ้นโลหะทดสอบเปลี่ยนแปลงซึ่งจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าของชิ้นโลหะทดสอบเปลี่ยนไปในทิศทางที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



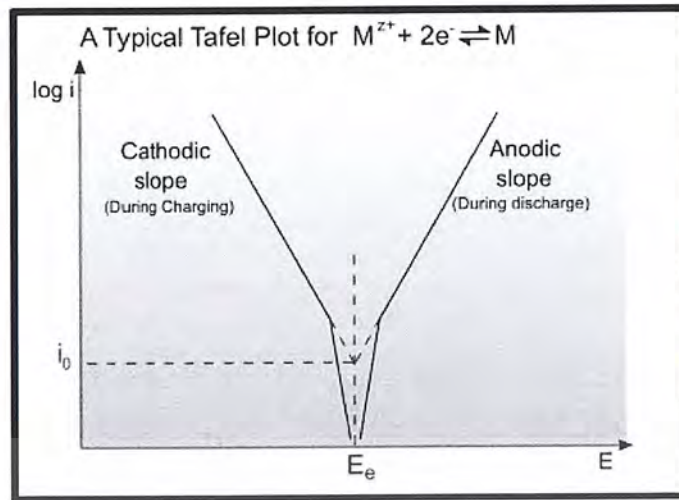
รูปที่ 2.18 แผนผังอย่างง่ายของโพเทนชิโอสแตท [19]

ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ถือเป็นพื้นฐานในการทดสอบทางเคมีไฟฟ้าจะทำหน้าที่นำไฟฟ้าต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์และเป็นอุปกรณ์สำหรับการวัดสัญญาณไฟฟ้า สำหรับวิเคราะห์การกักต่อนของวัสดุจะต้องประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้าด้วยกัน 3 ขั้วดังนี้

- ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) คือ โลหะตัวอย่าง
- ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่จะมีศักย์ไฟฟ้าที่แน่นอนไม่แปรหรือขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของกระแสในวงจรและสถานะที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งทำหน้าที่ให้เซลล์ไฟฟ้าเคมีเกิดการไหลเวียนครบวงจรไฟฟ้าโดยขั้วไฟฟ้าช่วยที่นิยมใช้ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าคาโลแมล (Saturated calomel electrode, SCE)
- ขั้วไฟฟ้าตรงข้าม (Counter electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าพิเศษใช้สำหรับทำหน้าที่เพื่อส่งผ่านอิเล็กตรอนหรือส่งผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยไม่ต้องผ่านขั้วไฟฟ้าอ้างอิงของวงจร ขั้วไฟฟ้าช่วยที่นิยมสำหรับการทดสอบการกักต่อน ได้แก่ แพลตทินัม ทองคำ

การคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากักต่อน ( $I_{corr}$ ) และ ศักย์ไฟฟ้าการกักต่อน ( $E_{corr}$ ) จากกราฟโพลาริเซชันระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้กับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เราสามารถหาค่า  $I_{corr}$  และค่า  $E_{corr}$  โดยการลากเส้นสัมผัสกราฟ (Tafel slope) ด้านแอนอดิก และแคโทดิกดังรูป 2.19 ที่จุดตัดของเส้นกราฟทั้งสองอ่านค่าในจากแกนจะได้ค่าที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 กราฟโพลาริเซชันระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้กับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น [19]

ค่าความชันของกราฟด้านแคโทดิกและแอโนดิก ( $\beta_a$  และ  $\beta_c$ ) หาได้จากความชันของกราฟ (Tafel slope) ทั้งด้านแอโนดิกและแคโทดิก ซึ่งค่าที่ได้ก็คือค่าความต้านทานการกัดกร่อนด้านแอโนดิกและแคโทดิกตามลำดับ

$$\beta_a \text{ และ } \beta_c = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

กำหนดให้  $\Delta E$  คือส่วนต่างของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อน (โวลต์)

$\Delta I$  คือส่วนต่างของกระแสที่เกิดขึ้น (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)

ค่าความต้านทานการกัดกร่อน ( $R_p$ ) แสดงถึงความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนของโลหะในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งค่าความต้านทานการกัดกร่อนที่มากจะแสดงถึงความสามารถในการป้องกันกร่อนได้มากขึ้น ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถคำนวณได้จาก

$$R_p = \frac{(\beta_a \times \beta_c)}{2.303 \times i_{corr} \times (\beta_a + \beta_c)}$$

กำหนดให้  $\beta_a$  คือความชันของกราฟด้านแอโนดิก

$\beta_c$  คือความชันของกราฟด้านแคโทดิก

$i_{corr}$  คือค่ากระแสการกัดกร่อน (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)

ค่าสัมประสิทธิ์การยับยั้งการกัดกร่อน (Efficiency inhibition; % IE) ค่านี้แสดงถึงความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อนของสารยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับค่าสารมาตรฐานสารที่ไม่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน

$$\% IE = \frac{(i - i_i) \times 100}{i}$$

กำหนดให้  $i$  คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อนที่ ปราศจากสารยับยั้งการกัดกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 $i_i$  คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อนที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)

### 2.4.1 ชนิดของสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวคือ สารที่มีลักษณะ โมเลกุลประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนหัวที่สามารถรวมกับน้ำได้ดีและส่วนหางที่ไม่รวมกับน้ำแต่สามารถละลายกับน้ำมันได้ดีดังรูปที่ 2.20

ลักษณะ โมเลกุล



ส่วนหางเข้ากับน้ำมัน ได้ดี

ส่วนหัวเข้ากับน้ำ ได้ดี

รูปที่ 2.20 ลักษณะของสารลดแรงตึงผิว [20]

สารลดแรงตึงผิวเมื่อละลายน้ำจะแตกตัวโดยส่วนหัวซึ่งเข้ากับน้ำได้ดีจะแสดงประจุและบ่งบอกคุณสมบัติของสารนั้นๆซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดดังนี้

#### 2.4.1.1 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Anionic surfactant)

สารนี้เมื่อละลายน้ำแล้วจะแตกตัวและส่วนหัวจะมีประจุเป็นลบสารจำพวกนี้ถูกนำมาใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดต่างๆเช่น น้ำยาล้างจาน ผงซักฟอก ตลอดจนผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เช่น แชมพู ครีมนวดผมและอื่นๆ ทั้งนี้เพราะมีคุณสมบัติในการทำความสะอาดที่ดี มีฟองมากและละลายน้ำได้ดี

#### 2.4.1.2 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (Cationic surfactant)

สารในกลุ่มนี้เมื่อละลายน้ำแล้วส่วนหัวจะมีประจุบวก นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้เคลือบผ้าเพื่อให้ความลื่นและป้องกันไฟฟ้าสถิต สารจำพวกนี้มีความสามารถต่ำในการทำความสะอาดและไม่มีฟองแต่สามารถเกาะเส้นผมและพื้นผิวได้ดีให้ความลื่นจึงนิยมนำมาใช้ในครีมนวดผมหรือน้ำยาปรับผ้านุ่ม สารตัวอย่างในกลุ่มนี้ที่ใช้ในครีมนวดผม ได้แก่ Cetrimonium chloride

#### 2.4.1.3 สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)

สารชนิดนี้เมื่อละลายน้ำแล้วจะไม่แตกตัวจึงไม่มีประจุ คุณสมบัติของสารกลุ่มนี้จะแตกต่างกันไป ตั้งแต่ละลายน้ำได้จนไม่ละลายน้ำสารที่ไม่ละลายน้ำมักใช้เป็นตัวดับฟองส่วนสารที่ละลายน้ำมักใช้เป็นการทำความสะอาดเนื่องจากมีฟองน้อยจึงมักใช้คู่กับ LAS หรือสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปจะขออนุญาตดำเนินการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบอื่นๆ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ใช้สารนี้ได้แก่ ผงซักฟอก สารขจัดคราบฝังแน่น ตัวอย่างสารในกลุ่มนี้ได้แก่ COGNIS Deutschland

#### 2.4.1.4 สารลดแรงตึงผิวชนิดสองประจุ (Amphoteric surfactant)

สารกลุ่มนี้มีทั้งประจุบวกและลบอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน เมื่อละลายน้ำจะแสดงประจุใดขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม เช่น ถ้าสภาพแวดล้อมเป็นกรดก็จะแสดงประจุบวก ถ้าสภาพแวดล้อมเป็นด่างก็จะแสดงประจุลบ สมบัติหลักของสารกลุ่มนี้คือสามารถทนน้ำกระด้างอ่อนละมุนต่อผิว มีสมบัติการเกิดป้องกันไฟฟ้าสถิตและให้ความนุ่มได้ ตัวอย่างสารในกลุ่มนี้ได้แก่ สารกลุ่ม Betaine เช่น Mirataine BET C 30 Dehyton K นิยมใช้ร่วมกับ SLES-2EO ในผลิตภัณฑ์แชมพู [20]

#### 2.4.2 ประเภทของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่นิยม

ในปัจจุบันสารลดแรงตึงผิวที่ใช้อย่างกว้างขวางนั้นเป็นชนิดสารลดแรงตึงผิวประจุลบ ซึ่งมีมากถึง 70–75% ของสารลดแรงตึงผิวทั้งหมดในโลก โดยมีกลุ่มย่อยคือ อัลคาไลน์ คาร์บอกซิลิก สบู่ซัลเฟต ซัลโฟเนตและฟอสเฟต ที่สามารถใช้ให้เกิดประโยชน์ได้หลายชนิดนั้นเกิดขึ้นจากหมู่ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) โดยมีหลายชนิดสามารถแก้ไขปรับปรุงโดยการเติมประเภทของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่เหมาะสมได้

ตารางที่ 2.4 การแสดงการใช้งานของสารลดแรงตึงผิวชนิดต่างๆ [21]

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

สารลดแรงตึงผิวประจุลบนี้นมีอิทธิพลอย่างมากในด้านเศรษฐศาสตร์ จากตารางที่ 2.4 จะพบว่ามีการใช้สารลดแรงตึงผิวถึง 65% ในอุตสาหกรรมต่างๆ

สบู่ที่พัฒนามาจากไขมันสัตว์ ไขมันพืช และน้ำมัน จัดได้ว่าเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มนุษย์ได้ค้นพบมาว่าหนึ่งพันปี ทำให้เกิดประโยชน์ทางเศรษฐกิจอย่างมหาศาล กรดไขมัน นั้นจะพบได้มากจากธรรมชาติ ส่วนการผลิตสบู่จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ เช่น กรดไขมันจากสัตว์ ประกอบด้วย กรดโอเลอิก (40–45%) กรดปาล์มมิติก (25–30%) กรดสเตียริก (15–20%) นอกจากนี้ยังมีกรดไขมันที่ได้จากพืชคือ กรดไขมันมะพร้าว ประกอบด้วย  $C_{12}$  (45–50%)  $C_{14}$  (16–20%)  $C_{16}$  (8–10%) oleic (5–6%)  $C_{12}$  (10–15%)

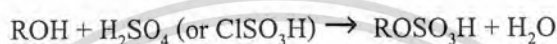
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาการสังเคราะห์สารลดแรงตึงผิวนั้นเริ่มเมื่อต้องการปรับปรุงหน้าที่ของสบู่ชนิดเดิมเพื่อนำไปใช้อย่างหลากหลายในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ พบว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวมีบทบาทที่สำคัญมากในกระบวนการผลิตสมัยใหม่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการสังเคราะห์เคมีอินทรีย์ ตัวอย่างเช่น การตอบสนองที่ว่องไวของสบู่ต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดเบส

จากการสังเคราะห์ต่างๆที่ได้กล่าวมาของกลุ่มของสารลดแรงตึงผิวที่มีบทบาทอย่างมาก ได้แก่ กรดซัลโฟเนตและกรดซัลโฟริก [21]

#### 2.4.2.1. ซัลเฟต เอสเทอร์

เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันของแอลกอฮอล์กับ กรดซัลฟูริกซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ หรือ กรดคลอโรซัลโฟนิค หรือการเพิ่มเข้าของ กรดซัลฟูริก ในพันธะคู่



หรือ



จะเห็นได้ว่าสารลดแรงตึงผิวซัลเฟต เอสเทอร์ ประกอบไปด้วยกลุ่มของกรดซัลโฟนิค ซึ่งมักจะมีการพบอัลคาไลน์ หรือ เกลือแอม โมเนียม ซึ่งสูตรโครงสร้างโดยทั่วไปนั้นจะเป็น  $\text{ROSO}_3\text{M}$  เช่น SDS (Sodium dodecyl sulfate) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอีกมากมายที่มีประโยชน์ในการใช้งานเช่นเดียวกันปฏิกิริยาที่แสดงนั้นเป็นปฏิกิริยาอย่างง่ายซึ่งมักเกิดขึ้นในกระบวนการผสมกันระหว่างไอโซเมอร์หรือหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นจำพวกสารประกอบเป็นส่วนมาก โดยสารที่ได้จะเริ่มต้นจากซัลเฟต ที่มีฟังก์ชันของแอลกอฮอล์ที่อิมตัวและไม่อิมตัว [22]

#### 2.4.2.2. กรดเกลือซัลโฟนิค

ถึงแม้ว่ากรดเกลือซัลโฟนิคจะมีลักษณะทางเคมีคล้ายกับซัลเฟต เอสเทอร์ แต่กรดเกลือซัลโฟนิคจะมีความแตกต่างที่สำคัญในด้านเสถียรภาพทางเคมีมากกว่า เนื่องจากซัลเฟตนั้นมีฟังก์ชันของหมู่ที่ไม่ชอบน้ำ มีประโยชน์หลากหลายในด้านการควบคุมสมบัติและการประยุกต์ในการใช้งาน

กรดซัลโฟนิคบางกลุ่มในยุคแรกๆ ที่มีความสามารถอธิบายกระบวนการผลิตได้คือ Sulfated oils ในศตวรรษที่ 19 ซึ่งนับได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นนำสารลดแรงตึงผิวซัลเฟตมาใช้ให้เกิดประโยชน์ทางการค้า อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ได้เริ่มขาดแคลนไปในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 1

Sodium alkyl naphthalene sulfonates ชนิดสายโซ่สั้นบางชนิดได้มีการพัฒนาและมีการนำมาเปรียบเทียบกับสมบัติของสารซักฟอก พบว่ามีข้อดีในด้านการป้องกันการเกิดฟอง

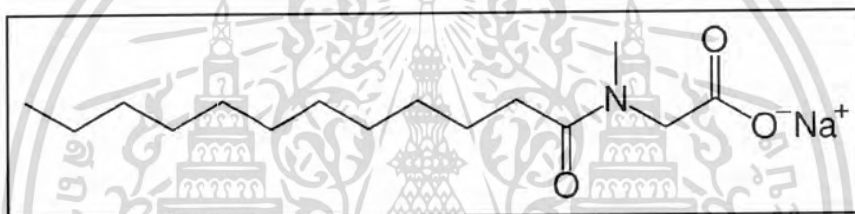
และยังคงใช้กันมาจนถึงปัจจุบัน ซัลเฟตมักใช้เป็นสารกระจายตัวในการใช้งานทางการเกษตรและการประยุกต์ใช้ในการถ่ายภาพ หลังจากสงครามโลกจบลงทำให้เกิดการขยายตัวของอุตสาหกรรมไม่ว่าจะในด้านต่างๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเห็ดดับเพลิงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางด้านเคมีในอังกฤษ เยอรมัน และสหรัฐอเมริกา ถือได้ว่าเป็นผู้นำด้านการสังเคราะห์สารลดแรงตึงผิวซัลเฟต ซึ่งนับได้ว่ามีความหมายที่สำคัญในด้านเศรษฐกิจทางการค้าด้วยและยังพบอีกว่าซัลเฟตสามารถได้จากการกลั่นแยกส่วนประกอบของกระบวนการปิโตรเลียม Olefin sulfonates N-acyl-N-alkyltaurines Sulfosuccinate ester และจากสารประกอบอื่นๆ [23]

#### 2.4.2.3 สบู่และผงซักฟอกจากคาร์บอกซิเลต

ในอดีตนั้นได้มีเอกสารบันทึกไว้ยาวนานเกี่ยวกับสบู่และผงซักฟอกจากคาร์บอกซิเลตที่เกี่ยวกับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ พบว่ากรดเกลือคาร์บอกซิเลตได้มีสมบัติที่เด่นกว่าประเภทของสบู่จำพวกอื่นๆทั้งในด้านความเสถียรและค่าความเป็นกรดเบสต่างๆในน้ำ พบว่าสารส่วนมากจะประกอบไปด้วยการเพิ่มเข้าของหมู่ที่มีขั้ว เช่น เอสเทอร์ เอไมด์ สารประกอบกรดไขมันซึ่งมีข้อดีด้านสภาพการละลายและควมมีเสถียรภาพ [22]

#### 2.4.3 โซเดียมลอริลซาร์โคซิเนต (Sodium lauroyl sarcosinate)



รูปที่ 2.21 โครงสร้างของโซเดียมลอริลซาร์โคซิเนต [25]

#### ตารางที่ 2.5 สมบัติต่างๆของโซเดียมลอริลซาร์โคซิเนต [24-25]

สูตร โมเลกุล	$C_{15}H_{28}NNaO_3$
น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight)	293.38 g / mol
ชื่ออื่น	Sarkosyl, Sodium [dodecanoyl(methyl)amino]acetate, Lauroylsarcosine, Sodium Salt
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	1.025
ความหนาแน่น (Density)	1.033 g/ml ที่ 25 °C
สมบัติการละลายน้ำ (Solubility in water)	$H_2O$ : 1 M at 20 °C
ความเป็น กรด - เบส	7.5 – 8.5 (10 % solution)
ลักษณะ	ผงสีขาว

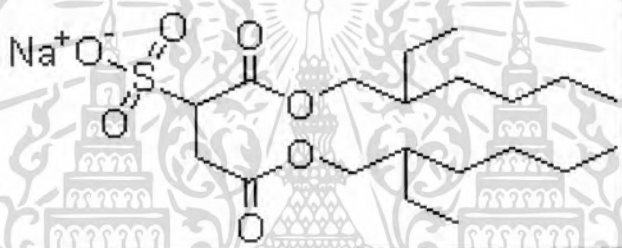
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ บริษัท อีซีเอส จำกัด (มหาชน) ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทฯ

โซเดียมลอริลซาร์โคซิเนตรู้จักกันในชื่อ Sarkosyl มีโครงสร้างโมเลกุลดังรูปที่ 2.21 และมีสมบัติต่างๆ ดังตารางที่ 2.5 เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบซึ่งเกิดจาก Sarcosine ใช้

สำหรับเป็นสารให้เกิดโฟมหรือเป็นสารทำความสะอาดในพวกแชมพู โฟมที่ใช้ในการโกนหนวด และโฟมสำหรับการทำความสะอาดสิ่งของทั่วไป ในการทดลองทางชีวโมเลกุล Sarkosyl เป็นสารยับยั้งการริเริ่มใน DNA transcription ซึ่งสารประกอบที่สำคัญใน Sarkosyl คือ Sarcosine

Sarcosine นั้นสร้างมาจาก Glycine ซึ่ง Sarcosine เป็นสารประกอบอะมิโนที่พบได้ในธรรมชาติ เช่น อาหาร ไข่แดง ไข่ไก่ ผัก ถั่ว ถั่วเหลือง และส่วนต่างๆของเนื้อเยื่อในร่างกาย ซึ่งการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการนั้นสามารถสร้างได้จาก Chloro acetic acid และ Methylamine และยังสามารถพบได้ในจากกระบวนการเผาผลาญของ Choline กับ Glycine ซึ่งพบว่าเมื่อ Sarkosyl นั้น เมื่อละลายน้ำจะมีรสชาติดหวาน ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมด้านทางชีวภาพ และการผลิตยาตีฟีน Sarcosine พบในการ Isolate ครั้งแรกโดยนักเคมีชาวเยอรมันชื่อ Justus von Liebig ใน ค.ศ. 1847 [23-25]

#### 2.4.4 ไดออกทิล ซัลโฟซัคซิเนต โซเดียมซอลต์ (Diocetyl sulfosuccinate sodium salt)



รูปที่ 2.22 โครงสร้างของไดออกทิล ซัลโฟซัคซิเนต โซเดียมซอลต์ [23]

#### ตารางที่ 2.6 สมบัติของไดออกทิล ซัลโฟซัคซิเนต โซเดียมซอลต์ [23]

สูตรโมเลกุล	$C_{20}H_{37}NaO_7S$
น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight)	444.56 g / mol
ชื่ออื่น	Sodium 1,4-bis-(2-ethylhexyl)-sulfosuccinate; butanedioic acid, sulfo-1,4-bis-(2-ethylhexyl) ester sodium salt; dioctyl sodium sulfosuccinate
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	1.1 ที่ 68.0 ° F
ความหนาแน่น (Density)	1.1 g/cm <sup>3</sup>
สมบัติการละลายน้ำ (Solubility in water)	1.5 g/ 100 g at 25 °C
ความเป็น กรด - เบส	5.8 - 6.9 (1 in 100 solution)
ลักษณะ	ผงสีขาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดออกทิล ซัลโฟซัลซิเนต โซเดียมซอลต์หรือ Docusate salt มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.22 และมีสมบัติดังตารางที่ 2.6 เป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบส่วนมากนำไปใช้เป็นสารช่วยการกระจายตัว มีการนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารเคมีผลิตเยื่อกระดาษ สี หมึกพิมพ์ เรซิน รวมทั้งสิ่งทอต่างๆ ในส่วนของ Docusate ที่ใช้ในวงการแพทย์นั้น ถูกนำมาทำเป็นยาระบาย และเป็นสารช่วยการกระจายตัวในการผลิตเม็ดลดยา [23, 26]

#### 2.4.5 แรงตึงผิว (Surface tension)

แรงตึงผิว คือแรงตึงที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของไหลเมื่อผิวหน้าของไหลสัมผัสกับพื้นผิวอื่นตัวอย่างเช่น เมื่อผิวหน้าของน้ำสัมผัสกับอากาศหรือกับของแข็งโดยมีพลังงานเพียงพอต่อการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลซึ่งมีขนาดสัมพันธ์กับแรงยึดติด (Cohesive force) และแรงเชื่อมแน่น (Adhesive force) ทำให้เกิดเป็นลักษณะคล้ายกับแผ่นบางๆ ที่สามารถต้านแรงตึงได้เล็กน้อยมีทิศขนานกับผิวของเหลวและตั้งฉากกับเส้นขอบที่ของเหลวสัมผัส ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ชนิดของแรงต่างๆ ที่มีผลต่อแรงตึงผิว [27]

แรงตึงผิวเท่ากับอัตราส่วนระหว่างแรงตึงที่ผิวของของเหลวต่อความยาวของเส้นผิวสัมผัสของของเหลวมีหน่วยเป็นแรงต่อความยาว เช่น นิวตันต่อเมตร (N/m) แรงตึงผิวมีค่าเฉพาะที่เปลี่ยนแปลงได้ตามชนิดของของไหล นอกจากนี้แรงตึงผิวยังเปลี่ยนแปลงได้ตามอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงยึดเหนี่ยวในโมเลกุลของของไหลน้อยลงทำให้แรงตึงผิวมีค่าน้อยลง

$$\gamma = \frac{f}{2l}$$

สมการที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$\gamma$	คือ	ความตึงผิว
	F	คือ	แรงตึงที่ใช้ดึง
	l	คือ	ความยาวที่ถูกแรงตึงผิวกระทำ 1 ผิว

#### 2.4.5.1 การเกิดหยดของเหลว (Droplet)

การเกิดหยดของเหลว คือกระบวนการที่เกิดขึ้นกับของเหลวที่มีขนาดเล็กและอยู่อย่างอิสระ เช่น เม็ดของของเหลวในบรรยากาศหรือเม็ดของของเหลวที่เกิดจากหัวฉีดที่ฉีดของเหลวออกมาเป็นฝอยหรือละอองเล็กๆ หรือเม็ดของของเหลวที่เกาะตามใบไม้ซึ่งอิทธิพลของแรงตึงผิวจะพยายามปรับรูปร่างให้เม็ดของของเหลวมีลักษณะเป็นรูปทรงกลมทำให้แรงดันในหยดของเหลวมากขึ้นเพื่อให้เกิดแรงต้านแรงตึงผิวเป็นผลให้หยดของเหลวคงสภาพอยู่ได้อย่างสมดุล ถ้าพิจารณาหยดของเหลวทรงกลมที่มีรัศมี r และ ความดันภายในหยดของเหลว P โดย

$$p = \frac{2\gamma}{r}$$

สมการที่ 2.2

#### 2.4.5.2 คาпилลาริตี (Capillarity)

คาพิลลาริตี คือปรากฏการณ์ที่ของไหลที่สัมผัสกับวัตถุแล้วมีลักษณะสูงขึ้นหรือต่ำลงเนื่องมาจากอิทธิพลของแรงยึดติดและแรงเชื่อมแน่นเช่น บริเวณที่น้ำสัมผัสกับผิวแก้วจะมีระดับน้ำสูงขึ้นเล็กน้อยเพราะแรงยึดติดระหว่างโมเลกุลของน้ำกับ โมเลกุลของแก้วมีมากกว่าแรงเชื่อมแน่นระหว่าง โมเลกุลของน้ำแต่ถ้าเป็นบริเวณที่ปรอทสัมผัสกับผิวแก้วระดับปรอทจะต่ำลงเล็กน้อย เนื่องจากแรงเชื่อมแน่นระหว่างโมเลกุลของปรอทมีมากกว่าแรงยึดติดระหว่างโมเลกุลของปรอทกับโมเลกุลของแก้ว [28]

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r}$$

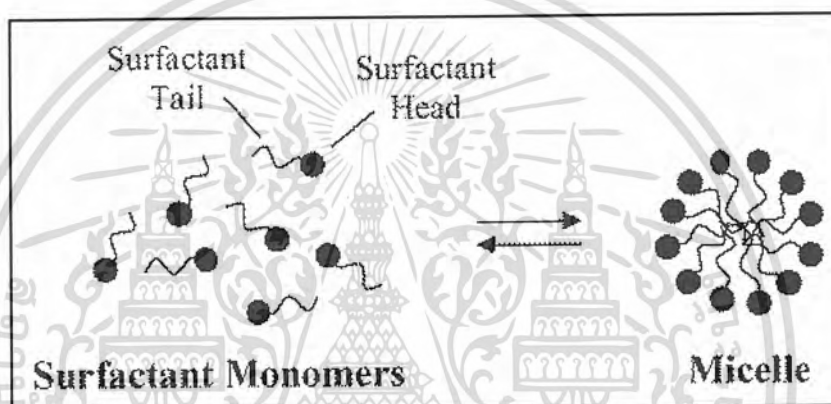
สมการที่ 2.3

เมื่อ	h	คือ	ความสูงของของไหลในคาพิลลารี
	$\gamma$	คือ	ความตึงผิว
	r	คือ	รัศมีของคาพิลลารี
	$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของเหลว
	$\theta$	คือ	มุมสัมผัสของเหลวและผนังคาพิลลารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.6 ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (Critical micelle concentration, CMC)

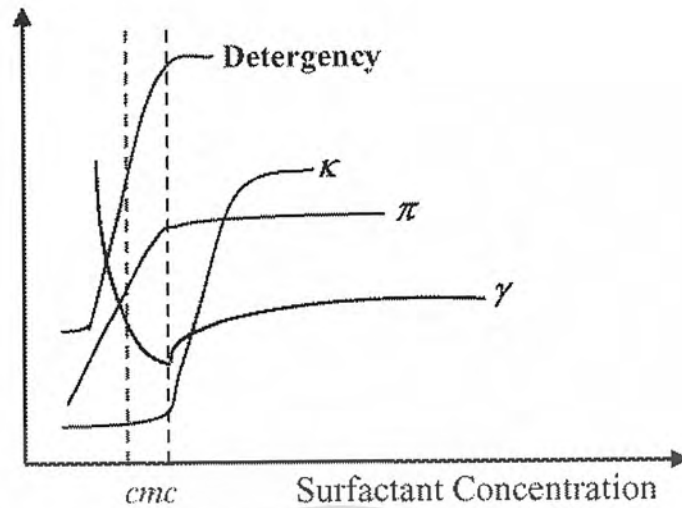
สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) จัดเป็นสารพวกแอมฟิฟิลิก (Amphiphilic molecules) ซึ่งเป็นสารหรือโมเลกุลที่มีทั้งส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ตัวอย่างของสารลดแรงตึงผิว ประกอบด้วยส่วนหาง (Tail) และส่วนหัว (Head) ดังรูปที่ 2.24 ส่วนหางเป็นส่วนของโซ่ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon chain) ซึ่งสามารถละลายได้ดีสำหรับสารประเภทไฮโดรคาร์บอนและสารที่ไม่มีขั้วและส่วนหัวเป็นส่วนที่มีสมบัติชอบน้ำจึงสามารถละลายได้ในน้ำหรือสารที่มีขั้ว หลักการทำงานของสารลดแรงตึงผิวคือส่วนที่ชอบน้ำจะทำการจับน้ำ และส่วนที่ชอบน้ำมันจะทำการจับสิ่งสกปรกพวกไขมันที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ ทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกไปแล้วแขวนลอยอยู่ในน้ำ



รูปที่ 2.24 การรวมตัวของสารลดแรงตึงผิว [29]

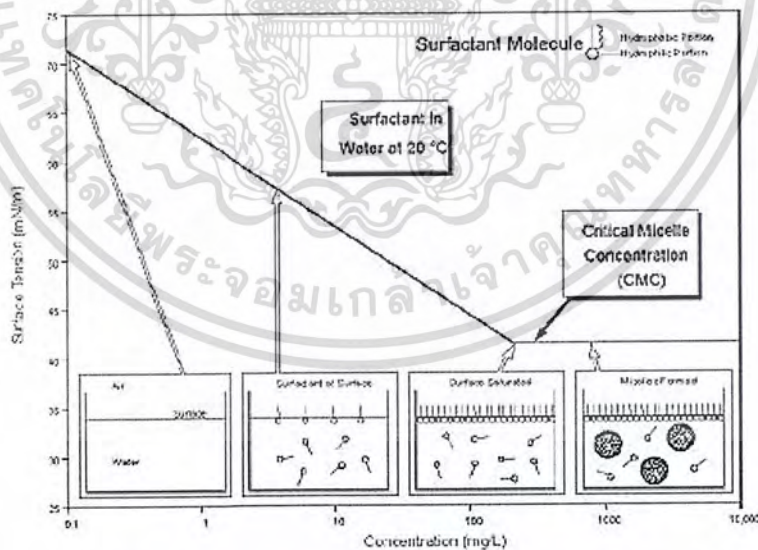
เมื่อละลายสารลดแรงตึงผิวลงในน้ำ สมบัติของสารละลายจะมีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ แรงตึงผิวของน้ำจะมีค่าลดลงและจะสามารถละลายได้ในสารที่ไม่มีขั้ว เช่น ไฮโดรคาร์บอนต่างๆ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของสารในปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ ความสัมพันธ์ของการลดลงของแรงตึงผิวหรือสมบัติของสารละลายต่างๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ดังรูปที่ 2.25 ณ จุดที่ความเข้มข้นของสารละลายที่ทำให้สมบัติมีการเปลี่ยนแปลง เรียกว่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (CMC) เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว สมบัติต่างๆ จะมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อถึงจุด CMC สมบัติดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยในทางที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นกับสมบัตินั้นๆ เช่น แรงตึงผิว จะมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนค่าการนำไฟฟ้า จะมีค่าเพิ่มขึ้นลดลง เมื่อถึงจุด CMC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ของสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า ( $K$ ), แรงตึงผิว ( $\gamma$ ) และแรงดันออสโมติก ( $\pi$ ) ณ จุดความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ [29]

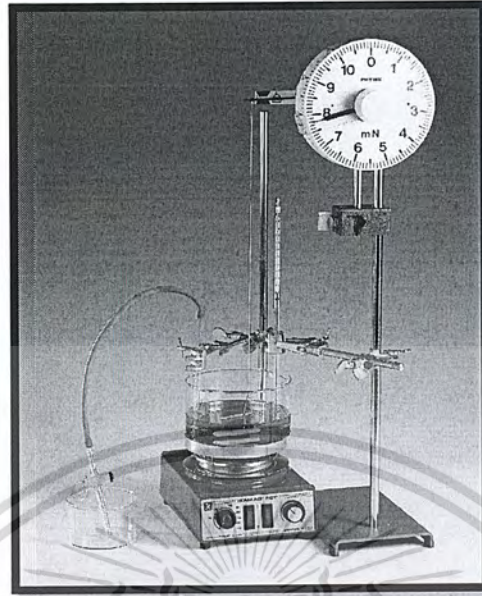
ที่จุดความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ สารลดแรงตึงผิวจะมีการจัดตัวในรูปแบบต่างๆ เช่น ทรงกลม (Spherical structures) หรือดังรูปที่ 2.26 ความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ คือปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลายต่ำที่สุดในการจัดตัวเป็นไมเซลล์ [29]



รูปที่ 2.26 ลักษณะ Micelle ที่ความเข้มข้นต่างๆ [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.7 ทฤษฎีการหาแรงตึงผิวของดุนอยริง (Do noby ring)



รูปที่ 2.27 เครื่องมือที่ใช้วัดด้วยเทคนิควงแหวนดุนอย [30]

เมื่อโมเลกุลของของเหลวอยู่ภายใต้แรงกระทำโดยแรงกระทำจะกระทำรอบๆ ของเหลว โดยมี  $P$  คือความดันที่กระทำทุกทิศทาง จะเกิดแรงกระทำที่เป็นผลลัพท์กับบริเวณรอบๆ โมเลกุลของพื้นผิวที่เป็นของเหลว

ให้  $\Delta A$  พื้นที่ผิวของของเหลว

$\Delta E$  งาน

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{\Delta A}$$

สมการที่ 2.4

เมื่อ  $\varepsilon$  คือ Specific surface energy

คำนวณหาค่าแรงตึงผิวได้จาก

$$\gamma = \frac{F}{l}$$

สมการที่ 2.5

เมื่อ  $F$  คือ แรงกระทำ

$l$  คือ ความยาว

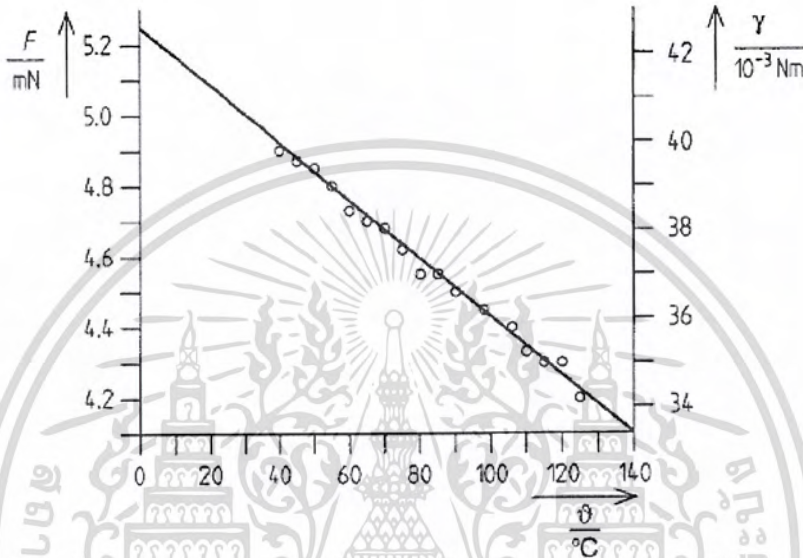
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออุณหภูมิของสารเปลี่ยนไปจะทำให้เกิดสมการใหม่

$$\gamma = \gamma'(T'_k - T)$$

สมการที่ 2.6

$T'_k$  คือ อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิวิกฤต



รูปที่ 2.28 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวและอุณหภูมิของน้ำมันมะกอก [30]

จากนั้นเราสามารถคำนวณหาแรงตึงผิวใหม่ได้ เมื่อกำหนดปริมาณของของเหลวเท่ากับ  $V_m$

$$\gamma_m = \gamma \cdot V_m^{2/3}$$

สมการที่ 2.7

แทนค่า  $\gamma$

$$\gamma_m = \gamma' \cdot V_m^{2/3} (T'_k - T)$$

สมการที่ 2.8

เมื่อ  $K_\gamma$  คือ Temperature coefficient

$$K_\gamma = \gamma' \cdot V_m^{2/3}$$

สมการที่ 2.9

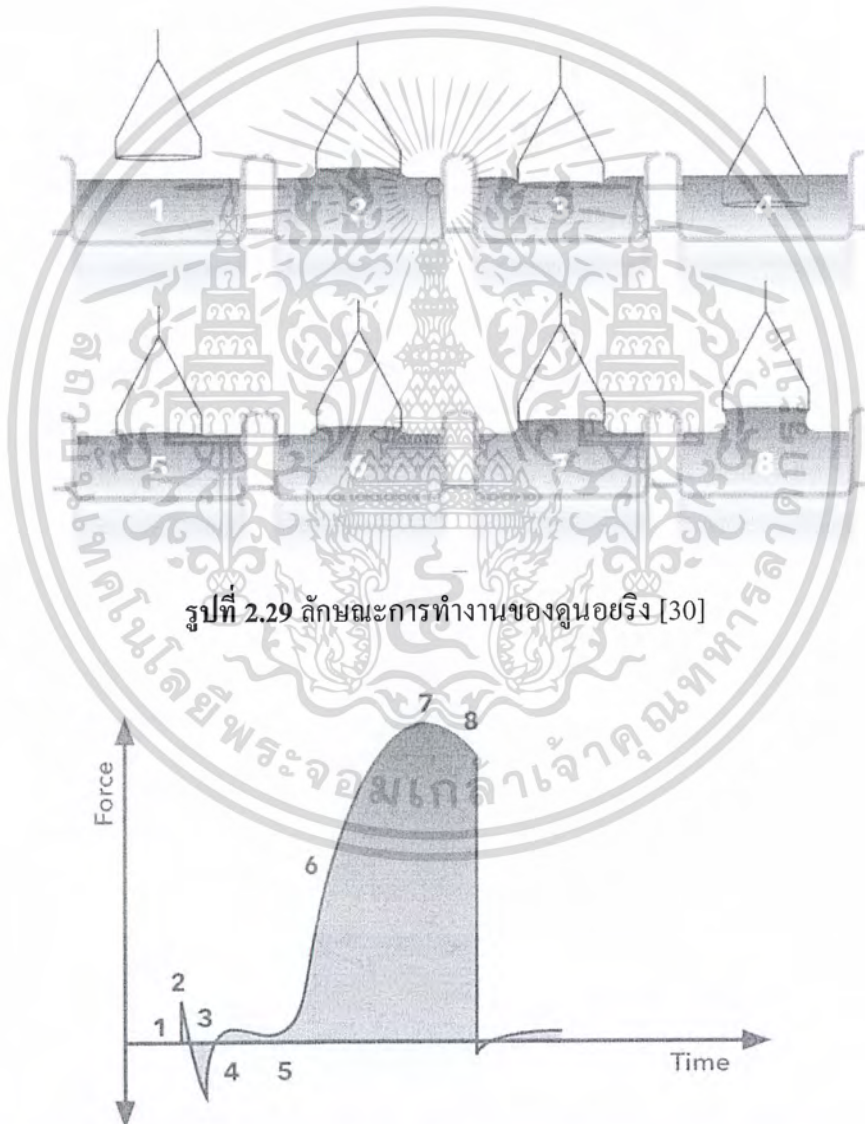
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นประมาณค่า  $K_Y$  จาก Eötvös equation

$$K_Y = 2.1^{-7} \text{ J/K}$$

สมการที่ 2.10

การหาแรงตึงผิวโดยใช้วิธี Do noüy ring เป็นการสัมผัสของวงแหวนแพลตตินัมกับพื้นผิวที่ถูกทดสอบดังรูปที่ 2.27 โดยวงแหวนจะจมอยู่ในน้ำจากนั้นให้แรงกระทำยกขึ้น แรงกระทำจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดแล้วจะลดลงเมื่อเกิดการฉีกขาด โดยจะบันทึกแรงกระทำสูงสุดที่ทำให้วงแหวนไม่ติดกับพื้นผิว โดยมีกระบวนการทำงานดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและเวลาในการทำงานที่ตำแหน่งต่างๆ ของวงแหวนดุนอย

[30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อวาดกราฟระหว่างแรงที่กระทำและเวลาที่เปลี่ยนไปดังรูปที่ 2.30 สามารถอธิบายที่จุดต่างๆ ได้ดังนี้ [30]

1. จุดเริ่มต้น
2. เกิดแรงเชื่อมแน่น (Adhesive force) ขึ้นที่ระหว่างวงแหวนกับพื้นผิว ทำให้เกิดแรงเชิงบวก (Positive force)
3. วงแหวนจะเกิดการผลักดันที่พื้นผิว (เนื่องจากแรงดึงผิว) ทำให้เกิดแรงเชิงลบ (Negative force)
4. วงแหวนจะเคลื่อนผ่านพื้นผิว
5. เมื่อยกวงแหวนขึ้นผ่านพื้นผิวจะเกิดแรงกระทำเพิ่มขึ้น
6. เกิดแรงเพิ่มขึ้น
7. เกิดแรงสูงสุด
8. จากนั้นแรงจะลดลงเมื่อเกิดการฉีกขาดระหว่างพื้นผิวกับวงแหวน

## 2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสาร ที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สถานะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent)

### 2.5.1 ประเภทการดูดซับ

การดูดซับแบ่งออกได้ 2 ประเภท ตามลักษณะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

#### 2.5.1.1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับประเภทนี้ มีแรงที่ทำให้เกิดการเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับโมเลกุลที่ผิวหน้าของตัวดูดซับ เช่น แรงวานเดอร์วาลส์ (Van der waal force) และแรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole force) เป็นต้น

ลักษณะการยึดเหนี่ยวจากแรงทางกายภาพเกิดผล 3 อย่างดังนี้

ก. เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงข้าม ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างเป็นโมเลกุลที่มีขั้วทั้งคู่ เช่น การดูดซับของสารยับยั้งแอนติคอบนผิวโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. เกิดจากการที่ โมเลกุล ไม่มีขั้ว จะสามารถเปลี่ยนเป็น โด โพล โมเลกุล ได้โดยหาก อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปด้านหนึ่งของ โครงสร้างมากและเมื่อมี โมเลกุล ไม่มีขั้ว ที่มีลักษณะเดียวกัน จะเกิดแรงดึงดูดกัน ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นเป็นแรงอ่อนๆ ลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดเมื่อ โมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็น โมเลกุล ไม่มีขั้วทั้งคู่

ค. เกิดจาก โมเลกุล ไม่มีขั้ว เข้าใกล้ โมเลกุล ที่ไม่มีขั้ว แล้วเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุตรงข้ามกันแล้วเกิดการดึงดูดกัน ซึ่งลักษณะการดูดซับแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมี โมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่เป็น โมเลกุล ไม่มีขั้ว และตัวดูดซับเป็น โมเลกุล ไม่มีขั้ว

#### 2.5.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ เป็นกระบวนการแบบไม่ผันกลับ ซึ่งเมื่อประสิทธิภาพของตัวดูดซับหมดสภาพไปแล้วไม่สามารถทำการฟื้นฟูสภาพใหม่ (Regeneration) ของตัวดูดซับเหมือนกับกระบวนการดูดซับแบบแรก ซึ่งการเกาะของตัวถูกดูดซับที่ผิวตัวดูดซับจะเหมือนแรงใช้ยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมภายใน โมเลกุล เช่น เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์เกิดพันธะโคออร์ดิเนตโควาเลนต์ เป็นต้น โดยการดูดซับทางเคมีบางครั้งจำเป็นต้องอาศัยพลังงานเข้าร่วมด้วย

สำหรับการดูดซับของสารที่ยังการกักคร่อนประเภทสารอินทรีย์นี้สามารถสร้างพันธะกับโลหะ โดยการถ่ายโอนอิเล็กตรอนใช้สำหรับเกิดการยึดติดด้วยพันธะโคออร์ดิเนต โดยกระบวนการนี้โลหะจะอาศัยออร์บิทัลที่พลังงานต่ำในการร่วมสร้างพันธะ ซึ่งโดยธรรมชาติ โมเลกุลสารอินทรีย์จะประกอบด้วยอิเล็กตรอนคู่โคเวเลนต์หรือไพอิเล็กตรอน การดูดซับของสารที่ยังการกักคร่อนของสารประเภทนี้จะใช้อิเล็กตรอนคู่โคเวเลนต์ในการสร้างพันธะโคออร์ดิเนตกับออร์บิทัลของโลหะที่มีพลังงานต่ำ [31-32]

#### 2.5.2. ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับ

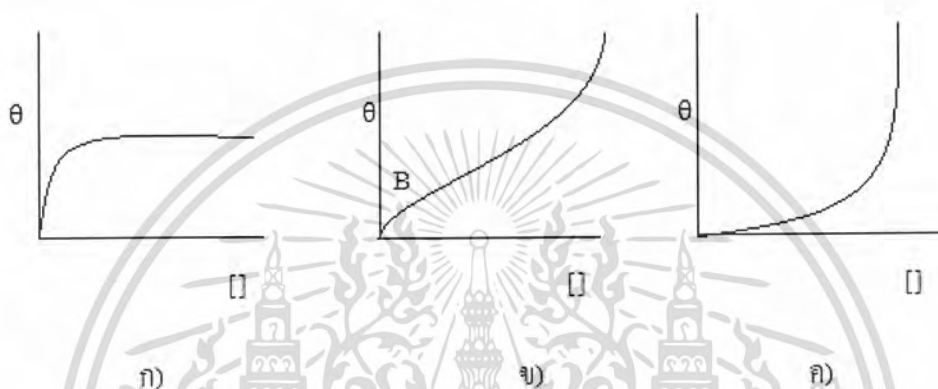
การศึกษาผลของการดูดซับ จำเป็นต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับ ดังนี้ [34]

- ความปั่นป่วนของระบบ
- ขนาดและพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ
- ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับไว้ที่ผิวของวัสดุดูดซับ
- ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ
- ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง
- อุณหภูมิของน้ำ มีผลต่อความเร็วของกระบวนการดูดซับ และความสามารถของวัสดุดูดซับในการดูดซับสารที่มีอยู่ในน้ำหรือก๊าซ
- ชนิดของวัสดุดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherms)

เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่จะถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับและความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุลและอุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ เมื่อนำเอาความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์กับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับจะได้ไอโซเทอมของการดูดซับ สามารถนำไปใช้หาความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับสารและสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับต่างชนิด



รูปที่ 2.31 ไอโซเทอมของการดูดซับ

จากรูปที่ 2.31 สามารถอธิบายเส้นกราฟไอโซเทอมต่างๆ ได้ดังนี้

ก. Langmuir isotherm มาจาก Langmuir equation isotherm รูปร่าง ไอโซเทอมแบบนี้จะพบมากในตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กมากและมีพื้นผิวภายนอกน้อยมาก

ข. Sigmoid isotherm หรือ S-shaped isotherm ที่พบในตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ จากรูป 2.31 (ข) โดยจุด B จะเป็นตำแหน่งที่มีการดูดซับแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์และเป็นจุดเริ่มต้นการดูดซับแบบหลายชั้น

ค. Convex isotherm เกิดขึ้นในกรณีที่มีการดูดซับระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับมีแรงดึงดูดที่อ่อนทำให้มีแรงดึงดูดที่อ่อน ทำให้ตัวถูกดูดซับไม่เป็ยกผิวของตัวถูกดูดซับ

จากงานวิจัยของ Satapathy A. K., et al[1] ได้ศึกษาการยับยั้งการกัดกร่อน โดยสารสกัดจากต้นพุ่มมอญ (*Justicia gendarussa*) บนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Mild steel) ใน 1 M ของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกแสดงให้เห็นว่าการดูดซับของสารประเภทดังกล่าวจะมีไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3.1 แบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

ในการใช้ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ในการหาความสามารถในการดูดซับของสารนั้น กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นต้องใช้สมมุติฐานของทฤษฎีที่มีแนวคิดจากแบบจำลองชั้นเดียวดังนี้

- ที่ทุกตำแหน่งผิวสัมผัสสามารถดูดซับ โมเลกุลได้
- ไม่มีแรงกระทำระหว่างตัวถูกดูดซับ
- พลังงานและกลไกการดูดซับของทุกๆ โมเลกุลบนผิวตัวดูดซับเกิดขึ้นได้

เหมือนกัน

- การดูดซับบน โมเลกุลของตัวพื้นผิวของตัวดูดซับจะเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว

ให้ค่า  $\theta$  คือ สัดส่วนของพื้นผิวที่ถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับต่อพื้นที่ผิวที่ใช้ดูดซับทั้งหมดเพื่อให้สอดคล้องกับค่าที่วัดได้จากการกักกร่อน กำหนดให้

$$\theta = \frac{i - i_i}{i} = \frac{\% IE}{100} \quad \text{สมการที่ 2.11}$$

กำหนดให้ % IE คือ ประสิทธิภาพการยับยั้งการกักกร่อน

อัตราการดูดซับต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมด ( $r_a$ )

$$r_a = k_a C(1 - \theta) \quad \text{สมการที่ 2.12}$$

เมื่อ  $k_a$  คือ ค่าคงที่ของการคายซับ (1/นาที)

$C$  คือ ความเข้มข้นของสารยับยั้งการกักกร่อน (โมลาร์)

อัตราการคายซับต่อพื้นที่ทั้งหมด ( $r_d$ )

$$r_d = k_d \theta \quad \text{สมการที่ 2.13}$$

เมื่อ  $k_d$  คือ ค่าคงที่ของการคายซับ (มิลลิกรัม/ลิตร.นาที)

เมื่อคิดที่สภาวะสมดุล อัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ

$$k_a C(1 - \theta) = k_d \theta \quad \text{สมการที่ 2.14}$$

$$\theta = \frac{k_d C}{k_d + k_a C} \quad \text{สมการที่ 2.15}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากำหนดให้  $K_A$  เป็นค่าคงที่การดูดซับ จะได้

$$K_A = \frac{k_a}{k_d} \quad \text{สมการที่ 2.16}$$

จะได้สมการ

$$i - i_i = \frac{i \cdot K_A \cdot C}{1 + K_A C} \quad \text{สมการที่ 2.17}$$

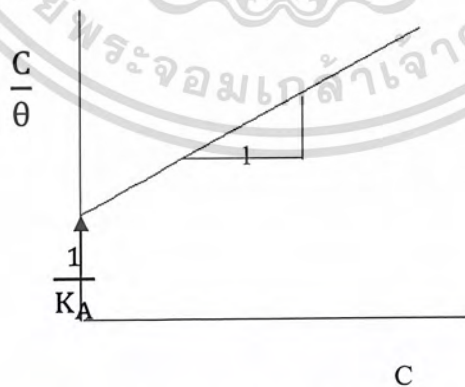
จัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น

$$\frac{C}{i - i_i} = \frac{1}{K_A i} + \frac{C}{i} \quad \text{สมการที่ 2.18}$$

นำ  $i$  คูณตลอดสมการ ได้สมการแลงเมียร์ในการศึกษาการดูดซับของสารยับยั้งการกัดกร่อน

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_A} + C \quad \text{สมการที่ 2.19}$$

นำค่า  $\frac{C}{\theta}$  และ  $C$  มาสร้างความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 2.32 หากค่าความชันของกราฟที่ได้เป็น 1 แสดงว่าการดูดซับของสารยับยั้งการกัดกร่อนนี้เป็นการดูดซับแบบ Langmuir adsorption isotherm



รูปที่ 2.32 ลักษณะของ Langmuir adsorption isotherm ในรูปกราฟเส้นตรง [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดตัดแกน  $y$  เป็นค่า  $\frac{1}{K_A}$  ซึ่งค่า  $K_A$  สามารถใช้ในการหาค่าความสามารถในการดูดซับของสารที่ยังการกักร่อน ซึ่งเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระการดูดซับ แต่หากการดูดซับการกักร่อนของสารที่ยังการกักร่อนไม่มีการดูดซับแบบแลงเมียร์แล้ว (ค่าความชันที่ได้ไม่เท่ากับ 1) สามารถหาค่า Isotherm จากแหล่งอื่นได้ [1, 30-31]

Freundlich's model

$$K_A C^{1/n} = \theta \quad \text{สมการที่ 2.20}$$

Frumkin's model

$$K_A C = \frac{(\theta)}{1-\theta} e^{f\theta} \quad \text{สมการที่ 2.21}$$

Tenkin's model

$$K_A C = e^{f\theta} \quad \text{สมการที่ 2.22}$$

กำหนดให้

- $\theta$  คือ สัดส่วนของพื้นที่ผิวที่ถูกปกคลุมของสารที่ยังการกักร่อนต่อพื้นที่ผิวของเหล็ก
- $K_A$  คือ ค่าคงที่การดูดซับ
- $C$  คือ ความเข้มข้นของสารที่ยังการกักร่อน (โมลาร์)
- $n$  คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยา
- $f$  คือ ค่าคงที่การเกิดอันตรกิริยาของโมเลกุล

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Satapathy A. K. และคณะ [1] ได้ศึกษาการยับยั้งการกักร่อนโดยสารสกัดจากต้นพริ้วมอญ (*Justicia gendarussa*) บนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Mild steel) ใน 1 โมลาร์ของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งนำไปของต้นพริ้วมอญมาสกัดด้วยเมทานอล นำไปศึกษาพบว่ามีสารประกอบของ Alkaloids, Lignans, Naturally occurring phenolic dimmers, Plant oils, Flavonoids และ O-substituted aromatic amines จากหลักการพบว่าสารที่มีสมบัติยับยั้งการกักร่อนได้คือสารประกอบเฮเทอโรไซคลิกที่มี S, O, N และ  $\pi$  electrons จากนั้นนำมาผสมกับ

แม้ว่าสารละลายกรดไฮโดรคลอริกโดยอัตราส่วนโดยปริมาตรที่แตกต่างกัน นำเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมา

เช่นเพื่อทดสอบการกักคร่อนสามารถตรวจสอบได้โดยการหาน้ำหนักที่หายไป (Weight loss) และเทคนิคทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical techniques) โดยพบว่าที่ความเข้มข้นของสารสกัด สันพร้ามอยู่ 150 ppm ที่ 25°C มีประสิทธิภาพการยับยั้งการกักคร่อน 93% ทดสอบโดยเครื่อง Electrochemical impedance spectroscopy พบว่ากราฟ Nyquist แสดงการเพิ่มค่าความต้านทานของ ประจุไฟฟ้า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสันพร้ามอยู่ โดยการดูดซับของพื้นผิวนั้นเป็นไปตามสมการ ของ Langmuir adsorption isotherm จากนั้นทดสอบโดยเครื่อง Atomic force microscopy และ Electron spectroscopy for chemical analysis เพื่อยืนยันผลการยับยั้งการกักคร่อนได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

Gong Y. และคณะ [33] ได้ทำการศึกษาค้นคว้างานวิจัยในห้องปฏิบัติการของคลินิก เพื่อ ศึกษาวิธีการป้องกันโรคติดต่อทางเพศสัมพันธ์ โดยการควบคุมโรคเหล่านี้สามารถป้องกันได้ โดย การให้ยาที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งและป้องกันการแพร่กระจายเชื้อโรคเหล่านั้น ซึ่ง Diocyl sulfosuccinate sodium salt หรือ Docusate เป็นสารลดแรงตึงผิวที่อาจยับยั้งเชื้อไวรัสจากโรคเริมได้ โดยการขัดขวางการเคลื่อนที่ของไวรัสหรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโมเลกุลของเชื้อไวรัส ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า Docusate นั้นมีผลกระทบในแง่ลบกับไวรัสที่ก่อให้เกิดโรคเริม แต่จากการศึกษา พบว่า Docusate นั้นมีผลเสียคืออาจส่งผลให้เกิดการเจริญเติบโตของเนื้องอกในร่างกายและทำให้เกิดการคือยาคชนิด HSV 1, HSV 2 กับ EC90-100 แต่ส่งผลดีคือทำร้ายเซลล์ไวรัสของโรคเริมได้ถึง 90-100% โดยใช้ความเข้มข้นของ Docusate 0.005% w/v ในขณะที่มีการทำการทดลองเปรียบเทียบ โดยใช้ Sodium dodecyl sulfate (SDS) พบว่า Docusate นั้นมีประสิทธิภาพมากกว่าและมีผลเสียกับ ร่างกายน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ SDS ได้ทำการทดสอบเป็นเวลาสองวัน โดย Docusate มีความเข้มข้น 0.01% และ SDS 0.005% ซึ่งผลกระทบที่จะเกิดขึ้นทั้งหมดนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะเวลาและความถี่ในการใช้งาน

Rahman S. และคณะ [34] ได้ทำการทดสอบพบว่า Sarkosyl เป็นสารพื้นฟูที่ดีสำหรับ การศึกษา Vacuolar-type ATPase ในการเกิดอันตรปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวในการทดลองชีวิตวิทยา (Biacore) เป็นวิชาที่ทดลองเกี่ยวกับผิวสะท้อนซึ่งปรากฏการณ์นี้ใช้แสงช่วยในการทดสอบของ ปฏิกริยา ซึ่งการทดลองนี้จะศึกษาเกี่ยวกับปฏิกริยาของโปรตีน โดยมีขั้นตอนการเกิดปฏิกริยาที่ สำคัญคือ ขั้นตอนการฟื้นฟู (Regeneration) ผู้ทำการทดลองได้มีการนำสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุ ลบ คือ Sodium lauroly sarcosinate หรือ Sarkosyl มาใช้ในการทดลองโดย Sarkosyl ได้ทำหน้าที่ เป็นน้ำยาฟื้นฟู ผลที่ได้จากการทดลองนั้นพบว่ามีผลที่ดีต่อปฏิกริยาโดยไม่มีผลกระทบต่อการ ทำลายสารอื่นๆ โดยจะเข้าไปแทรกแซงในปฏิกริยาของน้ำและโปรตีนและผลจากการทดลองยัง บอกรีกว่า Sarkosyl นั้นมีค่าความเข้มข้นไมเซลล์ (CMC) เท่ากับ 0.42% ในน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Migahed M. A. และคณะ [35] ได้ทำการศึกษาการกักกรองของเหล็กเหนียวในสารละลายกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์ โดยใช้ p-Myristyloxy carbonyl methoxy-p'-sodium carboxylate-azobenzene ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Anionic surfactant) โดยทำการวัดแรงตึงผิวที่ 289 องศาเซลเซียส ได้ค่าความเข้มข้นไมเซลล์ (CMC) และค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญบางตัว พบว่าการดูดซับพื้นผิวของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบและเหล็กเป็นไปตามสมการของ Langmuir adsorption isotherm จากนั้นได้ทำการวัดประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อน โดยการทดสอบน้ำหนักที่หายไป (Weight loss) พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบนั้น พบว่าอัตราการกัดกร่อนนั้นจะลดลง เมื่อทดสอบด้วยเครื่อง Potentiostat ได้กราฟโพลาริเซชัน พบว่าเมื่อให้ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นค่ากระแสไฟฟ้ากัดกร่อนนั้นน้อยลง แสดงว่าอัตราการกัดกร่อนนั้นลดลง จากนั้นทดสอบด้วยเครื่อง Scanning electron microscopy พบว่าเมื่อจุ่มเหล็กในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบลงไป พบว่าพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กนั้นมีสภาพที่สมบูรณ์กว่าชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว โดยจากการทดลองนั้น การเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้น  $10^{-4}$  โมลาร์ นั้นมีประสิทธิภาพการกัดกร่อนได้มากที่สุด 95.82%

Wei Z. และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อการกัดกร่อนแบบหลุมของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ในสารละลายไฮโดรคลอริกโดยสารลดแรงตึงผิวประจุลบที่ใช้คือ Sodium dodecyl sulfate (SDS) สารลดแรงตึงผิวประจุบวก Dodecyl trimethylammonium chloride (DTAC) สารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ Triton-X-100 (Triton) จากการทดลองพบว่า SDS เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ขณะที่ DTAC และ Triton-X-100 ผลเล็กน้อยในการยับยั้ง เป็นการระบุว่า ประจุลบสามารถยับยั้งการกัดกร่อนได้ดีกว่า สิ่งที่ระบุกลไกของการยับยั้ง การวัดโดยใช้ Batch adsorption technique ในการทดสอบด้วยการดูดซับ เสนอแนะว่าการดูดซับอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการสำหรับการยับยั้งการกัดกร่อนแบบหลุม แต่เหตุผลการตอบสนองต่อหน่วยสนามไฟฟ้าหนึ่งของแต่ละโมเลกุล (Electrophoretic mobility) ในสารลดแรงตึงผิว ที่สร้างผิวหน้าของ เหล็กกล้าไร้สนิมให้เป็นประจุลบ เหตุผลทั้งหมดอธิบาย ผลของการยับยั้ง คือ การดูดซับ Electrostatic interactions และประจุคลอไรด์

Mohammad Ahmad Gharaibeh [37] ได้ทำการศึกษาโปรเจกต์นี้ได้เปรียบเทียบพฤติกรรม การต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 316 และ AISI 304 ในกรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริกและในน้ำทะเล โดยตัวอย่างถูกแช่อยู่ในกรดที่มีความเข้มข้นต่างกันเป็นเวลา 3 เดือน โดยวัดน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ สืบค้นหาจากการทดลองผลที่ได้ ผลของความเข้มข้นของกรด HCl ยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีฉุกเฉินเพื่อใช้ในการช่วยเหลือผู้ประสบภัยเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์อื่นใดได้  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีฉุกเฉินเพื่อใช้ในการช่วยเหลือผู้ประสบภัยเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์อื่นใดได้  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีฉุกเฉินเพื่อใช้ในการช่วยเหลือผู้ประสบภัยเท่านั้น ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์อื่นใดได้

$H_2SO_4$  ต่อ AISI 316 steel เมื่อความเข้มข้นของ  $H_2SO_4$  สูงขึ้นอัตราการสูญเสียมวลเพิ่มมากขึ้น แต่ AISI 304 เมื่อความเข้มข้นของ  $H_2SO_4$  ต่ำสุดจะมีอัตราการสูญเสียมวลมากที่สุด HCl มีผลการกัดกร่อน AISI 316 มากกว่า AISI 304 ที่ทุกความเข้มข้น HCl มีแนวโน้มจะกัดกร่อนเหล็กทั้งสองมากกว่า  $H_2SO_4$  ที่ทุกความเข้มข้น ผลของน้ำทะเลมีผลน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรด

Dagbert C. C. และคณะ [38] ได้ทำการศึกษาการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 (AISI 304) ที่มีสารลดแรงตึงผิวชีวภาพ ผลิตจากแบคทีเรียชูลิโคโมแนส ฟลูออเรสเซนส์ สารลดแรงตึงผิวชีวภาพ (Biosurfactant, BS) ที่ผลิตได้จากการเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *Pseudomonas fluorescens* (Solid medium) นำไปละลายในน้ำ Sterile deionise ก่อนทำการปรับปรุงผิวหน้า ต้องทำให้ผิวหน้าของตัวอย่าง (AISI 304) มีลักษณะเป็น 2 แบบคือ Polished surface และ Age surface สารลดแรงตึงผิวชีวภาพ (BS) เสมือนเป็นชั้นฟิล์มบน AISI 304 การทดลองทดสอบโดยใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้าได้แก่เทคนิค Galvanostatic ใน NaCl 0.15 M 20 ชั่วโมง ป้อนความหนาแน่นของกระแส  $10 \mu A/cm^2$  ใช้ SCE (ขั้วอ้างอิง) Titanium platinum (ขั้วตรงข้าม) AISI 304 (ขั้วทำงาน) เทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกใน NaCl 0.15 M 20 ชั่วโมงโดยป้อนกระแสให้กับชิ้นงานทำการทดสอบตัวอย่าง AISI 304 และ AISI 304 ที่ทำการปรับปรุง (ที่มี Biosurfactant) ทั้ง 2 เทคนิค นอกจากนี้ทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ที่ปรับปรุงด้วย Biosurfactant ที่ทำจากแบคทีเรีย *Pseudomonas fluorescens* มีพฤติกรรมที่ช่วยยับยั้งการกัดกร่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังไม่เป็นไม่เป็นมลพิษกับสิ่งแวดล้อม

Zhao T. และ Mu G. [39] ได้ทำการศึกษาความสามารถการดูดซับและการยับยั้งการกัดกร่อนของ Anion surfactant 3 ตัว คือ Dodecyl sulphonic acid sodium salt (DSASS), Dodecyl benzene sulfonic acid sodium salt (DBSASS) และ Sodium dodecyl sulfate (SDS) บนผิวอลูมิเนียม ในกรดไฮโดรคลอริก ศึกษาจาก Weight loss การดูดซับของ Surfactant สามารถช่วยป้องกันการกัดกร่อนได้ โดย Weight loss สอดคล้องกับสมการ Langmuir และยังสามารถหา จากวิธี Sekine และ Hirakaw ผลการทดลองได้กราฟ Weight loss ใช้ในการคำนวณหาค่าต่างๆ จากภาพที่ได้ การยับยั้งการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นจนถึงค่าความเข้มข้นหนึ่งหลังจากนั้นเส้นกราฟจะคงที่ เนื่องมาจากค่าความเข้มข้นถึงจุดที่เป็น CMC เมื่อถึงจุดนี้แล้วการดูดซับและการเคลือบของสารลดแรงตึงผิวบนอลูมิเนียม จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง การทดลองแสดงให้เห็นว่าค่า Weight loss ไม่เพียงแต่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ แต่ยังรวมไปถึงปัจจัยอื่นๆ เช่น การทำปฏิกิริยาระหว่างวัสดุกับสารลดแรงตึงผิวที่เคลือบอยู่ ความไม่สมดุล Potential บนผิวโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงาน

### 3.1 สารเคมี

1. ไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์ (Diocetyl sulfosuccinate sodium salt) เกรดวิเคราะห์ บริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด
2. โซเดียมลอริลซาร์โคซิเนต (Sodium lauroyl sarcosinate) เกรดวิเคราะห์ บริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด
3. เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316
4. โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride) เกรดวิเคราะห์
5. เอทานอล (Ethanol) เกรดวิเคราะห์
6. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride) เกรดวิเคราะห์
7. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

### 3.2 อุปกรณ์เครื่องมือ

1. เครื่องโพเทนชิโอสแตท/กัลวานอสแตท รุ่น PGSTAT302N บริษัท Metrohm Autolab B.V.
2. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดคาโลเมลอิမ်ตัว (Saturated calomel electrode, SCE) บริษัท HANNA INSTRUMENT
3. ขั้วตรงข้ามชนิดแพลทินัม (Platinum counter electrode) บริษัท HANNA INSTRUMENT
4. กระจายทรายเบอร์ 280, 600 และ 1200 บริษัท ทีโอเอ เฟ้นท์ (ประเทศไทย) จำกัด
5. เครื่องเป่าลมร้อน รุ่น TURBO DRY บริษัท บริษัท ฟิลิปส์อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด
6. อ่างอัลตราโซนิค (Ultrasonic bath) รุ่น E 30 H บริษัท Elma
7. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว
8. เครื่องชั่งสาร รุ่น NewClassic MF บริษัท ITS (Thailand) Co. Ltd
9. เครื่องวัดแรงดึงผิว รุ่น JZYM -200A บริษัท Beijing United Test
10. ตะเกียงแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
11. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง Olympus รุ่น BX51 บริษัท OLYMPUS จำกัด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316

- นำแท่งโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 16 มิลลิเมตร มาตัดด้วยเครื่องตัดโลหะตามแนวขวาง โดยให้มีความหนา 3 มิลลิเมตร

- นำชิ้นตัวอย่างโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 มาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 280 เพื่อทำการขัดออกไซด์และสารปนเปื้อนที่บริเวณผิวหน้าที่ต้องการ โดยใช้น้ำช่วยในการขัดเพื่อลดความร้อนและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากนั้นขัดต่อด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600 และ 1200 ในน้ำเช่นเดียวกัน เพื่อให้พื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างมีความเรียบแล้วทำการล้างชิ้นงานให้สะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออน

- แช่ชิ้นงานตัวอย่างในเอทานอลแล้วใส่ในอ่างอัลตราโซนิกที่ 44 KHz เป็นเวลา 5 นาที เพื่อทำความสะอาดชิ้นงาน

- เป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน

- นำชิ้นงานตรวจวิเคราะห์ทางกายภาพโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง Olympus รุ่น BX51 ด้วยกำลังขยาย 50 เท่า และ 100 เท่า

#### 3.3.2 การเตรียมสารเคมีในการทดลอง

การเตรียมโซเดียมคลอไรด์ 3%

- ชั่ง โซเดียมคลอไรด์จำนวน 30 กรัม ในบีกเกอร์ขนาดเล็ก ชั่งน้ำปราศจากไอออน 970 กรัม นำไปละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เตรียมไว้

การเตรียมกรดไฮโดรคลอริก 1:1 โดยน้ำหนัก

- ชั่งกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% 100 กรัมและน้ำปราศจากไอออน 100 กรัม ในบีกเกอร์แล้วทำการปั่นกวนให้เข้ากัน เพื่อใช้สำหรับล้างขั้วตรงข้ามชนิดแพลทินัม

#### 3.3.3 วิธีการวัดแรงดึงผิว

- นำวงแหวน Platinum iridium ไปแขวนในตำแหน่งปลายของ Lever arm

- เทสารที่ต้องการวัดแรงดึงผิวลงในบีกเกอร์ให้มีระดับมากกว่า 7 มิลลิเมตร แล้ววางบนที่วางตัวอย่างภายในเครื่อง

- เลื่อนบีกเกอร์จนได้ตำแหน่งอยู่ใต้วงแหวน Platinum iridiumพอดี

- หมุนปุ่มตั้งค่าแรงดึงผิวให้เท่ากับ 0 mN/m

- กดปุ่มเลื่อนแทนว่างบีกเกอร์ขึ้นให้วงแหวน Platinum iridium จมในสารละลาย

- กดปุ่มเลื่อนแทนว่างบีกเกอร์ลง รอจนกระทั่งวงแหวน Platinum iridium พ้นจาก

สารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น เปลี่ยนความเข้มข้นของสารลดแรงดึงผิวแล้วทำการวัดแรงดึงผิวใหม่

- วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารลดแรงดึงผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% เพื่อหาค่า CMC

### 3.3.4 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดีนามิกโพลาริเซชัน

ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode)

- นำชิ้นงานตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ที่เตรียมไว้บรรจุลงในอุปกรณ์จับ

ยึดขั้วไฟฟ้าทำงานดังรูปที่ 3.1

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)

- เติมสารละลายที่ใช้ในการทดลองลงในสะพานเกลือ กำจัดฟองอากาศที่อยู่ภายใน

- ตรวจสอบขั้วไฟฟ้าอ้างอิงชนิดคาโลเมลอิ่มตัว (Saturated calomel electrode, SCE)

- นำสะพานเกลือและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมาประกอบดังรูปที่ 3.1

ขั้วไฟฟ้าตรงข้าม (Counter electrode)

- ใช้โลหะแพลทินัมเป็นขั้วตรงข้าม โดยทำการล้างขั้วแพลทินัมด้วยน้ำปราศจากไอออน

- แห่ขั้วไฟฟ้าตรงข้ามในกรดไฮโดรโครอริก 1:1 เป็นเวลา 5 นาทีแล้วจากนั้นทำการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนอีกครั้ง

การทดสอบการกัดกร่อน

- เติมสารละลายตัวอย่าง (โซเดียมคลอไรด์ 3%) ลงในภาชนะแก้วสำหรับบรรจุสารอิเล็กโทรไลต์ จากนั้นทำการจัดเซลล์การทดลองดังรูปที่ 3.1 โดยให้ระยะห่างส่วนของปลายสะพานเกลือกับชิ้นงานตัวอย่างมีค่าประมาณ 2 มิลลิเมตร

- ฟันก๊าซในโตรเจนลงสู่สารละลายเป็นเวลา 30 นาทีก่อนเริ่มการทดสอบ

- เลือกสภาวะทดสอบ โดยทำการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าด้วยอัตราเร็ว 600 mV/hr เพื่อวัดค่า

กระแสไฟฟ้า

- ทำการต่อขั้วไฟฟ้าของเครื่องโพเทนชิโอสเตทกับชุดการทดลองการกัดกร่อน

- เริ่มทำการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าที่อัตรา 600 mV/hr และวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้

- เมื่อทำการวัดเสร็จสิ้น ทำการบันทึกข้อมูลลงในเครื่องคอมพิวเตอร์

- นำชิ้นงานที่ทดลองเสร็จแล้วไปตรวจวิเคราะห์ทางกายภาพ โดยกล้องจุลทรรศน์

แบบแสง Olympus รุ่น BX51 ด้วยกำลังขยาย 50 เท่า และ 100 เท่า

- ทำการทดลองซ้ำ โดยการเปลี่ยนสารละลายตัวอย่างให้มีความเข้มข้นของสารลด

แรงดึงผิวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 0.1 เท่าของ CMC
- 1 เท่าของ CMC
- 2 เท่าของ CMC



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ของเซลล์การกักต้อนสำหรับเครื่องโพเทนชิโอสเตท

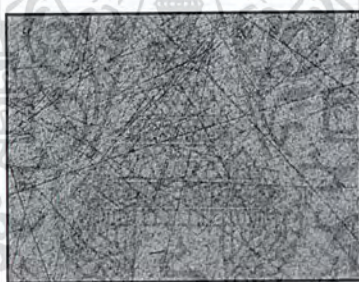
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาผลการยับยั้งการกัดกร่อนของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ 2 ชนิดคือ โซเดียมลอริลซัลเฟต และไดออกทิล ซัลโฟซัลเฟต โซเดียมซอลต์ในเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% โดยนำสารลดแรงตึงผิวทั้งสองชนิดมาหาค่าความเข้มข้นวิกฤตของการเกิดไมเซลล์ (CMC) ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นที่มีการดูดซับได้มากที่สุดและเริ่มเกิดไมเซลล์ นำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลต่อการยับยั้งการกัดกร่อน โดยการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอสแตติกโพลาไรเซชัน ด้วยอัตราเร็วในการตรวจวัดเท่ากับ 600 mV/hr

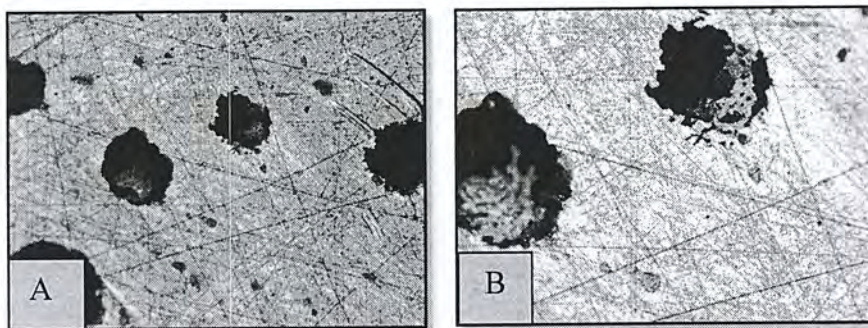
#### 4.1 ผลจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316



รูปที่ 4.1 พื้นผิวชิ้นงานหลังขัลดกระดาศทราย กำลังขยาย 50 เท่า

รูปที่ 4.1 แสดงพื้นผิวที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 หลังจากทำการขัลดด้วยกระดาศทรายเพื่อปรับสภาพพื้นผิวให้เรียบขึ้นและกำจัดชั้นออกไซด์ของเหล็กและโครเมียมที่มีอยู่เดิมที่กำลังขยาย 50 เท่า จะเห็นว่าพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 มีความสม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

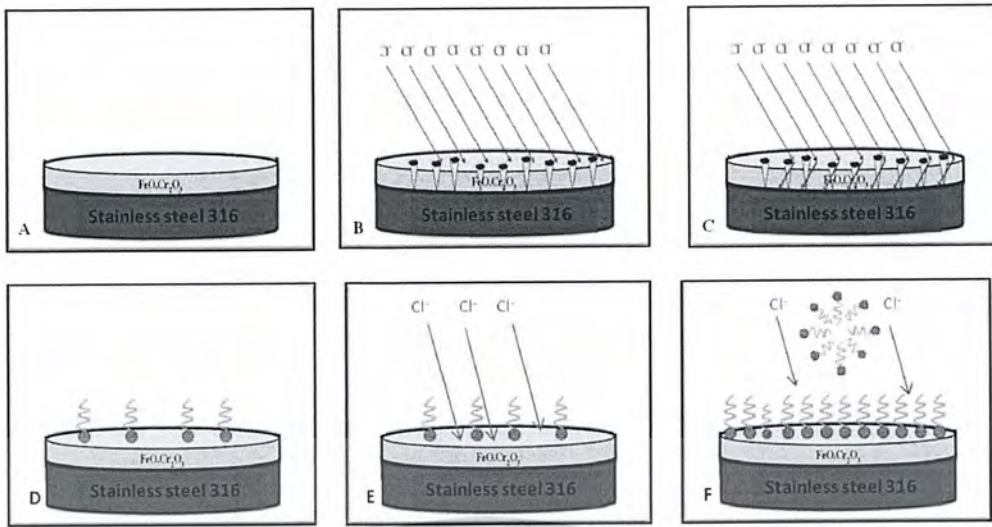


รูปที่ 4.2 พื้นผิวชิ้นงานหลังจากการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% ที่มีสารลดแรงตึงผิวไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์ที่ความเข้มข้น 2 เท่าของ CMC (A) กำลังขยาย 50 เท่าและ (B) กำลังขยาย 100 เท่า

รูปที่ 4.2 แสดงพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 หลังจากการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดินามิกโพลาริเซชันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% ที่มีสารลดแรงตึงผิวไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์ที่ความเข้มข้น 2 เท่าของ CMC ด้วยกำลังขยาย 50 เท่า และ 100 เท่า โดยมีการเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้า จนกระทั่งมีค่าสูงกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม ( $E_{pit}$ ) ซึ่งชิ้นงานจะเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม โดยพบว่ามีหลุมกระจายอยู่ทั่วไป

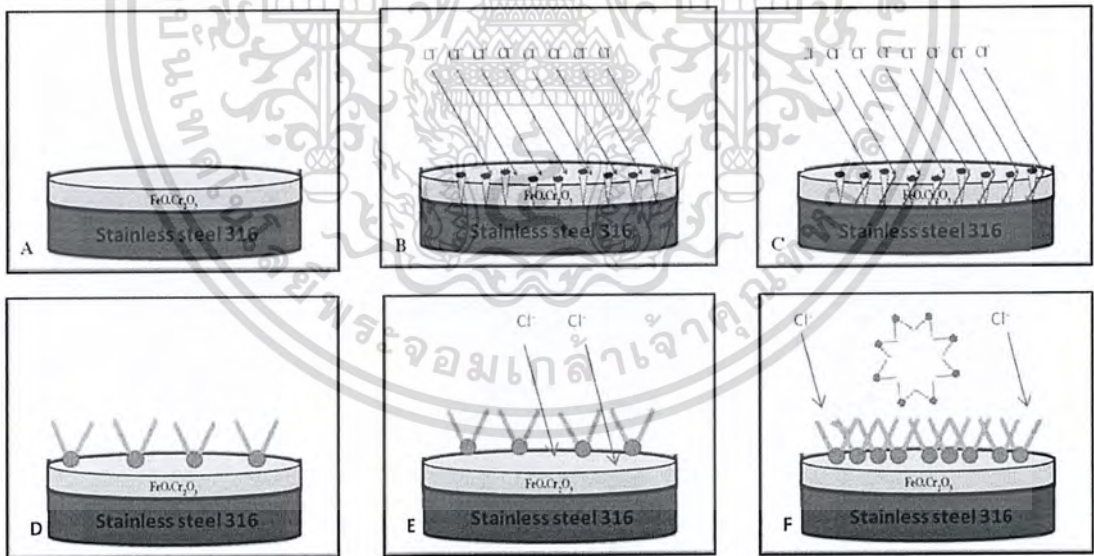
โดยทั่วไปการกัดกร่อนแบบหลุมเกิดเมื่อโลหะอยู่ในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออนและที่ผิวโลหะเกิดความต่างศักย์แสดงตัวเป็นบริเวณแอโนดและแคโทดเล็กๆ ขึ้น โดยบริเวณแอโนดจะถูกกัดกร่อนไปจนเกิดเป็นหลุมทำให้คลอไรด์ไอออนสามารถแพร่เข้าไปในหลุมนั้นได้ ซึ่งจะเร่งให้โลหะเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมได้มากขึ้น โดยโลหะภายในหลุมจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้โลหะไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 โดยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบโซเดียมลอริลซัลเฟต

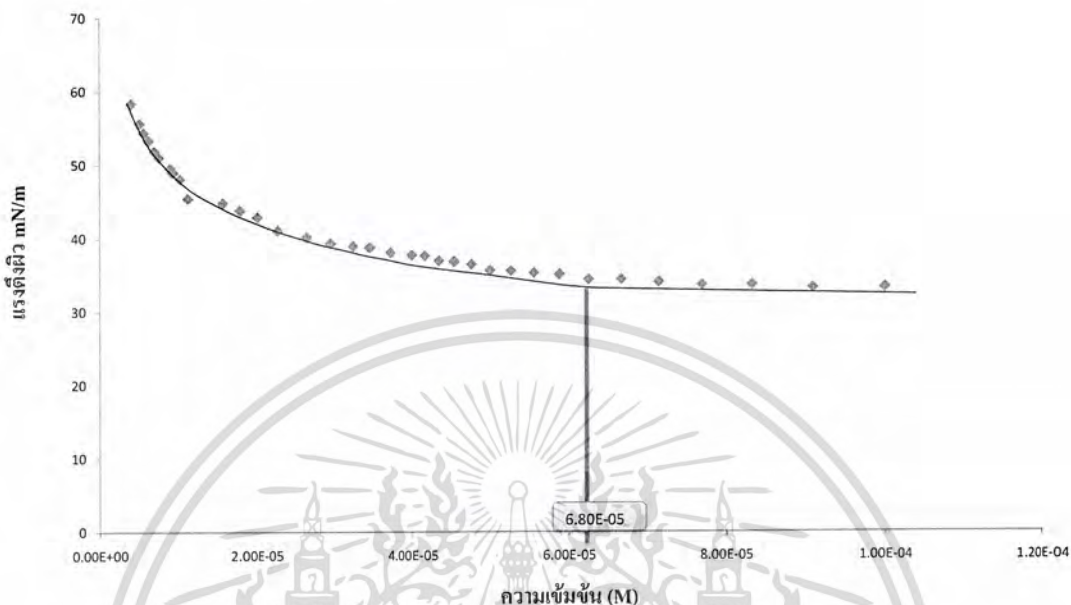
รูปที่ 4.3 เป็นแบบจำลองแสดงการดูดซับของโซเดียมลอริลซัลเฟตบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 เพื่อป้องกันการเข้าทำปฏิกิริยาของคลอไรด์ไอออน ทำให้สามารถยับยั้งการกัดกร่อนแบบหลุมที่จะเกิดขึ้นได้



รูปที่ 4.4 การเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 โดยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์

รูปที่ 4.4 เป็นแบบจำลองแสดงการดูดซับของไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์บนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 เพื่อป้องกันการเข้าทำปฏิกิริยาของคลอไรด์ไอออน ทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สามารถยับยั้งการกัดกร่อนแบบหลุมที่จะเกิดขึ้นได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ค่าความเข้มข้นวิกฤติของการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์

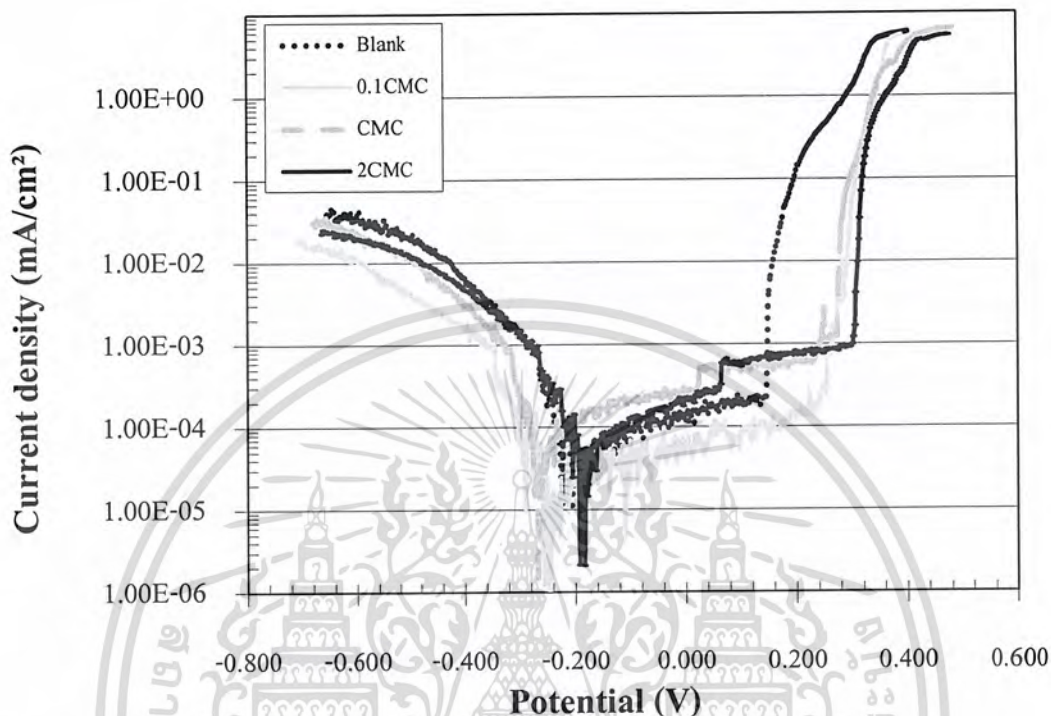


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวกับความเข้มข้นของ ไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์

รูปที่ 4.3 เป็นกราฟที่มาจากกราฟวัดค่าแรงตึงผิวที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ ไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์ โดยใช้เครื่องวัดแรงตึงผิว จากกราฟพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลายเพิ่มขึ้น ค่าแรงตึงผิวของสารละลายจะมีค่าลดลงจนกระทั่งถึงที่ ค่าเริ่มต้นที่แรงตึงผิวมีค่าคงที่ที่จุดนี้เมื่อลากกราฟตัดแกนนอนจะได้ค่าความเข้มข้นวิกฤติของการเกิดไมเซลล์ (CMC) ซึ่งค่าความเข้มข้นนี้เป็นค่าที่สารลดแรงตึงผิวมีการดูดซับบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างมากที่สุดและเริ่มเกิดไมเซลล์ จากกราฟพบว่าได้ค่าที่แรงตึงผิวเริ่มมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนเกือบคงที่เท่ากับ 33 mN/m ซึ่งให้ค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลายเท่ากับ  $6.80 \times 10^{-5}$  M นำค่าความเข้มข้นวิกฤติการเกิดไมเซลล์นี้เป็นเกณฑ์ในการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ด้วยการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 โดยไดออกทิล ซัลโฟซัคซิเนต โซเดียมซอลต์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3%



รูปที่ 4.6 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3% ที่ไม่เติมและเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบไดออกทิลซัลโฟซัคซิเนต โซเดียมซอลต์ที่ความเข้มข้น 0.1, 1 และ 2 เท่าของ CMC

รูปที่ 4.4 เป็นกราฟที่มาจากการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบไดออกทิล ซัลโฟซัคซิเนต โซเดียมซอลต์ในการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3% พบว่าจากกราฟสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{corr}$ ) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม ( $E_{pit}$ ) ได้โดยค่าดังกล่าวแสดงในตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองใช้ไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์ในการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3%

ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (เท่าของ CMC)	$E_{corr}$ ( $V_{SCE}$ )	$i_{corr}$ ( $mA/cm^2$ )	$E_{pit}$ ( $V_{SCE}$ )
ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว	-0.221	$5.76 \times 10^{-5}$	0.145
0.1	-0.295	$2.30 \times 10^{-5}$	0.253
1	-0.274	$9.70 \times 10^{-5}$	0.273
2	-0.192	$9.80 \times 10^{-5}$	0.301

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.1 ค่า  $E_{corr}$  ของทุกการทดลองกระจายตัวอยู่ในช่วงแคบๆ ประมาณ -0.245 V พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{corr}$ ) มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงน้อยมาก โดยค่า  $i_{corr}$  นั้นจะเป็นค่าที่บ่งบอกการถึงอัตราการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ เนื่องจากเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ประกอบด้วย โครเมียม 18% นิกเกิล 8% โมลิบดีนัม 2% ที่สามารถสร้างชั้นป้องกันตามธรรมชาติได้ดี ดังนั้นแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% ไม่ทำให้ค่า  $i_{corr}$  เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญได้ เนื่องจากมีชั้นป้องกันตามธรรมชาติที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอได้ค่อนข้างดีอยู่แล้ว ทำให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันและต่ำมากในระดับ  $10^{-5} mA/cm^2$

ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม ( $E_{pit}$ ) จะมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์จะไปเกาะที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ซึ่งเปรียบเสมือนมีฟิล์มบางๆ เคลือบบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ทำให้คลอไรด์ไอออนเข้ามาทำปฏิกิริยากับชั้นป้องกันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ได้น้อยลง ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมมีค่าเพิ่มขึ้น

จากการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม ( $E_{pit}$ ) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิวมีค่า  $E_{pit}$  ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.145 V และเมื่อเติมไดออกทิล ซัลโฟซักซิเนต โซเดียมซอลต์ที่ความเข้มข้น 0.1 เท่าของ CMC พบว่าค่า  $E_{pit}$  ขยับไปทางขวามากขึ้น มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.253 V ซึ่งกล่าวได้ว่าโอกาสในการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมเป็นไปได้ยากขึ้น ที่ความเข้มข้นเท่ากับ CMC ซึ่งตามหลักการสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นนี้จะมีการดูดซับที่พื้นผิวได้มากที่สุดและเริ่มเกิดการสร้างไมเซลล์ พบว่าค่า  $E_{pit}$  มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกเป็น 0.273 V และจากการทดลองที่ความเข้มข้น 2 เท่าของ CMC พบว่ามีค่า  $E_{pit}$  เท่ากับ 0.301 V ซึ่งมากกว่าค่า  $E_{pit}$  ที่ได้จากการทดลองที่ความเข้มข้นเท่ากับ CMC เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวที่เติมเข้า

ไปเพิ่มขึ้นในสารละลายอาจสร้างความเกาะที่พื้นผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ได้มากขึ้น ทำให้โอกาสการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมเป็นไปได้ยากมากขึ้นอีก

#### 4.4 ค่าความเข้มข้นวิกฤติของการเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ โโซเดียมลอริลซัลเฟต



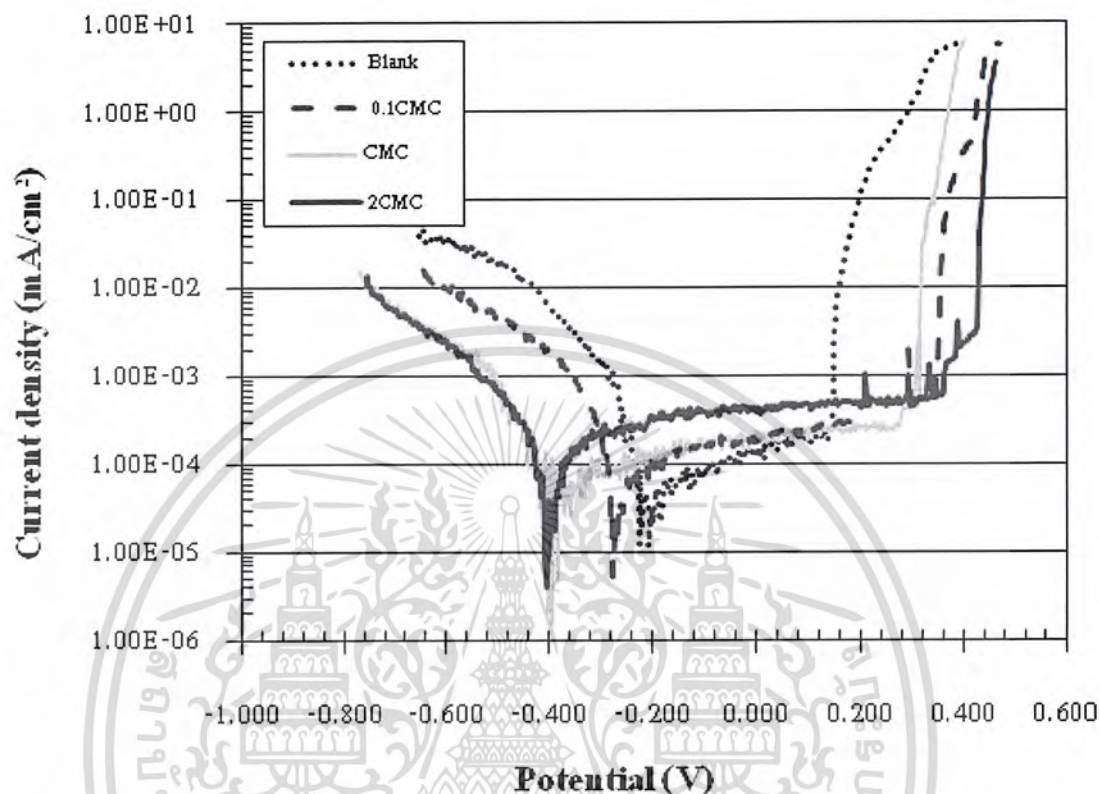
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวกับความเข้มข้นของ โซเดียมลอริลซัลเฟต

รูปที่ 4.5 เป็นกราฟที่มาจากกราฟวัดค่าแรงตึงผิวที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ โซเดียมลอริลซัลเฟต จากกราฟพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย เพิ่มขึ้น ค่าแรงตึงผิวของสารละลายจะมีค่าลดลงจนกระทั่งคงที่ ค่าเริ่มต้นที่แรงตึงผิวมีค่าคงที่ที่จุดนี้ เมื่อลากกราฟตัดแกนอนจะได้อค่าความเข้มข้นวิกฤติของการเกิดไมเซลล์ (CMC) ซึ่งค่าความเข้มข้นนี้เป็นค่าที่สารลดแรงตึงผิวมีการดูดซับบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างมากที่สุดและเริ่มเกิด ไมเซลล์ จากกราฟพบว่าได้ค่าที่แรงตึงผิวเริ่มมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนเกือบคงที่เท่ากับ 46 mN/m ซึ่งให้ค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลายเท่ากับ  $1.10 \times 10^{-5}$  M นำค่าความเข้มข้น วิกฤติการเกิดไมเซลล์นี้เป็นเกณฑ์ในการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว เพื่อศึกษา ผลของความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า 316 ด้วยการทดสอบโดยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกโพลาไรเซชัน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 โดยโซเดียมลอริลซัลเฟตโคซิมิเตนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3%



รูปที่ 4.8 กราฟโพเทนชิโอไดนามิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3% ที่ไม่เติมและเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบโซเดียมลอริลซัลเฟตโคซิมิเตนที่ความเข้มข้น 0.1, 1 และ 2 เท่าของ CMC

รูปที่ 4.6 เป็นกราฟที่มาจากการใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบโซเดียมลอริลซัลเฟตโคซิมิเตนในการยับยั้งการกัดกร่อนแบบหลุมของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 3% พบว่า จากกราฟสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $E_{\text{corr}}$ ) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $i_{\text{corr}}$ ) และค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม ( $E_{\text{pit}}$ ) ได้แสดงดังตารางที่

4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองใช้โซเดียมลอริลซัลเฟต ในการยับยั้งการกัดกร่อนของ เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3%

ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (เท่าของ CMC)	$E_{corr}$ ( $V_{SCE}$ )	$i_{corr}$ ( $mA/cm^2$ )	$E_{Pit}$ ( $V_{SCE}$ )
ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว	-0.221	$5.76 \times 10^{-5}$	0.145
0.1	-0.245	$5.70 \times 10^{-5}$	0.335
1	-0.395	$1.35 \times 10^{-5}$	0.273
2	-0.404	$2.16 \times 10^{-5}$	0.356

จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.2 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบโซเดียมลอริลซัลเฟต ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงน้อยมากและอยู่ในระดับ  $10^{-5}$   $mA/cm^2$  สามารถกล่าวได้ว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบโซเดียมลอริลซัลเฟต มีอิทธิพลน้อยมากต่อการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316

ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าเลื่อนไปทางลบมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มสารลดแรงตึงผิวโซเดียมลอริลซัลเฟตลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% จากการทดลองที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวโซเดียมลอริลซัลเฟตค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ -0.221 V และจากการเติมสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้น 2 เท่าของ CMC พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ -0.404 V การลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนนี้แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการออกซิไดซ์ (Oxidizing power) ของสารละลายลดลงหลังจากการเติมสารลดแรงตึงผิว แต่อย่างไรก็ตาม การพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวไม่สามารถบอกถึงอัตราเร็วในการเกิดการกัดกร่อนได้ โดยทั่วไปค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจะเป็นตัวแทนโดยตรงที่จะแสดงถึงอัตราเร็วในการเกิดการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ

จากการทดลองพบว่าเมื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบหลุม ( $E_{pit}$ ) ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% ที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิวมีค่า  $E_{pit}$  ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.145 V และส่วนที่เติมสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบโซเดียมลอริลซัลเฟตมีค่า  $E_{pit}$  แกว่งตัวอยู่ประมาณ 0.324 V แสดงให้เห็นว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบโซเดียมลอริลซัลเฟตทำให้เหล็กกล้าไร้สนิม 316 มีความต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุมดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการยับยั้งการกักกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3% ด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ 2 ชนิด ได้แก่ โซเดียมลอริลซัลเฟตและไดออกทิล ซัลโฟซัคซิเนต โซเดียมซอลต์ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ชั้นป้องกันตามธรรมชาติของเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักกร่อนที่ได้มีค่าต่ำและใกล้เคียงกันในทุกความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว
2. สารลดแรงตึงผิวไดออกทิล ซัลโฟซัคซิเนต โซเดียมซอลต์มีประสิทธิภาพยับยั้งการกักกร่อนแบบหลุมดีที่สุดที่ความเข้มข้น 2 เท่าของ CMC หรือ  $1.36 \times 10^{-4}$  M โดยให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักกร่อนแบบหลุมเท่ากับ 0.301 V และเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวค่าศักย์ไฟฟ้าการกักกร่อนแบบหลุมมีค่าเพิ่มขึ้น
3. สารลดแรงตึงผิวโซเดียมลอริลซัลเฟตมีประสิทธิภาพยับยั้งการกักกร่อนแบบหลุมดีที่สุดที่ความเข้มข้น 2 เท่าของ CMC หรือ  $2.20 \times 10^{-3}$  M โดยให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกักกร่อนแบบหลุมเท่ากับ 0.356 V

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรทำการทดลองเพื่อศึกษาความสามารถในการยับยั้งการกักกร่อนของสารลดแรงตึงผิวที่มีโครงสร้างคล้ายกับไดออกทิล ซัลโฟซัคซิเนต โซเดียมซอลต์ แต่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเพียงสายเดียว กับไดออกทิล ซัลโฟซัคซิเนต โซเดียมซอลต์ ที่มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน 2 สาย เพื่อเปรียบเทียบถึงความสามารถในการยับยั้งการกักกร่อนของสารทั้งสองชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



[15] Siam stainless, (2010). “คุณสมบัติทางกายภาพของสแตนเลส”, [Online], Available: <http://www.siamstainless.com/?p=1038>

[16] Avesta Sheffield AB. (1994). “Avesta Sheffield Corrosion Handbook.” Sweden: Avesta Sheffield AB and AB Sandvik Steel.

[17] Sedriks A. J. (1979). “Corrosion of Stainless Steels.” New York: John Wiley & Sons.

[18] หนึ่งหทัย คงอินทร์, อหิตยา จันเสนาและ อัจฉราภรณ์ ใจปราณี. (2551). “การศึกษาการยับยั้งการกัดกร่อนของเหล็ก CK45 ด้วยสารสกัดใบรางจืด สาบเสือและพญาขอในกรดซัลฟิวริก 0.05 โมลาร์” โครงการงานพิเศษหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาเคมีอุตสาหกรรม, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[19] WebAnswers, Inc., (2011). “Electricity & Electronics”, [Online], Available:

<http://www.webanswers.com/science/electricity-electronics/what-is-a-potentiostat-and-what-is-its-common-purpose-s-6c33fa>

[20] Chemplus Trading Partnerships, (2008). “สารระน้ำรู้ Surfactant (สารลดแรงตึงผิว)”, [Online], Available: <http://www.chemplustrading.com/article01.html>

[21] Myers D. (2006). “Surfactant science and technology.” (3<sup>rd</sup> ed.). New jersey: John Wiley & Sons.

[22] Myers D. (1988). “Surfactant science and technology.” New York: VCH Publishers.

[23] Sigma-Aldrich Co. LLC., “Dioctyl sulfosuccinate sodium salt”, [Online], Available:

[http://www.sigmaaldrich.com/catalog/ProductDetail.do?D7=0&N5=SEARCH\\_CONCAT\\_PNO%7CBRAND\\_KEY&N4=D201170%7CALDRICH&N25=0&QS=ON&F=SPEC](http://www.sigmaaldrich.com/catalog/ProductDetail.do?D7=0&N5=SEARCH_CONCAT_PNO%7CBRAND_KEY&N4=D201170%7CALDRICH&N25=0&QS=ON&F=SPEC)

[24] Marta, (2006). “Sodium Lauroyl Sarcosinate”, [Online], Available:

<http://truthinaging.com/ingredients/sodium-lauroyl-sarcosinate>

[25] Mail Order Company, (2001). “Sodium Lauroyl Sarcosinate”, [Online], Available:

<http://www.aussiesoapsupplies.com.au/Sodium-Lauroyl-Sarcosinate-pr-508.html>

[26] Chemicalland21, (2011). “DIOCTYL SODIUM SULFOSUCCINATE”, [Online],

Available:<http://chemicalland21.com/specialtychem/perchem/DIOCTYL%20SODIUM%20SULFOSUCCINATE.htm>

[27] Chemwiki, (2010). “Cohesive and Adhesive Forces”, [Online], Available:

[http://chemwiki.ucdavis.edu/Physical\\_Chemistry/Physical\\_Properties\\_of\\_Matter/Intermolecular\\_Forces/Cohesive\\_And\\_Adhesive\\_Forces](http://chemwiki.ucdavis.edu/Physical_Chemistry/Physical_Properties_of_Matter/Intermolecular_Forces/Cohesive_And_Adhesive_Forces)

[28] ดร.ทักษ์กมนต์ วิกฤษณ์ธนาวุฒิ, (2011). “กลศาสตร์ของไหล”,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
[http://www.sci.rmuti.ac.th/physics/physics1/Phys1\\_Chapter\\_08.pdf](http://www.sci.rmuti.ac.th/physics/physics1/Phys1_Chapter_08.pdf)  
 ไม่ว่ากันแต่ๆ ฟังสน อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [29] Teachertop, (2010). “แรงตึงผิว (Surface Tension)”, [Online], Available: <http://images.teachertop.multiply.multiplycontent.com/attachment/0/TA38GAooCzUAAHyfWHo1/2.surface%20tension.pdf?key=teachertop:journal:19&nmid=341624020>
- [30] Biolin Scientific, (2009). “Surface Tension”, [Online], Available: <http://www.attension.com/surface-tension.aspx>
- [31] ราตรี ปิ่นทอง, ถักษณา ตันติจรรยารัตน์และสุชาสินี วงศ์ศรีวัฒนกุล. (2543). “การดูดซับสารละลายสีข้อมโดยใช้ต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลัง” โครงการงานพิเศษหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [32] Wikipedia, (2011). “การดูดซึม”, [Online], Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%94%E0%B8%B9%E0%B8%94%E0%B8%8B%E0%B8%B6%E0%B8%A1>
- [33] Gong Y., Wen A., Cheung D., Wong M., & Sacks S.L. (2001). “Preclinical evaluation of docusate as protective agent from herpes simplex viruses.” *Antiviral Research*, 52, 25–32.
- [34] Rahman S., Arai S., Saijo S., Yamato I. & Murata T. (2011). “Sarkosyl is a good regeneration reagent for studies on vacuolartype ATPase subunit interactions in Biacore experiments.” *Analytical Biochemistry*, 418, 301–303.
- [35] Migahed M. A., Azzam M. S. & Al-Sabagh A. M. (2004). “Corrosion inhibition of mild steel in 1 M sulfuric acid solution using anionic surfactant.” *Materials Chemistry and Physics*, 85, 273–279.
- [36] Wei Z., Somasundaran P. & DUBY P. (2004). “Pitting Inhibition by Surfactants.” *Journal of the Electrochemical Society*, 151, 6(April): B304-B308.
- [37] Gharaibeh M. A., (2009). “A Study of Corrosion Rate of AISI 304 and AISI 316 Stainless Steels in Hydrochloric Acid, Sulfuric Acid and Dead Sea Water”, Submitted In the Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of B.Sc in Industrial Engineering
- [38] Dagbert C. C., Meylheuc, Thierry T., Bellon-Fontaine & Marie Noelle M. N. (2006). “Corrosion behaviour of AISI 304 stainless steel in presence of abiosurfactant produced by *Pseudomonas fluorescens*.” *Electrochimica Acta*, 51, 1–5.
- [39] Zhao T. & Mu G. (1999). “The adsorption and corrosion inhibition of anion surfactants on aluminium surface in hydrochloric acid.” *Corrosion Science*, 41, 1937-1944.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้