

การศึกษาผลของสารยับยั้งการกักคร่อนของดินุกโดยใช้ไพรีติน



นายภาณุวัฒน์ วารีนิช  
นายสมชาย บ้านใหม่  
นายสมบูรณ์ นารารนนท์


ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2544

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 45691  
วัน, เดือน, ปี..... 13 ก.พ. 2546

b.....  
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Study of Pyridine as Corrosion Inhibitor for Tin



Mr. Panuwat Wareewanit  
Mr. Somchai Banmai  
Mr. Somboon Naraworanant

A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Bachelor of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2001

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาผลของสารยับยั้งการถูกกัดกร่อนของดีบุกโดยใช้ไฟรีติน  
โดย นายภานุวัฒน์ วารวินิช  
นายสมชาย บ้านใหม่  
นายสมบุรณ์ นาราวรนนท์  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. โจโกะ เทเรซ่า อีโต้  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์  
รศ.ดร. เสน่ห์ เอกะวิภาต

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

..... 25..... ประธานกรรมการ  
(ดร. โจโกะ เทเรซ่า อีโต้)

..... กรรมการ  
(ผศ.ดร. ไพศาล นาคพิพัฒน์)

..... กรรมการ  
(รศ.ดร. เสน่ห์ เอกะวิภาต)

..... กรรมการ  
(อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวานิชย์)

..... กรรมการ  
(อาจารย์รณฤดี เบญจางคประเสริฐ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การศึกษาผลของสารยับยั้งการกักตกร่อนของดีบุกโดยใช้ไพรีดีน  
โดย นายภานุวัฒน์ วารีนวิช  
นายสมชาย บ้านใหม่  
นายสมบุญ นาราวรนนท์

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. โจโกะ เทเรซ่า อิโด้

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์  
รศ.ดร.เสนห์ เอกะวิภาต

ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

#### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาผลของสารยับยั้งการกักตกร่อนที่เกิดขึ้นบนผิวของดีบุก โดยเริ่มจากการศึกษาการกักตกร่อนตามธรรมชาติของดีบุกในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก และกรดไนตริก ที่ความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล แล้วทำการเลือกใช้สารยับยั้งการกักตกร่อนที่เหมาะสมมาทำการทดลองเปรียบเทียบกันในภาวะที่เป็นกรด เพื่อหาอัตราการกักตกร่อนที่เปลี่ยนไปหลังจากทำการเติมสารยับยั้งการกักตกร่อนแล้ว

สารยับยั้งการกักตกร่อนสำหรับดีบุกในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก และกรดไนตริกนี้คือ ไพรีดีน ซึ่งจะทำการศึกษาในส่วนของวิธีการวัดน้ำหนักที่หายไป และวิธีวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ จากการศึกษาผลของสารยับยั้งการกักตกร่อนโดยใช้ไพรีดีน เป็นสารยับยั้งการกักตกร่อนพบว่า ดีบุกมีความสามารถในการต้านทานการกักตกร่อนในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก และกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มอลเพิ่มขึ้น และหลังจากดีบุกเริ่มมีการกักตกร่อนพบว่าอัตราการกักตกร่อนจะเกิดขึ้นช้าลง

Report Title                    The Study of Pyridine as Corrosion Inhibitor for Tin

By                                    Mr. Panuwat    Wareewanit

    Mr. Somchai    Banmai

    Mr. Somboon   Naraworanant

Advisor                            Dr. Choko    Tereza    Ito

Co-Advisor                        Asst. Prof. Dr. Paisal    Nakpipat

    Assoc. Prof. Dr. Sanay    Akavipat

Report for                         Bachelor Degree of Chemical Engineering

    Department of Chemical Engineering

    Faculty of Engineering

    King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

### **Abstract**

The inhibition of the corrosion for Tin was studied in 0.1N hydrochloric acid, sulfuric acid and nitric acid solution. The efficiency to resist corrosion of pyridine on tin substrate was compared using weight loss and electrochemical potentiostat polarization methods. The experiments were carried out in 0.1N hydrochloric acid, sulfuric acid and nitric acid solution in the absence and presence of inhibitor. As the concentration of pyridine was increased, the corrosion rate has decreased because Tin has increased the corrosion resistance. After the protective film was destructed, the corrosion rate was slower than the absence of pyridine acid solution; pyridine exhibited better performance as a corrosion inhibitor for Tin in hydrochloric acid solution.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเพราะความอนุเคราะห์ของหลายฝ่ายด้วยกัน ซึ่ง  
คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ

คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ  
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่  
จำเป็นในการทดลอง ตลอดจนการให้คำปรึกษาโดยตลอด

เจ้าหน้าที่ฝ่ายประกันคุณภาพการศึกษา สำนักงานอธิการบดี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการประสานงาน

คณาจารย์ เจ้าหน้าที่ และเพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์ที่ใช้ปฏิบัติ  
การ ตลอดจนคำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาต่างๆ และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร. โจโกะ เทเรซ่า อีโต้ อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ไพศาล  
นาคพิพัฒน์ และ รศ.ดร. เสน่ห์ เอกะวิภาค อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทั้งทางด้าน  
ทฤษฎีและปฏิบัติ ตลอดจนการให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิดมาโดยตลอด ซึ่งคณะผู้จัดทำขออ้อมรับและ  
ขออภัยทุกข้อผิดพลาดทุกประการไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

15 มีนาคม 2545

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
สัญลักษณ์.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 วิธีการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 ดิบุก.....	3
2.3 หลักการพื้นฐานของการกััดกร่อน.....	4
2.3.1 ความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้า.....	5
2.3.2 ความเป็ียงเบนของศักย์ไฟฟ้า.....	8
2.4 ประเภทของการกััดกร่อน.....	10
2.4.1 การกััดกร่อนแบบสม่ำเสมอ.....	10
2.4.2 การกััดกร่อนเนื่องจากโลหะต่างกัน 2 ชนิด.....	10
2.4.3 การกััดกร่อนชนิดหลุม.....	12
2.4.4 การกััดกร่อนชนิดมุมอับ.....	13
2.4.5 การกััดกร่อนตามขอบเกรน.....	13
2.4.6 การกััดกร่อนเนื่องจากความเค้น.....	14
2.4.7 การกััดกร่อนเนื่องจากการกััดเซาะ.....	14

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.8 การกัดกร่อนแบบ Hydrogen Embrittlement .....	15
2.5 ลักษณะการกัดกร่อนของคืบูก .....	15
2.5.1 การกัดกร่อนทางอากาศ .....	15
2.5.2 การกัดกร่อนจากสารละลาย .....	17
2.6 การป้องกันการกัดกร่อน .....	17
2.6.1 การเลือกใช้วัสดุ .....	18
2.6.2 การเคลือบผิว .....	19
2.6.3 การออกแบบ .....	21
2.6.4 การเปลี่ยนแปลงสถานะแวดล้อม .....	22
2.6.5 การป้องกันแบบแคโทด .....	23
2.6.6 การป้องกันแบบแอโนด .....	24
บทที่ 3 สารยับยั้งการกัดกร่อน .....	25
3.1 บทนำ .....	25
3.2 สารยับยั้งการกัดกร่อน .....	25
3.3 การจำแนกชนิดของสารยับยั้ง .....	26
3.3.1 ตัวปรับสภาพสิ่งแวดล้อม .....	27
3.3.2 สารยับยั้งที่ผิว .....	27
3.4 การประยุกต์ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนในสถานะแวดล้อมต่างๆ .....	30
3.4.1 อุตสาหกรรมปิโตรเลียม .....	30
3.4.2 การกัดกร่อนภายในท่อเหล็กกล้า .....	30
3.4.3 น้ำ .....	31
3.4.4 กรด .....	31
3.4.5 สถานะอื่นๆ .....	31
3.5 ปัจจัยอื่นในการประยุกต์ใช้สารยับยั้ง .....	31
3.5.1 เทคนิคการประยุกต์ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน .....	31

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.2 ผลของอุณหภูมิกับสารยับยั้งการกัดกร่อน.....	31
3.5.3 ผลข้างเคียง .....	32
3.5.4 การป้องกันขั้นที่สอง .....	32
3.5.5 สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม .....	32
บทที่ 4 การทดสอบการกัดกร่อน .....	34
4.1 บทนำ.....	34
4.2 ประเภทของการทดสอบการกัดกร่อน .....	35
4.2.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ .....	35
4.2.2 การทดสอบ ในระดับ Pilot plant หรือ Semiwork test.....	35
4.2.3 การทดสอบในโรงงานจริงหรือสภาวะจริง.....	35
4.3 วัตถุประสงค์ของการทดสอบการกัดกร่อน.....	35
4.4 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการกัดกร่อน .....	36
4.4.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	36
4.4.2 การเตรียมพื้นผิว .....	36
4.4.3 การวัดและชั่งน้ำหนัก .....	36
4.4.4 Exposure Techniques .....	36
4.4.5 เวลาที่ใช้ในการทดสอบ.....	37
4.5 ข้อควรคำนึงของการทดสอบการกัดกร่อน .....	37
4.5.1 การทดสอบในห้องทดลอง.....	38
4.5.2 การทดสอบในสถานที่จริง .....	39
4.6 การทดสอบด้วยวิธี Potentiostat .....	39
4.6.1 เครื่อง Potentiostat .....	40
4.6.2 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง .....	41
4.6.3 ขั้วไฟฟ้าร่วม.....	42
4.7 การทดสอบโดยวิธี Weight loss.....	43
4.8 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	43

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 การทดลอง.....	44
5.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	44
5.2 ขั้นตอนการทดลอง .....	45
5.2.1 การทดสอบการกักกร่อนโดยวิธี Potentiostat.....	45
5.2.2 การทดสอบการกักกร่อนโดยวิธี Weight loss.....	46
บทที่ 6 ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง.....	47
6.1 ผลการทดลองการทดสอบการกักกร่อนโดยวิธี Potentiostat .....	47
6.2 ผลการทดลองการทดสอบการกักกร่อนโดยวิธี Weight loss.....	50
6.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	53
6.4 สรุปผลการทดลอง.....	57
6.5 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	58
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	7
ตารางที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก เมื่อเหล็กกล้าและสังกะสีอยู่ร่วมกัน และแยกกัน.....	11
ตารางที่ 2.3 โลหะที่มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาวะต่างๆ ได้ดี.....	18
ตารางที่ 3.1 ความเป็นพิษของสารยับยั้งการกัดกร่อน.....	33
ตารางที่ 6.1 ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองการกัดกร่อนของดีบุกใน 0.1 N HCl กับ Pyridine ที่ความเข้มข้น 0 200 400 600 800 และ 1000 ppm โดยวิธี Potentiostat.....	47
ตารางที่ 6.2 ผลการทดลองการกัดกร่อนของดีบุกในสารละลายกรด HCl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> และ HNO <sub>3</sub> ที่ความเข้มข้น 0.1 N กับ Pyridine ที่ ความเข้มข้น 0 2000 4000 และ 6000 ppm โดยวิธี Potentiostat.....	48
ตารางที่ 6.3 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Pyridine ที่ความเข้มข้นต่างๆ ใน 0.1 N HCl.....	50
ตารางที่ 6.4 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Pyridine ที่ความเข้มข้นต่างๆ ใน 0.1 N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	51
ตารางที่ 6.5 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Pyridine ที่ความเข้มข้นต่างๆ ใน 0.1 N HNO <sub>3</sub> .....	52
ตารางที่ 6.6 แสดงประสิทธิภาพของ Pyridine ที่ความเข้มข้นต่างๆ ใน 0.1 N HCl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> และ HNO <sub>3</sub> .....	54
ตารางที่ 6.7 แสดงผลการคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนจากวิธี Weight loss ของ กรด HCl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> และ HNO <sub>3</sub> ชนิดที่มีความเข้มข้น 0.1 N.....	55

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 เซลล์ไฟฟ้าอย่างง่ายซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสังกะสีและทองแดง.....	5
รูปที่ 2.2 ผลของพื้นที่ต่อพฤติกรรมแอมโนด-แคโทด ของ เหล็ก สังกะสี และดีบุก .....	11
รูปที่ 2.3 การกัดกร่อนชนิดมูมอับ .....	13
รูปที่ 2.4 แผนภาพ Pourbaix .....	16
รูปที่ 2.5 วิธีทั่วไปที่ใช้ในการควบคุมการกัดกร่อน .....	18
รูปที่ 2.6 การป้องกันโดยใช้กระแสไฟฟ้าจากภายนอก.....	23
รูปที่ 2.7 การป้องกันแบบแคโทดของเหล็กกล้า .....	23
รูปที่ 3.1 การจำแนกชนิดของสารยับยั้งการกัดกร่อน.....	26
รูปที่ 3.2 การดูดซับประจุลบโดยประจุบวกบนผิวโลหะ .....	28
รูปที่ 3.3 ประจุบวกของสารยับยั้งการกัดกร่อน ไม่ทำปฏิกิริยากับประจุบวกบนผิวโลหะ .....	29
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสจากภายนอกที่จ่ายเข้าไป .....	34
รูปที่ 4.2 การติดตั้งชุดทดลองแบบ Potentiostat .....	40
รูปที่ 4.3 แผนผังอย่างง่ายของ Potentiostat .....	41
รูปที่ 4.4 การใช้งานของสะพานเกลือ .....	42
รูปที่ 6.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current density และ Potential ของ การถูกกัดกร่อนของดีบุกในสารละลายกรด HCl ความเข้มข้น 0.1 N ก่อน และหลังเติม Pyridine ที่ความเข้มข้น 0 200 400 600 800 และ 1000 ppm โดยการทดสอบด้วยเครื่อง Potentiostat .....	49
รูปที่ 6.2 กราฟแสดงน้ำหนักที่สูญหายไปเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Pyridine ในกรดทั้ง 3 ชนิด.....	55
รูปที่ 6.3 กราฟแสดงประสิทธิภาพของ Pyridine ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน ในกรดทั้ง 3 ชนิด.....	56
รูปที่ 6.4 กราฟแสดงอัตราการกัดกร่อนเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Pyridine ในกรดทั้ง 3 ชนิด.....	56

## สัญลักษณ์

R	=	ค่าคงที่ของอากาศ (8.314 จูลต่อโมล องศาเซลวิน)
T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)
F	=	ค่าคงที่ฟาราเดย์ (96,500 คูลอมบ์ต่อกรัมสมมูลย์)
n	=	คี่นอิเล็กตรอน
[Ox]	=	ความเข้มข้นของการออกซิเดชัน
[Red]	=	ความเข้มข้นของการรีดักชัน
$E^\circ$	=	ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน
E	=	ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า (ศักย์ไฟฟ้าโพลาริเซชัน)
a	=	ค่า activity
r	=	ค่าสัมประสิทธิ์ activity
$i_o$	=	กระแสแลกเปลี่ยน
j	=	ความหนาแน่นกระแส
$E_c$	=	ศักย์ไฟฟ้าที่สมดุล
$w_0$	=	อัตราการกัดกร่อนเมื่อไม่มีสารยับยั้ง
w	=	อัตราการกัดกร่อนเมื่อมีสารยับยั้ง
W	=	น้ำหนักที่สูญหายไป (มิลลิกรัม)
D	=	ความหนาแน่นของดีบุก (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
A	=	พื้นที่ผิวของดีบุก (ตารางนิ้ว)
T	=	เวลาที่ใช้ในการทดลอง (ชั่วโมง)
$W_L$	=	น้ำหนักที่สูญหายไป (กรัม)
$W_i$	=	น้ำหนักของดีบุกก่อนทำการทดลอง (กรัม)
$W_f$	=	น้ำหนักของดีบุกหลังทำการทดลอง (กรัม)
% Eff	=	ประสิทธิภาพของสารยับยั้ง (เปอร์เซ็นต์)
$X_1$	=	น้ำหนักที่สูญหายไปเมื่อไม่มีสารยับยั้ง (กรัม)
$X_2$	=	น้ำหนักที่สูญหายไปเมื่อมีสารยับยั้ง (กรัม)
$j_{min}, j_{max}$	=	ความหนาแน่นกระแสสูงสุดและต่ำสุดที่วัดได้
$E_1, E_2$	=	ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้ three-electrode cell

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาของโครงการ

การกักคร่อน เป็นปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมเกือบทุกประเภท ซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวอุปกรณ์ ท่อ วาล์ว และระบบควบคุมของโรงงานอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ดังนั้น การศึกษาการกักคร่อนและการป้องกันการกักคร่อน จึงเป็นเรื่องที่ผู้ประกอบการจะต้องนำมาพิจารณาควบคู่ไปกับการออกแบบและเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ในกระบวนการผลิตให้เหมาะสม และเนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุต่างๆ โดยเฉพาะโลหะ ซึ่งมีอัตราการกักคร่อนในสารละลายต่างๆ ไม่เท่ากัน การศึกษาและพัฒนาสารยับยั้งการกักคร่อนจึงต้องมีความเหมาะสมกับวัสดุ นั้นๆ ด้วย เพื่อยืดอายุการใช้งานและไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาทฤษฎีของการกักคร่อนและการป้องกันการกักคร่อน
2. ศึกษาผลของสารยับยั้งการกักคร่อนสำหรับดีบุกในสถานะที่เป็นกรด
3. ศึกษาการกักคร่อนของดีบุกโดยใช้เทคนิคการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์
4. ศึกษาอัตราการกักคร่อนของดีบุกโดยใช้เทคนิคการวัดน้ำหนักที่สูญหายไป

#### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

ศึกษาและทดลองผลของไพรีดีนซึ่งเป็นสารยับยั้งการถูกกักคร่อนของดีบุก โดยวิธีเปรียบเทียบกับ การกักคร่อนที่ไม่ได้เติมสารยับยั้ง

## 1.4 วิธีการศึกษา

1. ศึกษาคันทัวและรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการกัดกร่อน และป้องกันการกัดกร่อน
2. ระบุทฤษฎีที่จะศึกษาอัตราการกัดกร่อน
  - 2.1 ศึกษาการกัดกร่อน โดยวิธี Potentiostatic
  - 2.2 ศึกษาอัตราการกัดกร่อน โดยวิธี Weight Loss
3. จัดหาอุปกรณ์สำหรับทำการทดลอง
4. ศึกษาทฤษฎีและการใช้เครื่อง Potentiostat
5. ทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล
  - 5.1 ไม่เติมสารยับยั้งการกัดกร่อน
  - 5.2 เติมสารยับยั้งการกัดกร่อน
6. วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุป
7. เขียนรายงานการทดลอง

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะของการกัดกร่อน และการป้องกันการกัดกร่อน
2. มีความเข้าใจในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า
3. สามารถเลือกใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนของดีบุกได้อย่างเหมาะสม

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 บทนำ

การกัดกร่อน (Corrosion) หมายถึง การสูญเสียเนื้อโลหะโดยการเกิดปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม ซึ่งอาจจะเป็นปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีก็ได้ การกัดกร่อนของโลหะ เป็นการย้อนกลับสู่สภาพธรรมชาติที่แท้จริงของโลหะ กล่าวคือ ในธรรมชาติโดยส่วนใหญ่โลหะจะอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ ซัลไฟด์ คาร์บอเนต หรือซิลิเกต และในสภาวะที่โลหะอยู่ในรูปของสารประกอบเหล่านี้ สารประกอบของโลหะนี้จะมีพลังงานที่ต่ำกว่า (เสถียรกว่า) ในกรณีที่อยู่ในสภาพของโลหะบริสุทธิ์ ดังนั้นโลหะจึงมักจะมีแนวโน้มที่จะทำปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อเปลี่ยนรูปกลับไปเป็นสารประกอบที่เสถียรกว่า ตัวอย่างเช่น เหล็กออกไซด์ที่มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติมักจะถูกนำมาทำการรีดิวซ์ด้วยพลังงานความร้อนเพื่อเปลี่ยนรูปไปเป็นโลหะเหล็กซึ่งมีพลังงานที่สูงกว่า ดังนั้น โลหะเหล็กจึงมักไม่เสถียรและพยายามที่จะเปลี่ยนรูปกลับไปเป็นเหล็กออกไซด์โดยเกิดการกัดกร่อน (เกิดสนิม) เพื่อที่จะได้อยู่ในสภาวะที่มีพลังงานที่ต่ำกว่า สรุปได้ว่าการนำโลหะมาใช้งาน เป็นการฝืนปรากฏการณ์ธรรมชาติ ดังนั้นจึงต้องมีการรักษาสภาพของโลหะเหล่านั้นให้แข็งแรงและคงทนต่อสภาวะต่างๆ เพื่อนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 2.2 ดีบุก (Tin)

ดีบุกเป็นโลหะที่ใช้กันมานานหลายพันปีแล้ว ซึ่งถูกพบโดยบังเอิญจากการถลุงแร่ Cassiterite ด้วยไฟจากถ่านหิน ในปัจจุบันนี้เรื่องราวล่าสุดเกี่ยวกับดีบุกจะเป็นเรื่องเกี่ยวกับการสังเคราะห์ทองสัมฤทธิ์ โดยการผสมทองแดงเข้ากับดีบุก ส่วนโลหะอื่นๆ ที่มีดีบุกเป็นองค์ประกอบ เช่น เหล็กชุบดีบุก เหล็กอ่อน เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในโลกยุคใหม่นี้ ขณะที่ความนิยมในการใช้เหล็กลดลงและยังลดลงมากกว่าการใช้โลหะชุบดีบุกด้วยซ้ำ แต่การผสมกันของเหล็กกับดีบุกนั้น จะทำให้คุณสมบัติของโลหะดีบุกซึ่งมีมาเป็นร้อยๆ ปีมาแล้วเช่นกัน และนอกจากนี้ดีบุกผสมยังเป็นโลหะผสมที่มีราคาประหยัดและไม่ทำลายต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย และที่สำคัญประเทศไทยของเรายังเป็นประเทศที่มีการส่งออกดีบุกเป็นลำดับต้นๆ ของโลก ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพของดีบุกเพื่อให้สามารถใช้ดีบุกได้ในทุกๆ สภาวะจึงเป็นสิ่งที่จะต้องกระทำอย่างยิ่ง

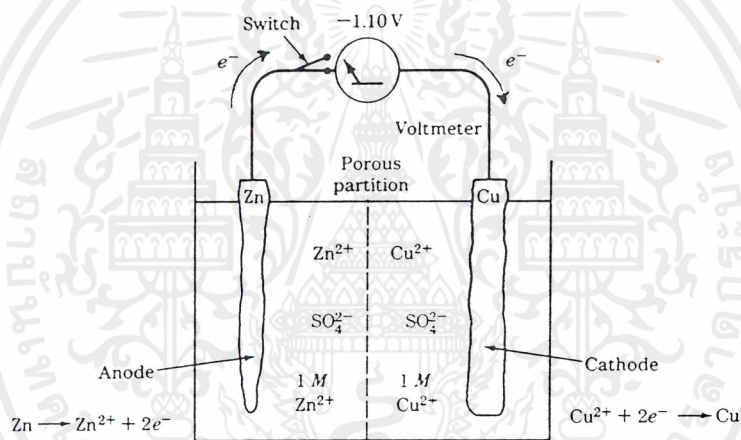
ดีบุกเป็นโลหะที่อ่อน สามารถนำมาขึ้นรูปได้ง่าย ทำเป็นแผ่นบางๆได้และมีความเป็นมันเงาสูง โดยปกติแล้วเราจะพบดีบุกอยู่ 2 รูปแบบ คือ ดีบุกแอลฟาและดีบุกเบต้า ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 5.8 และ 7.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ดีบุกที่รู้จักกันดีในชื่อของดีบุกเทา (ดีบุกแอลฟา) จะมีสีเทา แดงง่ายและมีรูปร่างของโมเลกุลแบบลูกบาศก์ สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ด้วยอุณหภูมิไม่สูงมาก ตามทฤษฎีแล้วดีบุกจะเปลี่ยนเป็นดีบุกเทาที่อุณหภูมิประมาณ 13 องศาเซลเซียส แต่ในทางปฏิบัติ ต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 0 องศาเซลเซียสและดีบุกนั้นจะต้องบริสุทธิ์มาก ซึ่งถ้ามีสิ่งเจือปนในปริมาณเพียงเล็กน้อยก็จะสามารถทำให้ดีบุกเปลี่ยนแปลงสภาพไป และเมื่อปล่อยให้อยู่ที่อุณหภูมิห้องดีบุกจะเปลี่ยนรูปร่างโมเลกุลไปเป็นผลึกที่มีลักษณะเป็นแบบเตตระกอนอล (ดีบุกเบต้า) ซึ่งรู้จักกันดีในชื่อ ดีบุกขาว สามารถยัดเป็นเส้นเปลี่ยนรูปร่างและตีเป็นแผ่นบางๆ ได้

โลหะผสมที่มีดีบุกเป็นองค์ประกอบ 60 เปอร์เซ็นต์ จะมีจุดหลอมเหลวที่ 232 องศาเซลเซียสทำให้คุณสมบัติทางกลของดีบุกมีจำกัด ดังนั้นส่วนใหญ่เราจะพบดีบุกในรูปแบบโลหะผสมหรือเป็นโลหะที่ใช้ในการเคลือบมากกว่าการใช้ในงานอื่นๆ เช่น พิวเคอร์ (Pewter) ซึ่งเป็นโลหะผสมที่มีดีบุกเป็นส่วนประกอบมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ถูกนำมาผสมกับพลวงและทองแดง (ในปัจจุบันไม่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบแล้ว) เพื่อใช้ในงานตกแต่งและการทำภาชนะเครื่องดื่ม ดีบุกที่นำมาผสมกับตะกั่ว บิสมัทและอื่นๆ ถูกใช้ในงานเชื่อมโลหะ (solder) โดยใช้เป็นโลหะเชื่อมประสาน ฯลฯ ปัจจุบันนี้ ดีบุกมักจะถูกใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กชุบดีบุกและใช้เป็นโลหะเชื่อมประสานเป็นหลัก นอกจากนี้ดีบุกยังถูกใช้งานแทนโลหะที่เป็นพิษ เช่น ใช้ดีบุกแทนตะกั่วในการทำลูกปืน ใช้ทำแคปซูลเก็บไวน์ (vine) เป็นต้น

### 2.3 หลักการพื้นฐานของการกัดกร่อน (Corrosion Principle)

การกัดกร่อนของวัสดุส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นกับโลหะที่มีการสัมผัสกับสารเคมี ซึ่งโดยทั่วไป กลไกที่เกิดขึ้นจะเป็นกลไกทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical mechanism) เนื่องจากโลหะมีอิเล็กตรอนอิสระเหลืออยู่ จึงสามารถทำให้โลหะเกิดเป็นขั้วไฟฟ้าทางเคมีขึ้นได้ โดยปกติโลหะส่วนใหญ่จะถูกกัดกร่อนในระดับหนึ่ง เนื่องจากน้ำและสถานะบรรยากาศที่อยู่รอบๆ นอกจากนี้โลหะยังสามารถเกิดการกัดกร่อนได้โดยตรงจากการสัมผัสกับสารเคมีหรือแม้แต่โลหะที่อยู่ในสภาพของเหลวก็เกิดการกัดกร่อนได้เช่นกัน

จากรูปที่ 2.1 เป็นภาพของโลหะ 2 ชนิด จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และถูกเชื่อมต่อกันด้วยลวดตัวนำ บริเวณผิวของโลหะที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนได้ง่าย เช่น สังกะสี (Zn) ซึ่งสังกะสีนั้นจะมีไอออนแตกตัวละลายออกมาในสารละลาย ส่วนบริเวณผิวของโลหะที่แตกตัวเป็นไอออนได้ยาก เช่น ทองแดง (Cu) จะมีไอออนของสังกะสีจากสารละลายมาเกาะที่ผิวของทองแดง กระแสไฟฟ้าจะไหลไปตามทิศทางของลูกศรในรูป ในกรณีที่ไอออนของโลหะแตกตัวออกจากโลหะไปสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะเรียกว่าขั้วบวกหรือแอโนด และขั้วที่มีไอออนของโลหะในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไปเกาะที่ผิวของโลหะ จะเรียกว่าขั้วลบหรือแคโทด ปฏิกิริยาของแอโนดที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของขั้วบวกนั้น เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) ส่วนปฏิกิริยาของแคโทดที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของขั้วลบนั้น จะเป็นปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction)



รูปที่ 2.1 เซลล์ไฟฟ้าอย่างง่ายซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสังกะสีและทองแดง [3]

### 2.3.1 ความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้า (Electrode Potential)

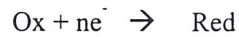
จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า เซลล์ไฟฟ้าประกอบขึ้นจากขั้วของสารต่างกัน 2 ชนิด จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งโดยทั่วไปจะเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้



ผิวสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าและสารละลายจะใช้สัญลักษณ์ / คั่นไว้ ส่วนผิวสัมผัสระหว่างสารละลายต่อสารละลายจะใช้สัญลักษณ์ // คั่นไว้ และในที่นี้  $M/M^{n+}$  จะเรียกว่า ขั้วเดี่ยว หรือครึ่งเซลล์ไฟฟ้า ที่ขั้วเดี่ยวนี้นี้ ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าและสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเรียกว่า

ความต่างศักย์ของขั้วเดียว หรือความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้านั้น จะมีค่าเท่ากับผลรวมของความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าแต่ละขั้ว ดังนั้นถ้าคำนวณความต่างศักย์ของแต่ละขั้วได้ ก็จะสามารถหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าใดๆ ที่ประกอบขึ้นจากขั้วไฟฟ้าได้

ปฏิกิริยาของขั้วไฟฟ้าที่ขั้วเดียวใดๆ จะเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้



ค่าศักย์ไฟฟ้าจะเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$E = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{Ox}]}{[\text{Red}]} \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

โดยกำหนดให้

R = ค่าคงที่ของอากาศ (8.314 จูลต่อ โมล องศาเซลเซียส)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (องศาเซลเซียส)

F = ค่าคงที่ฟาราเดย์ (96,500 คูลอมบ์ต่อกรัมสมมูล)

n = คิวซ์ไอออน

[Ox] = ความเข้มข้นของการออกซิเดชัน

[Red] = ความเข้มข้นของการรีดักชัน

$E^\circ$  = ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน

การระบุความเข้มข้นของสารเคมีสามารถระบุได้ 3 แบบ คือ เศษส่วนของโมล (mole fraction) ใช้สัญลักษณ์  $x$  ความเข้มข้นโดยน้ำหนักโมล (โมลของสารต่อปริมาณสาร 1000 กรัม)  $m$  ความเข้มข้นโดยปริมาตร โมล (โมลของสารต่อปริมาตรของสาร 1 ลิตร)  $M$

$M$  จะมีค่าแปรผันตามอุณหภูมิ ส่วน  $m$  มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น ค่าที่ใช้คำนวณในทางทฤษฎีมักนิยมใช้ค่า  $m$  มากที่สุด

ในการคำนวณค่าแรงดัน ถ้าความเข้มข้นของสารออกซิไดซ์ หรือสารรีดิวซ์ ซึ่งมีความเข้มข้นต่ำ ค่าในสัญลักษณ์ [Ox] และ [Red] สามารถใช้ค่าความเข้มข้นทางเคมีทั่วไปแทนได้ แต่ในกรณีที่ความเข้มข้นมีค่าสูงนั้น จะเกิดปฏิกิริยาผันกลับระหว่างไอออน ทำให้ความเข้มข้นที่แท้จริงมีค่าต่างจากความเข้มข้นทางเคมีมาก ดังนั้นจึงใช้ค่าที่เรียกว่า activity ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ถูกแก้ไขแล้ว แทนค่าใน [Ox] และ [Red] ค่า activity (a) เป็นผลคูณระหว่างค่าความเข้มข้นโดยน้ำหนักโมลกับค่าสัมประสิทธิ์ activity (r) จะได้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ถูกแก้ไขแล้ว หรือ  $a = mr$  โดยที่ ค่า a จะมีค่าแตกต่างไปตามความเข้มข้นและอุณหภูมิ

เมื่อจุ่มโลหะลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีไอออนของโลหะละลายอยู่ ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วเดียวจากสมการข้างต้น เมื่อคิดว่า activity ของอิเล็กตรอนของของแข็งเป็น 1 จะคิดได้ดังต่อไปนี้

$$M^{n+} + ne^- \rightarrow M$$

$$E = E^\circ + RT/nF \ln([M^{n+}]/[M]) \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

$$E = E^\circ + RT/nF \ln a \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

แทนค่า R และ F จะได้

$$E = E^\circ + 0.0592/n \log a \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

(ในกรณีที่อุณหภูมิเป็น 25 องศาเซลเซียส)

สมการที่ (2.4) เรียกว่า สมการของเนิร์นส (Nernst equation) เป็นสมการที่แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าของโลหะ เมื่อ activity มีค่าเปลี่ยนไป ค่า  $E^\circ$  จะเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าเมื่อ activity มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งจะเรียกว่า ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วเดียว หรือศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (standard electrode potential)

ตารางที่ 2.1 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [3]  
(ตามค่ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน)

	Oxidation (corrosion) reaction	Electrode potential, $E^\circ$ (volts vs. standard hydrogen electrode)
↑ More cathodic (less tendency to corrode)	Au → Au <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup>	+1.498
	2H <sub>2</sub> O → O <sub>2</sub> + 4H <sup>+</sup> + 4e <sup>-</sup>	+1.229
	Pt → Pt <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	+1.200
	Ag → Ag <sup>+</sup> + e <sup>-</sup>	+0.799
	2Hg → Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	+0.788
	Fe <sup>2+</sup> → Fe <sup>3+</sup> + e <sup>-</sup>	+0.771
	4(OH) <sup>-</sup> → O <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O + 4e <sup>-</sup>	+0.401
	Cu → Cu <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	+0.337
	Sn <sup>2+</sup> → Sn <sup>4+</sup> + 2e <sup>-</sup>	+0.150
	H <sub>2</sub> → 2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup>	0.000
↓ More anodic (greater tendency to corrode)	Pb → Pb <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-0.126
	Sn → Sn <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-0.136
	Ni → Ni <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-0.250
	Co → Co <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-0.277
	Cd → Cd <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-0.403
	Fe → Fe <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-0.440
	Cr → Cr <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup>	-0.744
	Zn → Zn <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-0.763
	Al → Al <sup>3+</sup> + 3e <sup>-</sup>	-1.662
	Mg → Mg <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup>	-2.363
Na → Na <sup>+</sup> + e <sup>-</sup>	-2.714	

ดังนั้นการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าจึงทำได้โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าซึ่งมีขั้วไฟฟ้ามาตรฐานประกอบอยู่ด้วยขั้วหนึ่ง และใช้ค่ามาตรฐานนั้นเป็นค่าเปรียบเทียบเพื่อแสดงค่าสัมพัทธ์ของขั้วไฟฟ้าชนิดใดชนิดหนึ่ง ค่ามาตรฐานจะวัดโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแพลทินัม (Pt) ที่ถูกทำให้อิ่มตัวด้วยก๊าซไฮโดรเจนที่มีความดัน 1 บรรยากาศ จุ่มลงในขั้วไฟฟ้าที่มีค่า activity ของไอออนของก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 1 ซึ่งขั้วไฟฟ้านี้ จะถูกเรียกว่าขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนมาตรฐาน (normal hydrogen electrode or standard hydrogen electrode เรียกย่อๆว่า NHE หรือ SHE) ค่าศักย์ไฟฟ้านี้ ถือว่ามีค่าเท่ากับศูนย์ที่ทุกระดับอุณหภูมิ ซึ่งถูกเรียกว่า ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 สำหรับตารางนี้ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่อยู่เหนือ NHE จะมีค่าเป็นบวก ส่วนค่าที่อยู่ใต้ NHE จะมีค่าเป็นลบ

### 2.3.2 การเบี่ยงเบนของศักย์ไฟฟ้า (Polarization)

ในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของขั้วไฟฟ้านั้น การที่จะทราบความเร็วในการทำปฏิกิริยาจำเป็นต้องทำความเข้าใจถึงสภาพความต้านทานต่อปฏิกิริยาการกักร่อนก่อน

สมมติให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังสมการข้างล่างนี้

$$P = i = i_0$$

ให้สัญลักษณ์ของความเร็วในการที่ปฏิกิริยาดำเนินจากซ้ายไปขวาเป็น  $P$  และสัญลักษณ์ของความเร็วในการที่ปฏิกิริยาดำเนินย้อนกลับจากขวาไปซ้ายเป็น  $i$  เมื่อปฏิกิริยาทั้งสองอยู่ในสภาวะสมดุลจะเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้เป็น  $i_0$

ความสัมพันธ์นี้มีได้หมายความว่าปฏิกิริยาทั้งสองแบบมีความเร็วเท่ากัน แต่หมายความว่าปฏิกิริยาทั้งสองแบบนี้เกิดกลับไปกลับมาจนกระทั่งรักษาสภาวะสมดุลแบบเคลื่อนไหว (dynamic equilibrium) อยู่ได้ ค่า  $i_0$  นี้จะเรียกว่าเป็นกระแสแลกเปลี่ยน (exchange current)

อย่างไรก็ตาม เมื่อเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลที่ผิวของขั้วไฟฟ้า และเกิดความเบี่ยงเบนจากสภาวะสมดุลในปฏิกิริยาขึ้น ในขณะที่ทิศทางของการเกิดปฏิกิริยาจะเปลี่ยนแปลงจากทิศทางหนึ่งไปยังอีกทิศทางหนึ่ง ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้านี้จะไปต้านทานทิศทางกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะกลายเป็นการต้านทานปฏิกิริยาขั้วไฟฟ้า ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้า เมื่อเทียบกับแรงดันสมดุล ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านผิวของโลหะที่เป็นขั้วไฟฟ้าจะถูกเรียกว่า กระบวนการโพลาไรเซชัน (polarization)

ค่าโพลาไรเซชัน แทนด้วยสัญลักษณ์  $\eta$  โดยจะมีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่างศักย์ไฟฟ้าขณะที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน (ศักย์ไฟฟ้าโพลาไรเซชัน  $E$ ) กับศักย์ไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีการไหลผ่าน หรือในสภาวะสมดุล (ศักย์ไฟฟ้าสมดุล  $E_0$ ) กระบวนการโพลาไรเซชันของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ โพลาไรเซชันแบบกระตุ้น (activation polarization) และโพลาไรเซชันแบบความเข้มข้น (concentration polarization)

#### - โพลาไรเซชันแบบกระตุ้น (Activation Polarization)

หมายถึง ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่ช้าที่สุดในลำดับขั้นตอนของปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (metal-electrolyte interface) นั้นหมายความว่า ปฏิกิริยานี้ต้องการค่าพลังงานกระตุ้นวิกฤตค่าหนึ่ง เพื่อสามารถทำให้ขั้นตอนของปฏิกิริยาที่ช้าที่สุดนี้เกิดขึ้นหรือดำเนินไปได้

#### - โพลาไรเซชันแบบความเข้มข้น (Concentration Polarization)

หมายถึง ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ของไอออนที่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ กระบวนการโพลาไรเซชันชนิดนี้ จะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายมีค่าต่ำ ดังนั้นอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนไอออนที่บริเวณผิวของโลหะ จะถูกควบคุมโดยการแพร่ของไฮโดรเจนไอออนเหล่านี้ไปยังผิวของโลหะ

สำหรับโพลาไรเซชันแบบความเข้มข้นนั้น อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเร็วในการแพร่ของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น การกวนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมีผลทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนที่บริเวณผิวของโลหะและในตัวสารละลายลดน้อยลง หรือการเพิ่มอุณหภูมิก็จะทำให้อัตราเร็วในการแพร่ของไอออนเพิ่มขึ้นเช่นกัน

ผลของกระบวนการโพลาไรเซชันที่ชั่วไฟฟ้าในปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า จะเท่ากับผลรวมของผลจากโพลาไรเซชันแบบกระตุ้น กับผลจากโพลาไรเซชันแบบความเข้มข้น โดยปกติ กระบวนการโพลาไรเซชันแบบกระตุ้น มักจะเป็นปัจจัยควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยาเมื่อปฏิกิริยานั้นมีอัตราเร็วสูง หากกระบวนการโพลาไรเซชันเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นอัตราเร็วในการกัดกร่อนถูกควบคุมโดยแอโนด (anodically controlled)

## 2.4 ประเภทของการกัดกร่อน (Type of Corrosion)

### 2.4.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform or General attack Corrosion)

เป็นรูปแบบที่ธรรมดาที่สุดของการกัดกร่อน และเป็นการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ โดยจะเกิดขึ้นตลอดทั่วทั้งพื้นผิวของโลหะที่สัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ เป็นผลให้โลหะบางลงทั่วทั้งพื้นผิวที่เกี่ยวข้อง การกัดกร่อนในรูปแบบนี้สามารถจะคาดคะเนอายุการใช้งานได้ค่อนข้างแน่นอน จึงแตกต่างกับการกัดกร่อนในรูปแบบอื่นๆ ที่การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นในตำแหน่งที่เฉพาะเจาะจงเท่านั้น

ปริมาณของการกัดกร่อนชนิดนี้ อาจแสดงให้เห็นในรูปของอัตราการกัดกร่อน คือ น้ำหนักที่สูญหายไปต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา หรืออาจแสดงในรูปของอัตราการซึมลึก (rate of penetration) ซึ่งแสดงถึงความลึกของการกัดกร่อนต่อหน่วยเวลา มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อตารางเดซิเมตรต่อวัน ( $\text{mg}/\text{dm}^2 \cdot \text{day}$ , mdd) ส่วนอัตราการซึมลึก มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อปี (mm/y) ซึ่งสามารถแปลงหน่วย โดยใช้สมการดังต่อไปนี้ โดยให้  $d$  = ความหนาแน่นของโลหะ

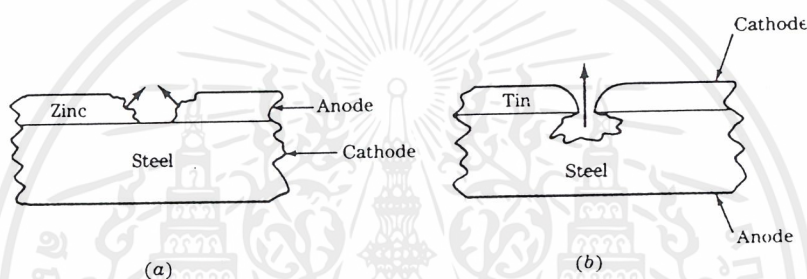
$$\text{mdd} \times 0.0365/d = \text{mm/y} \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

อัตราการกัดกร่อน สามารถใช้เปรียบเทียบระหว่างโลหะชนิดเดียวกันได้สะดวก ถึงแม้ว่าค่า mdd ของโลหะต่างชนิดจะเท่ากันก็ตาม แต่อัตราการซึมลึกของโลหะเบา จะมีค่ามากกว่าของโลหะหนัก ดังนั้นในกรณีที่โลหะต่างชนิดกัน ถ้าเปรียบเทียบโดยอาศัยอัตราการซึมลึกจะสะดวกกว่า

### 2.4.2 การกัดกร่อนเนื่องจากโลหะต่างกัน 2 ชนิด (Galvanic or Two-metal Corrosion)

เป็นรูปแบบที่เกิดขึ้นได้เมื่อมีองค์ประกอบอยู่ร่วมกันทั้ง 3 อย่าง คือ โลหะต่างกัน 2 ชนิด สารอิเล็กโทรไลต์ และตัวนำกระแสไฟฟ้า ดังนั้น เมื่อนำโลหะต่างชนิดกันมาจุ่มลงในสารละลาย และนำโลหะต่างชนิดกันมาเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า จะทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนระหว่างโลหะทั้งสองชนิดขึ้น ก็จะเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนของโลหะ โดยที่ตัวหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นแอโนด อีกตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด สำหรับค่าความต่างศักย์ของโลหะว่าตัวใดจะมีศักย์สูงกว่าหรือต่ำกว่ากัน พิจารณาได้จากตารางความต่างศักย์มาตรฐานโดยใช้ไฮโดรเจนเป็นธาตุอ้างอิง โดยมีค่าความต่างศักย์เท่ากับศูนย์

ตัวอย่างเช่น แผ่นดีบุกที่ใช้ทำกระป๋อง แผ่นดีบุกส่วนใหญ่จะผลิตขึ้นโดยการชุบแผ่นเหล็กกล้าด้วยดีบุกเป็นชั้นฟิล์มบางๆ ด้วยไฟฟ้า และเนื่องจากเกลือของดีบุกไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย ดังนั้น แผ่นดีบุกจึงมักถูกใช้บรรจุอาหาร ดีบุกจะมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเท่ากับ  $-0.136$  โวลต์ ส่วนเหล็กจะมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานเท่ากับ  $-0.441$  โวลต์ ดังนั้นภายใต้สภาวะบรรยากาศ ดีบุกจะเป็นขั้วแคโทด ส่วนเหล็กกล้าจะเป็นขั้วแอโนด ดังนั้นถ้าส่วนนอกของชั้นแผ่นเหล็กกล้าชุบดีบุกนี้สัมผัสกับบรรยากาศ เหล็กกล้าจะเกิดการกัดกร่อนในขณะที่ดีบุกจะไม่ถูกกัดกร่อน (รูปที่ 2.2(b)) แต่ถ้าแผ่นเหล็กกล้าชุบดีบุกนี้อยู่ในสภาวะที่ไม่มีอากาศหรือขาดออกซิเจน ดีบุกจะเปลี่ยนเป็นขั้วแอโนดแทนเหล็กกล้า ซึ่งจะทำให้ดีบุกสามารถใช้ประโยชน์ในการใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหารหรือเครื่องเค็มได้



รูปที่ 2.2 ผลของพื้นที่ต่อพฤติกรรมแอโนด-แคโทดของเหล็ก สังกะสี และดีบุก [3]

ข้อจำกัดที่ควรพิจารณาอีกประการหนึ่ง คืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากพื้นที่นี้ถูกเรียกว่า “area effect” ถ้าอัตราส่วนของพื้นที่ระหว่างแคโทดและแอโนดสูงขึ้น จะก่อให้เกิดการกัดกร่อนที่แอโนดเร็วขึ้น ดังนั้นในการใช้งานจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้อัตราส่วนของพื้นที่ระหว่างแคโทดและแอโนดที่มีค่าสูงมากๆ

ตารางที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก เมื่อเหล็กกล้าและสังกะสีอยู่ร่วมกัน และแยกกัน [3]

Environment	Uncoupled		Coupled	
	Zinc	Steel	Zinc	Steel
0.05 M MgSO <sub>4</sub>	0.00	-0.04	-0.05	+0.02
0.05 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-0.17	-0.15	-0.48	+0.01
0.05 M NaCl	-0.15	-0.15	-0.44	+0.01
0.005 M NaCl	-0.06	-0.10	-0.13	+0.02

สรุปแล้ว ตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการควบคุมการกัดกร่อนแบบโลหะต่างชนิด ได้แก่

1. ความต่างศักย์ที่ได้จากตารางค่าความต่างศักย์มาตรฐานคิดเป็นค่าสัมบูรณ์
2. อิทธิพลของสิ่งแวดล้อม พิจารณาจากธรรมชาติและความรุนแรงของสิ่งแวดล้อม
3. อัตราส่วนพื้นที่ของแคโทดและแอโนด หากพื้นที่แคโทดมากในขณะที่พื้นที่ของแอโนดน้อย อัตราการกัดกร่อนจะสูงเนื่องจากมีตัวรับอิเล็กตรอนมาก ทำให้เกิดการกระตุ้นปฏิกิริยาการละลายของเนื้อโลหะเร็วขึ้น

#### 2.4.3 การกัดกร่อนชนิดหลุม (Pitting Corrosion)

เป็นรูปแบบของการเกิดการกัดกร่อนเป็นหลุมเล็กๆในแนวตั้ง โดยในตอนแรกจะเกิดที่บริเวณผิวโลหะเฉพาะตำแหน่ง แล้วลามลึกเข้าไปในเนื้อโลหะจนอาจทะลุได้ ทั้งๆที่เนื้อโลหะหรือส่วนอื่นๆ ยังคงอยู่ในสภาพดี การกัดกร่อนแบบนี้ เป็นรูปแบบของการกัดกร่อนที่อันตรายที่สุด เพราะไม่สามารถคาดคะเนอายุการใช้งานได้อย่างแน่นอน มักจะเกิดจากสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออน (Cl<sup>-</sup>) อยู่ด้วย จุดเริ่มต้นอาจเกิดจากรอยขีดข่วนบนผิวโลหะ หรือเกิดจากสารเคมีที่มีความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงไม่สม่ำเสมอ โดยจะทำให้ผิวโลหะเกิดความต่างศักย์แสดงตัวเป็นบริเวณแอโนดและแคโทดเล็กๆขึ้น เมื่อบริเวณแอโนดถูกกัดกร่อนไปจนเกิดเป็นหลุมซึ่งคลอไรด์ไอออนก็จะแพร่เข้าไปในหลุมนั้น แล้วจะไปเร่งการเกิดการกัดกร่อนของโลหะในลักษณะของกระบวนการ autocatalytic reaction

โลหะในหลุมจะเกิดออกซิเดชันให้โลหะไอออนออกมาอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนจะเกิดขึ้นบนผิวโลหะที่บริเวณห่างจากหลุมไป ปริมาณของโลหะไอออนที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันมีมากขึ้นในหลุม ในขณะที่คลอไรด์ไอออนก็ยิ่งแพร่เข้ามามากขึ้นแล้วจะทำปฏิกิริยารวมกันเป็นโลหะคลอไรด์ และทำปฏิกิริยาต่อไปกับความชื้นหรือน้ำ ให้กรดไฮโดรคลอริก ซึ่งจะกัดกร่อนโลหะได้อย่างรุนแรง ภายในหลุมจะไม่มีออกซิเจน เนื่องจากออกซิเจนจะละลายในสารละลายที่มีโลหะไอออนเข้มข้นได้น้อยมาก ปฏิกิริยารีดักชันจึงเกิดบนผิวของโลหะที่อยู่ถัดจากหลุมออกไป

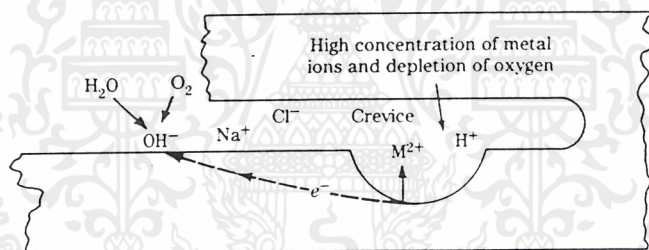
สาเหตุของการเกิดการกัดกร่อนแบบจุด อาจได้มาจากหลายสาเหตุรวมๆ กันก็ได้ เช่น

1. ความไม่สม่ำเสมอในเนื้อหรือส่วนผสมของเนื้อโลหะ (ingot segregation)
2. การเลือกวัสดุเชื่อมที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าตัวชิ้นงานโลหะ ทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นบนผิวของโลหะ
3. รอยเปื้อนหรือแบคทีเรียบนผิวโลหะ จะเป็นสาเหตุของการเกิด concentration cell

4. การได้รับแรงเค้นจากการกระแทกหรือจากกระบวนการขึ้นรูป
5. การเกิดรอยขีดหรือรอยถลอกบนผิวปกป้อง (protective film)
6. การที่ของไหลมีความเร็วต่ำ ทำให้เกิดการคั่งค้างของสิ่งแขวนลอยบนผิวของชิ้นงาน

#### 2.4.4 การกัดกร่อนชนิดมุมอับ (Crevice Corrosion)

เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในบริเวณของโลหะที่เป็นช่องแคบๆ หรือบริเวณที่ถูกปกปิด เช่น บริเวณที่อยู่ใต้หัวนอต หรือที่ได้หวมกของตะปูหัวเห็ดหรือตรงตะเจ็บริยตรงต่อของโลหะ บริเวณที่เป็นช่องแคบๆนี้จะได้รับออกซิเจนหรือไอออนจากสารละลายได้ไม่เพียงพอ จึงทำให้บริเวณที่ขาดออกซิเจนทำหน้าที่เป็นแอโนด ในขณะที่พื้นที่ด้านนอกมีโอกาสสัมผัสกับออกซิเจนตลอดเวลาทำหน้าที่เป็นแคโทด ทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น พร้อมกันนี้บริเวณภายในช่องแคบๆ นั้น ก็จะเกิดการสะสมของเกลือของโลหะขึ้น ทำให้ค่าพีเอช (pH) ลดลง สารละลายมีฤทธิ์เป็นกรดมากขึ้น ทำให้ผิวโลหะบริเวณภายในช่องแคบนั้นถูกกัดกร่อนมากขึ้นด้วย ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุม ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การกัดกร่อนชนิดมุมอับ (Crevice corrosion) [3]

#### 2.4.5 การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion)

เป็นการกัดกร่อนบริเวณขอบของผลึกของโลหะ เนื่องจากการสูญเสียธาตุบางชนิดที่มีความต้านทานการกัดกร่อน การกัดกร่อนประเภทนี้ได้แก่ incrustation corrosion, weld decay, knife line attack และ intergranular attack สาเหตุสำคัญ เกิดจากสิ่งเจือปนที่ขอบของเกรนของโลหะจากการที่มีปริมาณส่วนผสมของโลหะบางอย่างมากเกินไปหรือน้อยไป ทำให้มีการตกผลึกของโลหะ หรือเกิดการลดลงของโลหะที่ขอบเกรน

การกัดกร่อนจากการเชื่อม เป็นรูปแบบหนึ่งของการกัดกร่อนที่ขอบเกรน การเชื่อมมักเป็นส่วนหนึ่งของการขึ้นรูปโลหะ แต่ไม่ว่าจะเป็นการเชื่อมแบบการใช้ก๊าซหรือใช้ไฟฟ้าก็ตาม ที่บริเวณรอยเชื่อมอาจจะมีอุณหภูมิสูงถึง 1200 องศาเซลเซียส แต่เมื่อห่างออกจากรอยเชื่อม

อุณหภูมิก็จะลดต่ำลงมาอยู่ในช่วง 600 ถึง 900 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาการกัดกร่อนมาก เรียกว่า sensitized temperature โดยเฉพาะกับโลหะในกลุ่มเหล็กและเหล็กกล้าที่อุณหภูมินี้ โครเมียมในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม (โดยเฉพาะชนิด 304) จะรวมตัวกับคาร์บอนเป็นโครเมียมคาร์ไบด์ ( $Cr_{23}C_6$ ) แล้วตกตะกอนตามขอบเกรน เนื่องจากโมเลกุลของโครเมียมมีขนาดใหญ่ เคลื่อนตัวช้ามากเมื่อเทียบกับโมเลกุลของคาร์บอน ทำให้ปริมาณโครเมียมที่บริเวณขอบเกรนน้อยกว่าปริมาณโครเมียมในเนื้อเกรนทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบขอบเกรนได้ง่าย

#### 2.4.6 การกัดกร่อนเนื่องจากความเค้น (Stress Corrosion)

ความเค้นในโลหะ เป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดการกัดกร่อน แม้จะไม่ถึงจุดที่สามารถทำให้โลหะแตกหักเสียหายได้ แต่ถ้ารอยร้าวมันเกิดขึ้นเนื่องจากผลของการกระทำทั้งความเค้น และการกัดกร่อนในเนื้อโลหะแล้ว เรียกว่า (stress-corrosion cracking, SCC) ความเค้นที่กล่าวนี้อาจมาจาก 2 ลักษณะ คือ ความเค้นภายนอกที่ทำกับโลหะเมื่อนำไปใช้งานหรือเกิดขึ้นตามลักษณะของชิ้นงานและความเค้นที่เกิดขึ้นหรือหลงเหลืออยู่ภายในเนื้อโลหะ เนื่องจากการขึ้นรูปโลหะหรือการเชื่อมก็ได้

การกัดกร่อนแบบนี้จะมีลักษณะพิเศษ กล่าวคือ

1. จะเกิดขึ้นได้เฉพาะกับ โลหะผสมเท่านั้น
2. ประเภทของสิ่งแวดล้อมที่จะให้เกิดรอยแตกร้าว นั้น มีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับโลหะแต่ละชนิด
3. อุณหภูมิขณะใช้งาน
4. การอบชุบด้วยความร้อน มีผลต่อ โครงสร้างของโลหะกระตุ้นให้เกิดการแตกร้าวได้
5. การป้องกันการกัดกร่อนทำได้โดยวิธีแคโทดิก

#### 2.4.7 การกัดกร่อนเนื่องจากการกัดเซาะ (Erosion Corrosion)

เป็นปรากฏการณ์ที่สร้างความเสียหายจากการหลุดล่อนไปของผิวหน้าของวัสดุอันเนื่องมาจากแรงทางฟิสิกส์ การกัดกร่อนเป็นการหลุดไปของโลหะจากผิวหน้าของวัสดุหรือโลหะ โดยการเปลี่ยนตัวเป็นไอออนก่อน แต่การกัดเซาะนั้นเป็นการหลุดล่อนไปของผิวโลหะในสภาพปกติมันเลย ดังนั้นการกัดเซาะจะเกิดขึ้นได้ทั้งกับวัสดุที่เป็นโลหะและวัสดุที่เป็นอโลหะ ซึ่งมีทั้งจำพวกอินทรีย์ และอนินทรีย์ การกระทำของแรงทางกายภาพนั้น จะกระทำที่พื้นผิวเพียงบริเวณเล็กๆ เท่านั้น โดยไม่ทำลายชิ้นส่วนอุปกรณ์ทั้งชิ้นแต่อย่างใด จะทำลายเฉพาะบริเวณที่ได้รับแรง

นั้นเท่านั้น แต่ถ้าได้รับแรงนั้นช้าบ่อยๆ เป็นเวลานาน ความเสียหายก็จะมากขึ้น ประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ก็จะลดลง จนทำให้เกิดความเสียหายที่ใหญ่หลวงหรือกลายเป็นสาเหตุของอุบัติเหตุได้ง่าย

#### 2.4.8 การกัดกร่อนแบบ Hydrogen Embrittlement

เป็นปรากฏการณ์ที่โลหะดูดซับไฮโดรเจนในรูปของอะตอมซึ่งมาจากสารละลายนี้แตกตัวได้ แล้วทำให้โลหะนั้นสูญเสียความยืดหยุ่นไป เกิดความเปราะและบวม หรือมีรอยแตกร้าวขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนอะตอมและโมเลกุลของไฮโดรเจนมีการแพร่เข้าไปในเนื้อโลหะด้วยความเร็วช้าต่างกัน โดยไฮโดรเจนอะตอมสามารถแพร่ได้เร็วกว่าไฮโดรเจนในรูปของอะตอม ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการกัดกร่อน การชุบ การล้างด้วยกรด หรือการได้รับกระแสไฟฟ้าจากภายนอก โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าในสารละลายนั้นมีสารประกอบของกำมะถัน หรือสารประกอบของสารหนูและฟอสฟอรัสละลายผสมอยู่

ไฮโดรเจนในรูปของอะตอมจะแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างหรือส่วนที่เป็นจุดอ่อนของโลหะ เมื่อไฮโดรเจนเข้าไปแล้วจะรวมตัวกันเป็นโมเลกุลเกิดแรงดันขึ้นจนทำให้โลหะนั้นบวมหรือสูญเสียความยืดหยุ่นจนเกิดความเปราะและรอยแตกร้าวได้ง่ายที่สุด

ที่อุณหภูมิสูงๆ ไฮโดรเจนอะตอมอาจเกิดจากการแตกตัวของไฮโดรเจนโมเลกุล แล้วแพร่เข้าไปในเนื้อโลหะและรวมตัวกับคาร์บอนในเหล็กเกิดเป็นก๊าซมีเทน ทำให้มีความดันเพิ่มขึ้น

### 2.5 ลักษณะการกัดกร่อนของดีบุก

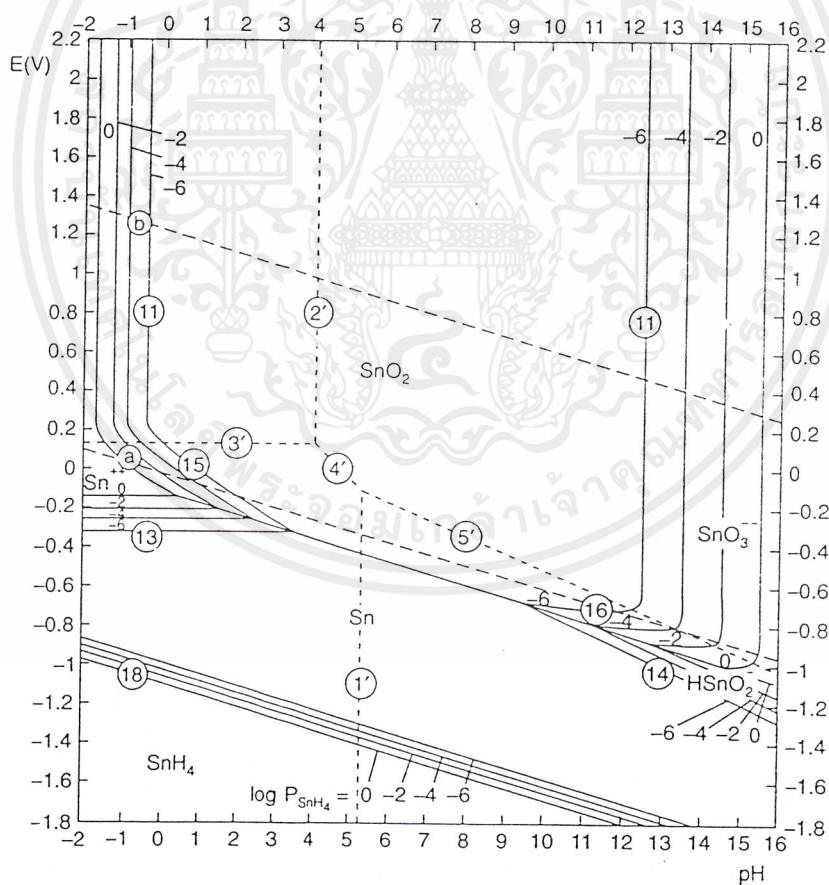
สภาวะแวดล้อมที่ดีบุกสามารถถูกกัดกร่อนได้ อาจแบ่งได้เป็น 2 สภาวะ คือ

#### 2.5.1 การกัดกร่อนทางอากาศ (Atmospheric Attack)

ดีบุกไม่ใช่โลหะที่เฉื่อยแต่ก็ไม่ได้ไวต่อปฏิกิริยามาก สามารถเกิดการกัดกร่อนได้ทั้งในเฟสของเหลวและเฟสไอ โดยลักษณะการกัดกร่อนนั้นจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของโลหะและสภาวะแวดล้อมที่โลหะนั้นอยู่ ดีบุกจะมีความมันเงาได้ในช่วงเวลานานที่อุณหภูมิห้องในสภาวะแวดล้อมของอากาศที่ไม่มีความชื้น การเกิดออกไซด์จะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยปกติแล้วในบรรยากาศทั่วไปจะมีความสามารถในการกัดกร่อนดีบุกได้จำกัด

เนื่องจากออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนทางอากาศ มีแนวโน้มที่จะเกิดออกไซด์และซัลไฟด์ที่บริเวณผิว ทำให้ผิวดีบุกมีสีคล้ำลง ดังนั้นการกัดกร่อนจึงเห็นได้ชัด การสูญเสียความเสถียรของโครงสร้างดีบุก ไม่ได้เกิดจากผลของการกัดกร่อนทางอากาศแบบธรรมดา แม้ว่าโลหะชนิดนี้จะถูกกัดกร่อนได้ง่ายจากก๊าซฮาโลเจนและไอของธาตุที่เป็นกรดแก่ ความต้านทานทางไฟฟ้าของดีบุกจะเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดฟิล์มออกไซด์ที่ผิวของดีบุก ถึงแม้ว่าธรรมดาแล้วสิ่งนี้จะไม่ใช่ปัญหาใหญ่ก็ตาม อัตราการกัดกร่อนของดีบุกสามารถทำการวัดได้ตั้งแต่ช่วงที่ว่างไว้ในบรรยากาศใหม่ๆ ไปเป็นเวลาถึง 20 ปี จะได้อัตราการกัดกร่อนโดยเฉลี่ยในหน่วยไมโครเมตรต่อปี ( $\mu\text{m}/\text{year}$ ) ดังต่อไปนี้

บริเวณชานเมือง	0.05
บริเวณเขตอุตสาหกรรม	0.125 - 0.175
บริเวณชายทะเล	0.175 - 0.275



รูปที่ 2.4 แผนภาพ Pourbaix [4]

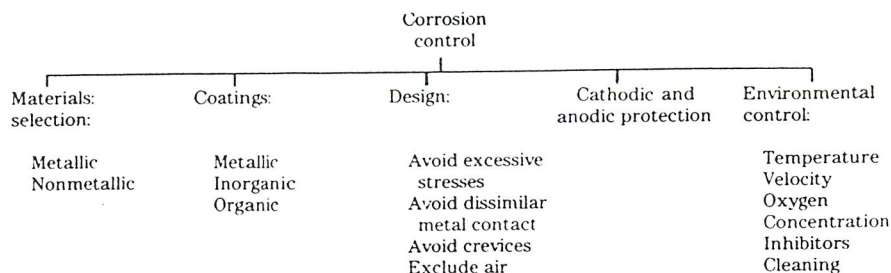
### 2.5.2 การกัดกร่อนจากสารละลาย (Aqueous Attack)

จากรูปที่ 2.4 เป็นแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความเป็นกรด-เบสของสารละลาย (pH) สำหรับดีบุก โดยมีการแบ่งช่วงการมีเสถียรภาพของดีบุก ออกไซด์ และไฮดรอกไซด์ต่างๆ ในน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยกราฟไม่ได้รวมข้อมูลของดีบุกในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนไว้ สำหรับดีบุกจะไม่มีบริเวณ (zone) ที่มีเสถียรภาพในสภาวะแวดล้อมของน้ำ ดังนั้นการเกิดออกไซด์และไฮดรอกไซด์จึงเป็นสิ่งที่ควรระวังจะเกิดขึ้นในบรรยากาศปกติ จากกราฟจะเห็นว่าดีบุกมีเสถียรภาพอยู่ในช่วงระหว่างพีเอช 3 ถึง 10 โดยดีบุกจะถูกกัดกร่อนและละลายออกมาเป็น  $\text{Sn}^{2+}$  และ  $\text{Sn}^{4+}$  ที่พีเอชต่ำกว่า 3 และถ้าพีเอชมากกว่า 10 ขึ้นไปจะเกิดเป็น Stannites และ Stannates ภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่าสภาวะอัลคาไลน์ (พีเอชมากกว่า 9.5) ดังนั้น ดีบุกจึงเป็นโลหะที่มีเสถียรภาพเนื่องจากฟิล์มของออกไซด์

เมื่อโลหะเชื่อมประสาน (Solder) สัมผัสกับน้ำอ่อนก็อาจจะถูกกัดกร่อนได้เช่นกัน เมื่อไม่นานมานี้โลหะเชื่อมประสานที่มีดีบุกเป็นองค์ประกอบมากๆ ถูกนำมาใช้ในระบบทำความร้อนตามบ้านเรือนและระบบบำบัดน้ำที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ถึงแม้ว่าจะมีหลักฐานทางเคมีไฟฟ้าว่าเกิดการกัดกร่อนขึ้นในระบบทำความร้อนก็ตาม ในปัจจุบันนี้โลหะเชื่อมประสานไม่ได้ถูกใช้ในการทำภาชนะใส่ของแล้ว แต่ภาชนะที่นำมาห่อหุ้มอาหารยังคงใช้อยู่ ซึ่งทำจากโลหะผสมที่มีดีบุกเป็นองค์ประกอบสูงเช่นกัน

### 2.6 การป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion Prevention)

การกัดกร่อนนั้นสามารถควบคุมหรือป้องกันได้โดยวิธีการต่างๆ มากมาย และสถานะเศรษฐกิจมักจะเป็นปัจจัยที่จะกำหนดวิธีการที่จะนำมาใช้ในการควบคุมหรือป้องกัน วิศวกรจะต้องเป็นผู้พิจารณาว่า จะคุ้มค่าหรือไม่ที่จะซื้อเครื่องจักรใหม่มาแทนเครื่องจักรเก่าตามระยะเวลาที่กำหนด หรือควรจะใช้วัสดุที่มีคุณภาพดีที่สามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดีแต่มีราคาแพงกว่า วิธีการควบคุมหรือป้องกันการกัดกร่อนที่ใช้โดยทั่วไปในปัจจุบัน แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วิธีทั่วไปที่ใช้ในการควบคุมการกัดกร่อน [3]

### 2.6.1 การเลือกใช้วัสดุ (Material Selection)

วิธีหนึ่งที่ย่างในการควบคุมการกัดกร่อนสำหรับวัสดุที่เป็นโลหะ คือการเลือกใช้วัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี การเลือกใช้วัสดุในงานออกแบบทางด้านวิศวกรรมนั้นจำเป็นต้องมีข้อมูลและคู่มือที่เกี่ยวกับการกัดกร่อน เพื่อให้มั่นใจว่าได้เลือกวัสดุที่เหมาะสม หรือจำเป็นต้องปรึกษาผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ในเรื่องการกัดกร่อนด้วย เพื่อช่วยให้มั่นใจยิ่งขึ้นว่าวัสดุที่เลือกใช้นั้นเหมาะสมที่สุด

มีกฎเกณฑ์ทั่วไปที่ควรคำนึงถึงในการเลือกใช้โลหะที่ทนต่อการกัดกร่อนในงานวิศวกรรมคือ

1. ควรเลือกใช้เหล็กและทองแดงสำหรับสภาวะแวดล้อมที่มีสารรีดิวซ์ (reducing agent) เช่น สารละลายกรดที่ไม่มีออกซิเจนละลายอยู่
2. ควรเลือกใช้โลหะผสมที่มีโครเมียมเป็นส่วนประกอบ สำหรับสภาวะแวดล้อมที่มีสารออกซิไดซ์ (oxidizing agent)
3. ควรเลือกใช้ไทเทเนียม สำหรับสภาวะแวดล้อมที่มีสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง

ตารางที่ 2.3 โลหะที่มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาวะต่างๆ ได้ดี [3]

1. Stainless steels–nitric acid
2. Nickel and nickel alloys–caustic
3. Monel–hydrofluoric acid
4. Hastelloys (Chlorimets)–hot hydrochloric acid
5. Lead–dilute sulfuric acid
6. Aluminum–nonstaining atmospheric exposure
7. Tin–distilled water
8. Titanium–hot strong oxidizing solutions
9. Tantalum–ultimate resistance
10. Steel–concentrated sulfuric acid

ตัวอย่างของการเลือกใช้วัสดุบางชนิด คือ การใช้เหล็กกล้าไร้สนิม บ่อยครั้งที่มักจะถูกเลือกใช้อย่างผิดๆ เนื่องจากผู้ผลิตไม่มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติการกัดกร่อนของโลหะ นั้น เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นเหล็กกล้าชนิดหนึ่งที่มีปริมาณ โครเมียมเกินกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ และมักจะถูกใช้ในสภาวะที่อาจก่อให้เกิดการกัดกร่อนรวมทั้งมีสารออกซิไดซ์ที่มีความรุนแรงปานกลาง เช่นกรดไนตริก แต่อย่างไรก็ตาม เหล็กกล้าไร้สนิมมักจะทนต่อการกัดกร่อนได้น้อยในสารละลายที่มีคลอไรด์ไอออน และจะเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากความเค้นและการกัดเซาะได้ง่ายกว่าเหล็กกล้าทั่วไป ดังนั้น จึงควรพิจารณาอย่างรอบคอบเมื่อมีการเลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิม

สำหรับวัสดุประเภทพอลิเมอร์ เช่น พลาสติกและยาง จะทนต่อการดองอินทรีย์แรงๆ ได้น้อยกว่าวัสดุประเภทโลหะและโลหะผสม ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดในการเลือกใช้วัสดุเหล่านี้ แต่อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันก็มีวัสดุประเภทพลาสติกที่มีความแข็งแรงสูงชนิดใหม่ๆ เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้วัสดุที่ไม่ใช่โลหะเหล่านี้มีบทบาทสำคัญมากขึ้นในอุตสาหกรรมต่างๆ

ส่วนวัสดุประเภทเซรามิก เป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนและทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี แต่ก็มีข้อเสียคือ มีความเปราะและมีความทนทานต่อแรงดึงได้น้อย วัสดุประเภทนี้มักจะถูกใช้ในการบุตามแนวปะเก็นวงแหวนและการเคลือบเพื่อช่วยควบคุมการกัดกร่อน

## 2.6.2 การเคลือบผิว (Coating)

การเคลือบด้วยโลหะ สารอินทรีย์หรือสารอินทรีย์ จะใช้ในการป้องกันหรือช่วยลดอัตราการกัดกร่อนได้

### - การเคลือบผิวด้วยโลหะ (Metallic Coating)

เป็นการเคลือบด้วยโลหะชนิดที่แตกต่างจากโลหะที่ต้องการป้องกัน สามารถทำได้ โดยการเคลือบโลหะอีกชนิดหนึ่งอย่างบางๆ บนผิวของโลหะที่ต้องการป้องกัน ซึ่งจะช่วยแยกโลหะที่ต้องการป้องกันออกจากสภาวะแวดล้อมที่อาจก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ บางครั้งโลหะที่ใช้เคลือบนั้นจะทำหน้าที่เป็นแอโนด ซึ่งจะถูกรกัดกร่อนแทนโลหะที่ทำการป้องกันไว้ เช่น การเคลือบเหล็กกล้าด้วยสังกะสีในการผลิตเหล็กกล้าอาบสังกะสี (Galvanized steel) ซึ่งสังกะสีจะทำหน้าที่เป็นแอโนดและจะถูกกัดกร่อนแทนเหล็กกล้านั่นเอง

โลหะหลายชนิดจะสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้โดยการชุบด้วยไฟฟ้า เพื่อผลิตชั้นฟิล์มบางๆ ของโลหะอีกชนิดหนึ่งที่จะใช้เป็นตัวปกป้อง เช่น การชุบชั้นฟิล์มบางๆ ของดีบุกบนแผ่นเหล็กกล้าเพื่อผลิตแผ่นดีบุกที่ใช้ทำกระป๋องดีบุก นอกจากนี้การชุบยังสามารถชุบเป็นหลายๆชั้นได้ เช่น แผ่น chrome ที่ใช้ในรถยนต์แผ่น chrome นี้จะประกอบด้วย 3 ชั้นด้วยกันคือ ชั้นแรกเป็นทองแดงซึ่งอยู่ในสุดทำหน้าที่เป็นตัวยึดเกาะในการชุบเหล็ก ชั้นที่สองเป็นนิกเกิลใช้สำหรับด้านทานการกัดกร่อน และชั้นนอกสุดเป็นชั้นบางๆ ของโครเมียมเพื่อทำให้แผ่นโครมดูสวยงาม ในบางครั้งผิวของโลหะที่ต้องการป้องกันสามารถทำได้โดยการรีดทับด้วยชั้นบางๆ ของโลหะอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งโลหะด้านนอกจะช่วยด้านทานการกัดกร่อนให้โลหะข้างใน เช่น เหล็กกล้าจะถูกห่อหุ้ม (clad) ด้วยชั้นบางๆ ของเหล็กกล้าไร้สนิม

#### - การเคลือบผิวด้วยสารอนินทรีย์ (Inorganic Coating)

ในงานบางประเภท เหล็กกล้าจะถูกเคลือบด้วยเซรามิก เพื่อให้มีความคงทนและผิวเรียบ โดยทั่วไปเหล็กกล้าจะถูกเคลือบด้วย porcelain ซึ่งจะประกอบด้วยชั้นบางๆ ของแก้วที่หลอมละลายเข้าไปในผิวของเหล็กกล้าเพื่อทำหน้าที่ยึดเกาะ นอกจากนี้ภาชนะบรรจุที่ทำจากเหล็กกล้าบุด้วยแก้ว จะถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเคมีเนื่องจากง่ายต่อการทำความสะอาดและทนทานต่อการกัดกร่อน

#### - การเคลือบผิวด้วยสารอินทรีย์ (Organic Coating)

สี (paints) น้ำมันเงา (vanishes) น้ำมันครั่ง (lacquers) และวัสดุพอลิเมอร์อื่นๆ อีกหลายชนิด มักถูกนำมาใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ วัสดุเหล่านี้จะทำให้เกิดชั้นฟิล์มบางๆ ที่เหนียวและทนทานเพื่อป้องกันโลหะจากสภาวะแวดล้อมที่อาจก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ จากการศึกษาพบว่า การป้องกันการกัดกร่อนของโลหะโดยวิธีการเคลือบด้วยสารอินทรีย์นี้ จะให้ผลดีกว่าวิธีอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตาม การเคลือบด้วยสารอินทรีย์ที่เหมาะสมควรมีการเตรียมพื้นผิวที่ต้องการเคลือบให้ดีด้วย มีหลายกรณีที่การทาสีไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร เนื่องจากเลือกใช้วิธีการเคลือบไม่เหมาะสมหรือเตรียมพื้นผิวที่ต้องการเคลือบไม่ดีพอ สิ่งที่ต้องระมัดระวังในการนำวัสดุที่เคลือบด้วยสารอินทรีย์ไปใช้ก็คือ ไม่ควรนำไปใช้ในบริเวณที่ถูกระแทกอย่างรุนแรง เพราะอาจทำให้ฟิล์มแตกหรือฉีกขาดได้

### 2.6.3 การออกแบบ (Design)

การออกแบบอุปกรณ์และเครื่องมือทางวิศวกรรมอย่างเหมาะสม เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สำคัญเป็นอย่างยิ่งในการป้องกันการกัดกร่อน วิศวกรผู้ออกแบบต้องพิจารณาวัสดุที่จะใช้ให้มีสมบัติต่างๆ ทางกลศาสตร์ ไฟฟ้า และความร้อนตามที่ต้องการ และในการพิจารณาจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดในเชิงเศรษฐศาสตร์ด้วย บางครั้งในการออกแบบที่มีปัญหาทางด้าน การกัดกร่อน ก็จำเป็นต้องอาศัยคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ทางด้านนี้ แนวทางและกฎเกณฑ์บางประการที่สำคัญสำหรับการใช้ในการออกแบบ คือ

1. ในการพิจารณาความทนทานของวัสดุ ควรเลือกใช้ความหนาที่ยอมให้เกิดการกัดกร่อนได้ในระดับหนึ่ง และควรมีความแข็งแรงเชิงกลมากพอสมควร โดยเฉพาะอย่างยิ่งการออกแบบท่อและถังที่ใช้บรรจุของเหลว
2. ควรใช้ภาชนะบรรจุที่ถูกเชื่อมต่อด้วยการบัดกรีมากกว่าการใช้หมุด เพื่อหลีกเลี่ยงการกัดกร่อนแบบชนิดรอยแยก (crevice corrosion) ถ้าจำเป็นต้องใช้หมุดควรเลือกใช้หมุดซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทดเมื่อเทียบกับวัสดุ
3. ควรเลือกใช้โลหะชนิดเดียวกันทั้งหมดและควรหลีกเลี่ยงการใช้โลหะต่างชนิดกัน เพราะจะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิกได้ ถ้าโลหะต่างชนิดถูกประกบด้วยสลักเกลียวเข้าด้วยกัน ควรใช้ประเก็นวงแหวนและวงแหวนเสริมเกลียวที่ไม่ใช่โลหะ เพื่อป้องกันการสัมผัสกันระหว่างโลหะ
4. ควรหลีกเลี่ยงความเค้นที่มากเกินไปในสภาวะแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ เพื่อป้องกันการเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากความเค้นและการกัดกร่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้ามีการใช้เหล็กไร้สนิม ทองเหลืองและวัสดุอื่นๆ ที่มักจะเกิดการกัดกร่อนได้
5. ควรหลีกเลี่ยงการใช้ระบบท่อที่มีการหักมุม โดยมีของเหลวไหลอยู่ภายใน บริเวณที่มีการเปลี่ยนทิศทางของของไหลทันทีทันใด จะก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ง่ายขึ้น
6. ควรออกแบบถังและภาชนะบรรจุอื่นๆ ให้ง่ายต่อการถ่ายเทของเหลวออกและทำความสะอาดได้ง่าย ถ้ามีการตกค้างของของเหลวภายในถังจะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ง่ายขึ้น
7. ควรออกแบบระบบให้ง่ายต่อการซ่อมบำรุง การเคลื่อนย้าย หรือการถอดเปลี่ยนอุปกรณ์ที่เสียได้ง่าย เช่น ปิ๊มที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเคมี ควรถูกเคลื่อนย้ายได้โดยง่าย
8. ควรออกแบบระบบทำความร้อนที่จะไม่ทำให้เกิด hot spots ขึ้น ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ควรถูกออกแบบให้มีอุณหภูมิสม่ำเสมอ

## 2.6.4 การเปลี่ยนแปลงสถานะแวดล้อม (Changing Environment)

สถานะแวดล้อม เป็นปัจจัยที่สำคัญมากในการกำหนดความรุนแรงของการกัดกร่อน เราอาจจะลดการกัดกร่อนได้โดยการเปลี่ยนแปลงสถานะแวดล้อมดังนี้ คือ (1) การลดอุณหภูมิ (2) การลดความเร็วของของเหลว (3) การกำจัดออกซิเจนออกจากของเหลว (4) การลดความเข้มข้นของไอออน และ (5) การเติมสารยับยั้งลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

1. การลดอุณหภูมิของระบบมักจะลดการกัดกร่อน เนื่องจากอัตราเร็วของการกัดกร่อนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ก็มีข้อยกเว้นในบางกรณีที่ให้ผลตรงกันข้าม เช่น น้ำทะเลที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้เกิดการกัดกร่อนน้อยกว่า เนื่องจากออกซิเจนจะละลายได้น้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

2. การลดความเร็วของของไหลที่จะก่อให้เกิดการกัดกร่อน จะสามารถลดการกัดกร่อนได้ แต่ถ้าโลหะผสมนั้น เป็นโลหะที่เกิดชั้นฟิล์ม Passive ได้ เราควรจะหลีกเลี่ยงการตกค้างของสารละลาย

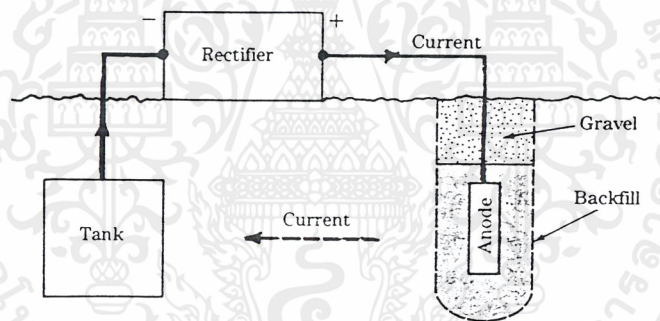
3. การกำจัดออกซิเจนออกจากสารละลายจะช่วยลดการกัดกร่อนได้ เช่น ถ้าเรากำจัดอากาศออกจากน้ำที่ป้อนเข้าสู่หม้อต้ม จะทำให้สามารถลดการกัดกร่อนได้ แต่ในบางระบบเราก็ต้องการออกซิเจน เพื่อผลิตชั้นออกไซด์ของโลหะขึ้น ดังนั้น เราจึงไม่ควรกำจัดอากาศออกจากสารละลายสำหรับในกรณีนั้น

4. การลดความเข้มข้นของไอออนที่จะก่อให้เกิดการกัดกร่อนในสารละลาย จะช่วยลดอัตราเร็วในการกัดกร่อนของโลหะได้ เช่น การลดความเข้มข้นของไอออนของคลอไรด์ในสารละลาย จะช่วยลดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมได้

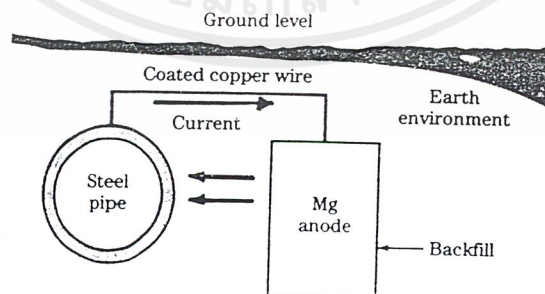
5. การเติมสารยับยั้งการกัดกร่อนในระบบ จะช่วยลดการกัดกร่อนได้ สารยับยั้งจะทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวางการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น สารยับยั้งแบบดูดซึม (Absorption-type inhibitors) จะถูกดูดซึมบนพื้นผิวและเกิดชั้นฟิล์มสำหรับป้องกันการกัดกร่อน นอกจากนี้ ยังมีสารยับยั้งแบบ Scavenger-type inhibitors ซึ่งจะทำหน้าที่กำจัดสารที่อาจก่อให้เกิดการกัดกร่อนในสารละลาย เช่น การกำจัดออกซิเจนออกจากสารละลาย

### 2.6.5 การป้องกันแบบแคโทด (Cathodic Protection)

การป้องกันการกัดกร่อนสามารถใช้วิธีที่เรียกว่า การป้องกันแบบแคโทด โดยใช้อิเล็กตรอนจะถูกป้อนให้กับโลหะที่ต้องการป้องกัน เช่น ถ้าอิเล็กตรอนถูกป้อนให้กับเหล็กกล้า การละลายของโลหะจะลดน้อยลงและอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้น ดังนั้น ถ้าอิเล็กตรอนถูกป้อนให้กับเหล็กกล้าอย่างต่อเนื่อง การกัดกร่อนของเหล็กกล้าจะลดลง อิเล็กตรอนที่ใส่ป้อนให้กับกระบวนการนี้มาได้จาก 2 วิธีการ คือ 1) การป้อนไฟฟ้ากระแสตรงจากภายนอก (external DC supply) ดังรูปที่ 2.6 โดยอิเล็กตรอนจะถูกป้อนให้กับถังและเกิดไฮโดรเจนที่ถังนี้ 2) การต่อเข้ากับโลหะที่ทำหน้าที่เป็นแอโนดมากกว่าโลหะที่ทำการป้องกัน การป้องกันแบบแคโทดของเหล็กกล้าโดยการต่อเข้ากับโลหะแมกนีเซียมที่ทำหน้าที่เป็นแอโนดดังแสดงในรูป 2.7 แมกนีเซียมที่กัดกร่อนแทนโลหะที่ต้องการป้องกันนี้ก็จะถูกนำมาใช้บ่อยในการป้องกันแบบแคโทดนี้ เนื่องจาก แมกนีเซียมมีค่าศักย์ไฟฟ้าติดลบมากกว่าและมีความหนาแน่นของกระแสมากกว่า



รูปที่ 2.6 การป้องกันโดยใช้กระแสไฟฟ้าจากภายนอก [3]



รูปที่ 2.7 การป้องกันแบบแคโทดของเหล็กกล้า [3]

### 2.6.6 การป้องกันแบบแอโนด (Anodic Protection)

วิธีการป้องกันแบบแอโนดนี้เป็นวิธีค่อนข้างใหม่และเป็นวิธีที่ทำให้เกิดชั้นออกไซด์ของโลหะนั้นบนผิวของโลหะหรือโลหะผสมชนิดเดียวกัน เพื่อป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า potentiostat เช่น การทำให้ผิวของดีบุกเกิดชั้นออกไซด์ของดีบุกโดยใช้เครื่อง potentiostat ทำให้อัตราเร็วในการกัดกร่อนเกิดช้าลง ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถใช้ได้ทั้งกรณีที่มีสถานะแวดล้อมก่อให้เกิดการกัดกร่อนน้อยจนถึงขั้นรุนแรงได้ และใช้กระแสไฟฟ้าในการป้องกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนข้อเสียของวิธีนี้คือ ต้องการเครื่องมือที่มีความสลับซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งค่อนข้างสูง



### บทที่ 3 สารยับยั้งการกัดกร่อน

#### 3.1 บทนำ

การป้องกันการกัดกร่อนสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การออกแบบกระบวนการและการเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและการใช้งาน การเคลือบป้องกันผิวหน้าของอุปกรณ์ นอกจากนี้ การปรับปรุงสิ่งแวดล้อมโดยใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน (Corrosion Inhibitors) ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับทั้งการใช้งานทั้งภายในและภายนอกกระบวนการอีกด้วย ซึ่งเนื้อหาในบทนี้ จะกล่าวถึง ชนิด คุณสมบัติ และการประยุกต์ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนชนิดต่างๆ ในกระบวนการอุตสาหกรรมอย่างคร่าวๆ

#### 3.2 สารยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibitors)

สารยับยั้งการกัดกร่อน เป็นสารเคมีชนิดหนึ่ง ซึ่งเมื่อเติมลงในสภาวะแวดล้อมหนึ่งๆ ในปริมาณเพียงเล็กน้อย แล้วจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนหรือทำให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นน้อยที่สุด สารยับยั้งการกัดกร่อนจะถูกใช้เพื่อช่วยป้องกันโลหะจากการถูกกัดกร่อน รวมทั้งใช้เพื่อป้องกันการถูกกัดกร่อนเพียงชั่วคราวระหว่างการขนย้าย สารยับยั้งที่มีประสิทธิภาพจะต้องเข้ากันได้กับสภาวะแวดล้อม ราคาถูก และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมหรือมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด ซึ่งโดยทั่วไปจะมีสมบัติร่วมกันดังนี้

1. ใช้ได้กับโลหะหลายชนิด ไม่ใช่เฉพาะกับเหล็กเท่านั้น
2. ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อน จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารยับยั้งโดยจะเป็นสัดส่วนกันโดยตรงด้วย
3. ค่าความเข้มข้นของสารยับยั้งจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารละลาย ชนิดของโลหะ สภาพของผิวโลหะ อุณหภูมิของของเหลว และความเข้มข้นของเกลือ ถ้ามีอัตราการกัดกร่อนสูงก็จำเป็นต้องใช้สารยับยั้งที่มีความเข้มข้นมาก นอกจากนี้ การเพิ่มความเร็วในการไหลหรือการกวนของสารละลายจะช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาของสารยับยั้งให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น
4. การใช้สารยับยั้งตั้งแต่ 2 ชนิดร่วมกัน จะให้ประโยชน์มากกว่าการใช้สารยับยั้งเพียงตัวเดียว

ประสิทธิภาพของสารยับยั้ง เป็นไปตามสมการดังนี้

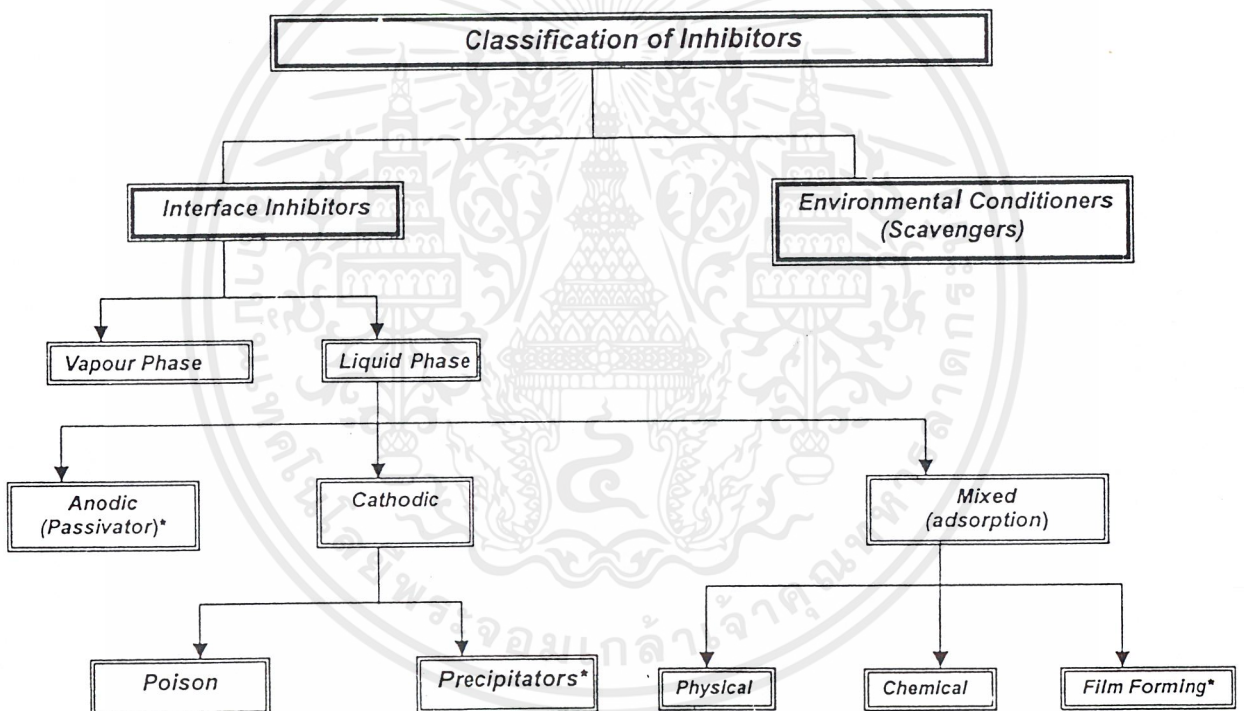
$$\% \text{ efficiency} = (w_0 - w / w_0) \times 100 \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

โดยที่  $w_0$  คือ อัตราการกัดกร่อนเมื่อไม่มีสารยับยั้ง

$w$  คือ อัตราการกัดกร่อนเมื่อมีสารยับยั้งในสภาวะแวดล้อมเดียวกัน

### 3.3 การจำแนกชนิดของสารยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibitors Classification)

การเลือกใช้สารยับยั้งจะขึ้นอยู่กับโลหะและสภาวะแวดล้อมที่ใช้ โดยสารยับยั้งการกัดกร่อนสามารถจำแนกได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การจำแนกชนิดของสารยับยั้งการกัดกร่อน [4]

### 3.3.1 ตัวปรับสภาพสิ่งแวดล้อม (Environmental Conditioners)

การกัดกร่อนสามารถควบคุมได้ โดยการกำจัดสารที่กัดกร่อนในสภาวะแวดล้อม ซึ่งจะช่วยลดการกัดกร่อนของโลหะนั้นได้ สารยับยั้งชนิดนี้เรียกว่า ตัวปรับสภาพสิ่งแวดล้อม ในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกลางและเบส อัตราการกัดกร่อนสามารถควบคุมได้โดยการลดปริมาณออกซิเจนซึ่งถูกใช้โดยผู้ย่อยสลาย

### 3.3.2 สารยับยั้งที่ผิว (Interphase Inhibitors)

สารยับยั้งที่ผิวสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้โดยการสร้างชั้นออกไซด์ที่บริเวณรอยต่อของผิวโลหะกับสิ่งแวดล้อม สารยับยั้งที่ผิวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

#### - สารยับยั้งที่ผิวในสถานะของเหลว (Liquid Phase Inhibitors)

สามารถแบ่งได้เป็น สารยับยั้งแบบแคโทด แบบแอโนด หรือแบบผสม ขึ้นอยู่กับว่าจะช่วยยับยั้งปฏิกิริยาแอโนดิก ปฏิกิริยาแคโทดิก หรือทั้งสองปฏิกิริยาพร้อมกัน

#### ■ สารยับยั้งแอโนดิก (Anodic Inhibitors)

สารยับยั้งแอโนดิกนิยมใช้ในสารละลายที่เป็นกลาง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการกัดกร่อนสามารถละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อย เช่น ออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ หรือเกลือของโลหะ สารยับยั้งชนิดนี้จะช่วยทำให้เกิดชั้นฟิล์มป้องกัน (protective film) ซึ่งป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของโลหะที่ทำหน้าที่เป็นแอโนด เมื่อความเข้มข้นของสารยับยั้งแอโนดิกไม่เพียงพอ ปฏิกิริยาการกัดกร่อนจะถูกเร่งให้เกิดมากกว่าปฏิกิริยาการยับยั้ง ความเข้มข้นน้อยที่สุดที่จะต้องเติมลงไปนั้น จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของโลหะ ไอออนและความเข้มข้นของสารกัดกร่อนหรือสารออกซิไดซ์

#### ■ สารยับยั้งแคโทดิก (Cathodic Inhibitors)

สารยับยั้งแคโทดิกสามารถควบคุมการกัดกร่อนได้ โดยการลดอัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน หรือเร่งให้เกิดการตกตะกอนของโลหะที่เป็นแคโทด (Cathodic precipitators)

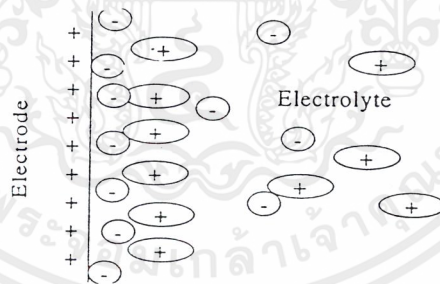
Cathodic Poisons เช่น ซัลไฟด์ และ เซเลไนด์ ถูกดูดซับโดยผิวของโลหะในสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกลางหรือเบส ไอออนลบของสารอนินทรีย์ เช่น ฟอสเฟต ซิลิเกต หรือโบเรต สารเหล่านี้จะเกิดเป็นฟิล์มป้องกันซึ่งจะช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยจะช่วยลดการแพร่ของออกซิเจนไปที่ผิวของโลหะที่ถูกกัดกร่อน Cathodic poisons จะทำให้เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งฟองก๊าซไฮโดรเจนนี้จะแตกออกภายในเนื้อโลหะ เนื่องจากการดูดซึมไฮโดรเจนเข้าไปในเนื้อโลหะ ปัญหานี้จะเกิดขึ้นในสารละลายกรด ซึ่งปฏิกิริยา

รีดักชันเป็นปฏิกิริยาการเกิดก๊าซไฮโดรเจน สารยับยั้งการกัดกร่อนจะเข้าไปขัดขวางไม่ให้ไฮโดรเจนไอออนทำปฏิกิริยากลายเป็นก๊าซไฮโดรเจน ในสถานะเช่นนี้ ไฮโดรเจนจะซึมผ่านเข้าไปในเนื้อเหล็ก แทนที่จะหลุดออกจากผิวของโลหะไปเป็นก๊าซไฮโดรเจน ทำให้เกิดการทำลายจากไฮโดรเจน (Hydrogen-Induced Cracking, HIC)

Cathodic Precipitators ช่วยเพิ่มความเป็นเบสให้กับสารละลาย และจะเร่งให้เกิดสารประกอบที่ไม่ละลายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์บนผิวของโลหะ สารยับยั้งชนิดนี้ที่นิยมใช้กันมากคือ แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $\text{MgCO}_3$ )

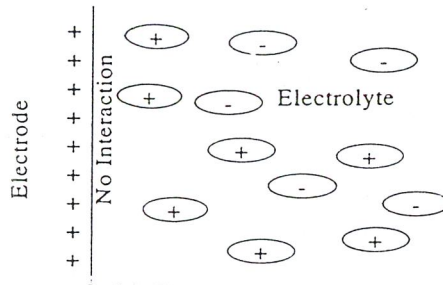
▪ สารยับยั้งผสม (Mixed Inhibitors)

ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของสารยับยั้งปฏิกิริยาชนิดนี้ เป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งไม่สามารถระบุได้ว่า เป็นสารยับยั้งแคโทด หรือสารยับยั้งแอโนด จึงถูกเรียกว่าสารยับยั้งผสม ประสิทธิภาพของสารยับยั้งอินทรีย์สัมพันธ์กับขนาดของการดูดซับและการเคลือบผิวของโลหะ การดูดซับขึ้นอยู่กับโครงสร้างของสารยับยั้งและชนิดของอิเล็กโทรไลต์ สารยับยั้งผสมมีกลไกในการป้องกันโลหะได้ 3 วิธี คือ (1) การดูดซับทางกายภาพ (2) การดูดซับทางเคมี (3) การทำให้เกิดฟิล์มป้องกัน การดูดซับทางกายภาพ เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตระหว่างสารยับยั้งกับพื้นผิวของโลหะ เมื่อผิวของโลหะถูกทำให้มีประจุบวก โลหะนั้นจะเกิดการดูดซับประจุลบ (สารยับยั้งการกัดกร่อน) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การดูดซับประจุลบโดยประจุบวกบนผิวโลหะ [4]

โมเลกุลที่มีประจุบวกจะดึงดูดกับโมเลกุลที่มีประจุลบ ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดประจุบวกของโลหะได้ ไอออนลบ เช่น เฮไลด์ไอออนในสารละลาย จะถูกดูดซับติดอยู่กับประจุบวกที่ผิว ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ประจุบวกของสารยับยั้งการกัดกร่อนไม่ทำปฏิกิริยากับประจุบวกบนผิวโลหะ [4]

การกัดกร่อนของเหล็กในกรดซัลฟิวริก ประกอบด้วยซัลเฟตไอออน ซึ่งสามารถยับยั้งได้โดยใช้แอมโมเนียมไอออน ถ้าปฏิกิริยานี้เป็นการดูดซับทางกายภาพแล้ว สารยับยั้งการกัดกร่อนจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็ว แต่สามารถกำจัดออกไปจากพื้นผิวได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิ สารยับยั้งการกัดกร่อนที่มีประสิทธิภาพที่สุด คือสารยับยั้งการกัดกร่อนที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับผิวโลหะ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการแบ่งประจุหรือเคลื่อนย้ายประจุระหว่างโมเลกุลของสารยับยั้งและผิวของโลหะ การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นได้ช้ากว่าการดูดซับทางกายภาพ ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น การดูดซับและการป้องกันก็จะเพิ่มขึ้นด้วย การดูดซับทางกายภาพนั้นเกิดขึ้นได้อย่างจำกัดและไม่สามารถผันกลับได้อย่างสมบูรณ์ โมเลกุลที่ถูกยับยั้งของตัวดูดซับจะเกิดปฏิกิริยาที่ผิวโดยการสร้างฟิล์มพอลิเมอร์ขึ้นมา การป้องกันการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในขณะที่ฟิล์มถูกสร้างขึ้นและมีความหนาเพิ่มขึ้นจนถึงหลายร้อยอังสตรอม ( Å ) การป้องกันแบบนี้จะมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อ ฟิล์มป้องกันนี้ไม่ละลายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์และสามารถป้องกันการสัมผัสของสารละลายกับผิวโลหะ ซึ่งฟิล์มป้องกันอาจจะนำไฟฟ้าหรือไม่นำไฟฟ้าก็ได้

- สารยับยั้งในสถานะก๊าซ (Vapor Phase Inhibitors)

การป้องกันชั่วคราวซึ่งต่อต้านการกัดกร่อนทางอากาศ โดยเฉพาะในระบบปิดสามารถทำได้โดยใช้สารยับยั้งที่เป็นก๊าซ (VPI) สารที่มีความดันไอสูง เป็นคุณสมบัติของการยับยั้งที่ดี VPIs ถูกใช้โดยห่อกระดาษแล้วปล่อยให้ระเหยไปต่างๆในระบบปิด การระเหยของสารยับยั้งนี้จะช่วยต่อต้านการกัดกร่อนจากอากาศและไอน้ำ โดยทั่วไปแล้ว VPIs จะมีผลดีกับสารที่เกิดสนิมได้ง่าย

### 3.4 การประยุกต์ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมต่างๆ

#### 3.4.1 อุตสาหกรรมปิโตรเลียม

การกัดกร่อนในอุตสาหกรรมไฮโดรคาร์บอนอาจแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การกัดกร่อนชนิดเปียกและการกัดกร่อนชนิดแห้ง ที่อุณหภูมิต่างๆ เช่น ต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ โลหะจะถูกกัดกร่อนเนื่องจากการมีสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายอยู่ด้วยเรียกว่า การกัดกร่อนชนิดเปียก ส่วนที่อุณหภูมิสูงๆ เช่น สูงกว่าจุดเดือดของน้ำ จะเกิดการกัดกร่อนโดยไม่มีน้ำอยู่ ซึ่งเรียกว่า การกัดกร่อนชนิดแห้ง

การกัดกร่อนชนิดเปียกจะได้รับผลกระทบจากความดัน อุณหภูมิและองค์ประกอบของสารละลายของแก๊สและเฟสของน้ำมันที่เปลี่ยนไป ในโรงกลั่นและโรงงานปิโตรเคมี ปริมาณของน้ำโดยปกติจะมีน้อยอยู่แล้ว และจะมีการกัดกร่อนในบริเวณที่มีน้ำมาสัมผัสกับผิวโลหะ โดยในน้ำอาจจะมีไฮโดรเจนซัลไฟด์ คาร์บอนไดออกไซด์ คลอไรด์ไอออน ละลายอยู่ก็ได้ การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นได้แม้กระทั่งเมื่อมีน้ำเป็นองค์ประกอบในสารละลายเพียง 0.1 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและอุตสาหกรรมปิโตรเคมี จะใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบที่สร้างฟิล์มป้องกันได้หลายชนิด เพื่อควบคุมการกัดกร่อนชนิดเปียก สารยับยั้งการกัดกร่อนเกือบจะทั้งหมด เป็นสายโซ่ยาวของสารอินทรีย์ที่มีหมู่ของไนโตรเจน รวมทั้งเอมีนและเอไมด์ เป็นองค์ประกอบ

#### 3.4.2 การกัดกร่อนภายในท่อเหล็กกล้า

การกัดกร่อนภายในท่อเหล็กกล้าของโรงงาน คล้ายกับปัญหาในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ระบบการไหลของของไหลหลายๆ เฟสในท่อส่งผลต่ออัตราการกัดกร่อน ที่อัตราการไหลสูงๆ จะทำให้ท่อเกิดการกัดกร่อนและการกัดเซาะเนื่องจากของไหล ในขณะที่อัตราการไหลต่ำๆ จะเกิดการกัดกร่อนแบบเป็นหลุม อัตราการกัดกร่อนสัมพันธ์กับปริมาณและธรรมชาติของตะกอนที่อยู่ในท่อ ที่อัตราการไหลสูงๆ จะทำให้เกิดการกวาดตะกอนออกจากท่อได้ แต่ที่ความเร็วการไหลต่ำๆ ตะกอนจะตกตะกอนอยู่ที่ก้นท่อ ทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบเป็นหลุม การควบคุมการกัดกร่อนภายในท่อ สามารถทำได้โดยการล้างท่อหรือใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบต่อเนื่อง

### 3.4.3 น้ำ

ในน้ำดื่มมักจะมียอดอกซิเจนละลายอยู่อย่างอิ่มตัวซึ่งจะก่อให้เกิดการกัดกร่อน หากไม่มีฟิล์มป้องกันไว้ในภาชนะที่บรรจุ สารยับยั้งแคโทดิก เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิเกต โพลีฟอสเฟต และเกลือของสังกะสี นิยมใช้ในการควบคุมการกัดกร่อนของน้ำดื่ม การใช้น้ำในระบบการทำ ความเย็น จะเกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิก กรณีนี้สามารถควบคุมได้โดยการใช้สารยับยั้งการ กัดกร่อนชนิดแอนอติก เช่น ไนเตรด และ โครเมต หรือสามารถควบคุมโดยการใช้สารยับยั้งแค โทดิกที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น เบนโซไตรอะโซล

### 3.4.4 กรด

กรดมักถูกใช้เป็นน้ำยาทำความสะอาดอุปกรณ์ในกระบวนการกลั่นและเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน สารยับยั้งผสมจึงถูกใช้ในการควบคุมการกัดกร่อนจากกรดสำหรับดีบุกในสารละลาย กรดไฮโดรคลอริก

### 3.4.5 สถานะอื่นๆ

สารยับยั้งการกัดกร่อน สามารถใช้ในเครื่องยนต์เพื่อป้องกันการกัดกร่อนจากน้ำหล่อเย็น หรือแม้กระทั่งเป็นสารป้องกันการแข็งตัว สามารถใช้ในงานสีเพื่อช่วยรักษาคุณภาพของสี รวมทั้งจะช่วยป้องกันไม่ให้สีกัดกร่อนโลหะที่ถูกเคลือบอยู่ เช่น ตะกั่วแดง ( $Pb_3O_4$ )

## 3.5 ปัจจัยอื่นในการประยุกต์ใช้สารยับยั้ง

### 3.5.1 เทคนิคการประยุกต์ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน

ควรจะใช้วิธีที่เหมาะสมกับสารยับยั้งชนิดหนึ่งๆ สาเหตุที่เกิดขึ้นบ่อยๆ ในการใช้สารยับยั้ง อย่างไม่มีประสิทธิภาพ คือใส่สารยับยั้งหลังจากที่สารกัดกร่อนสัมผัสกับผิวโลหะแล้ว ดังนั้นถึงแม้ว่าจะใช้สารยับยั้งที่ดีที่สุดก็อาจจะไม่ได้ผล ถ้าไม่ได้ใช้อย่างถูกวิธี เมื่อใช้สารยับยั้งแบบ ระบายเป็นไอก็ควรจะป้องกันไม่ให้สารยับยั้งระเหยออกไปนอกระบบ เป็นต้น

### 3.5.2 ผลของอุณหภูมิกับสารยับยั้งการกัดกร่อน

สารอินทรีย์สามารถสลายตัวได้หากอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นฟิล์มที่เกิดจากการดูดซับทางกาย ภาพจะมีประสิทธิภาพลดลงถ้าอุณหภูมิของระบบสูงขึ้น ดังนั้นในการใช้งานจึงต้องหาปริมาณที่

เหมาะสมของสารยับยั้งการกัดกร่อน เพื่อให้ได้ความหนาของฟิล์มป้องกันที่เหมาะสมและเพื่อที่จะสามารถรักษาฟิล์มไว้ได้ ในทางตรงข้าม ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมี เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความแข็งแรงของพันธะจะสูงขึ้นด้วย ดังนั้นประสิทธิภาพของสารยับยั้งก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย จนถึงอุณหภูมิค่าหนึ่งพันธะก็จะถูกทำลายเช่นกัน

### 3.5.3 ผลข้างเคียง

สารยับยั้งการกัดกร่อนจากไฮโดรเจน ควรจะลดอัตราการกัดกร่อน อัตราการดูดซึม และอัตราการซึมผ่านของไฮโดรเจนเข้าไปในโลหะพร้อมๆ กัน ตัวอย่างเช่น อัตราการกัดกร่อนของเหล็กในกรดซัลฟิวริกจะลดลงในขณะที่อัตราการดูดซึมของไฮโดรเจนเข้าไปในเหล็กสูงขึ้นโดยการเติมไฮโดรเจนเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน ถึงแม้ว่าไฮโดรเจนจะยับยั้งการกัดกร่อนได้ แต่ไฮโดรเจนจะเกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนกลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนเป็นจำนวนมาก ซึมผ่านเข้าไปในผิวของโลหะและทำลายโลหะ เป็นต้น

### 3.5.4 การป้องกันขั้นที่สอง

โดยธรรมชาติ สารยับยั้งการกัดกร่อนที่อยู่ในกรดจะเกิดกระบวนการสองอย่าง คือ จะเกิดปฏิกิริยาเคมีตามด้วยปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า การป้องกันการกัดกร่อนที่เกิดจากผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาจะถูกเรียกว่า การป้องกันขั้นที่สอง โดยจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ดังนั้นการป้องกันขั้นที่สองจะมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่าหรือด้อยกว่าการป้องกันขั้นแรกก็ได้

### 3.5.5 สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม (Green Inhibitors)

การเลือกใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนควรคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคตด้วย เป็นผลให้มีผู้คิดค้นสารยับยั้งการกัดกร่อนสำหรับปฏิกิริยาการกัดกร่อนที่สภาวะต่างๆ ที่มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้นและได้มีการพัฒนาเรื่อยมา โดยเน้นในเรื่องของการย่อยสลายด้วยจุลชีพ ค่า BOD และสารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้จะต้องไม่มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ค่า BOD คือ ปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน (Aerobic) ส่วนความเป็นพิษของสารยับยั้งการกัดกร่อนจะแสดงในรูปของค่า  $LC_{50}$  หรือ  $EC_{50}$  ค่า  $LC_{50}$  มีความหมายถึง ปริมาณความเข้มข้นที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้สิ่งมีชีวิตตายไปเป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของสิ่งมีชีวิตที่นำมาทดสอบ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของสารละลาย

ส่วนค่า  $EC_{50}$  เป็นปริมาณความเข้มข้นที่น้อยที่สุดที่เริ่มมีผลกระทบกับสิ่งมีชีวิตจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนตัวอย่างทั้งหมด

ตารางที่ 3.1 ความเป็นพิษของสารยับยั้งการกักคร่อน [4]

Compound	LC <sub>50</sub> , (mg/kg)
Propargyl alcohol	55
Hexynol	34
Cinnamaldehyde	2200
Formaldehyde	800
Dodecylpyridinium bromide	320
Naphthylmethylquinolinium chloride	644
Nonylphenol-ethylene oxide surfactants	1310

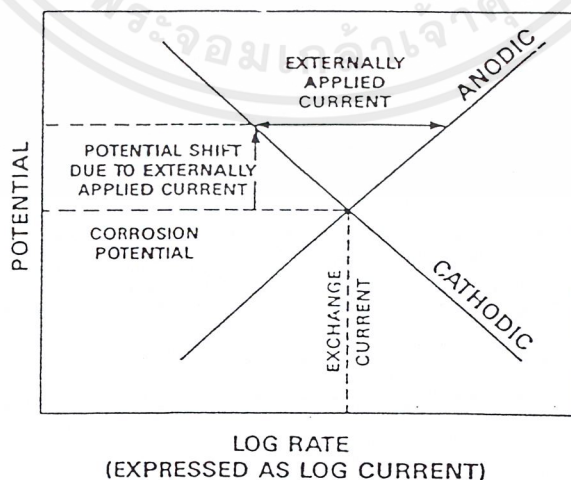
ความต้องการสารยับยั้งการกักคร่อนที่มีความเป็นพิษน้อย และถูกย่อยสลายได้ง่ายด้วยจุลินทรีย์ จะเพิ่มมากขึ้นในอนาคต ดังนั้นการเลือกใช้สารยับยั้งการกักคร่อนจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของสารยับยั้งที่ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมด้วย

## บทที่ 4

### การทดสอบการกัดกร่อน

#### 4.1 บทนำ

ปฏิกิริยาการกัดกร่อนเป็นปรากฏการณ์ที่ใช้เวลาที่จะถูกสำรวจอาจเป็นเดือน ปี หรือหลายปี แต่ความจำเป็นในการทราบข้อมูลเกี่ยวกับพฤติกรรมของการกัดกร่อนของวัสดุในสิ่งแวดล้อมต่างๆ ต้องการความรวดเร็วเป็นหลัก ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการการทดสอบการกัดกร่อนให้ใช้เวลาสั้นและให้ผลที่ถูกต้องใกล้เคียงสภาวะจริงมากที่สุด อัตราการเกิดปฏิกิริยาแอโนดิกและแคโทดิก ประกอบด้วย กระบวนการกัดกร่อน ซึ่งเป็นฟังก์ชันของศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนของวัตถุ ศักย์ไฟฟ้านี้สามารถนำวัดได้โดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอกเข้าไปที่วัตถุ กรณีอย่างง่าย คือ ปฏิกิริยาแอโนดิกและปฏิกิริยาแคโทดิกภายใต้สภาวะการควบคุมการถ่ายเทประจุแบบอุดมคติ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เมื่อกระแสไฟฟ้าจากภายนอกถูกจ่ายเข้าไป จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาแอโนดิกและแคโทดิกเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น ความแตกต่างระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งสองจะเท่ากับกระแสที่จ่ายเข้าไป เป็นสาเหตุให้ศักย์ไฟฟ้าเปลี่ยนไปจากศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนอย่างอิสระ ซึ่งจะไม่มีการเสจากภายนอกถูกจ่ายเข้าไป นอกจากนี้ Weight loss เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่เกิดจากปฏิกิริยาแอโนดิกของการออกซิเดชันของโลหะ จะได้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาแอโนดิกและแคโทดิก โดยการวัดกระแสที่จ่ายและ Weight loss ที่ศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งหรือมากกว่า ซึ่งแตกต่างจากศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน สิ่งเหล่านี้จะเป็นพื้นฐานของการนำไปใช้ในการทดสอบแบบ Potentiostatic หรือ ศักย์ไฟฟ้าคงที่



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสจากภายนอกที่จ่ายเข้าไป

## 4.2 ประเภทของการทดสอบการกักกร่อน

การทดสอบการกักกร่อนอาจแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อจุดประสงค์ในการยอมรับหรือรับรองคุณภาพ การทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ (laboratory test or semiwork test) การทดสอบในงานจริงหรือในโรงงานจำลอง (pilot plant test) การทดสอบในสภาวะแวดล้อมจริง (actual service test) และสุดท้ายเป็นการทดสอบภาคสนาม (field test) บางกรณีอาจแบ่งการทดสอบเป็น 3 ประเภท โดยสรุปแล้ว การทดสอบในโรงงานจริงจะให้ข้อมูลที่จำเพาะเจาะจงสำหรับงานใดงานหนึ่งเท่านั้น ส่วนการทดสอบภาคสนามจะให้ข้อมูลที่ต่างๆ ไปมากกว่า

### 4.2.1 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เป็นการทดสอบโดยใช้ชิ้นงานเล็กๆ และใช้ปริมาณของสารละลายจำนวนน้อย รวมทั้งจัดสภาวะแวดล้อมให้ใกล้เคียงกับสภาวะที่เป็นจริงมากที่สุด การทดสอบในห้องปฏิบัติการจะเป็นขั้นตอนแรกของการทดสอบเพื่อนำไปตรวจสอบหรือใช้งานในขั้นต่อไป

### 4.2.2 การทดสอบในระดับ Pilot plant หรือ Semiwork test

โดยทั่วไปยอมรับว่าเป็นการทดสอบที่ดีที่สุด และเป็นข้อมูลที่มีความต้องการเพื่อใช้งานมากที่สุด เนื่องจากเป็นการจำลองหรือสมมติสภาวะแวดล้อมทั้งความเข้มข้น อุณหภูมิ ความเร็วการไหลของสารละลาย และพื้นที่สัมผัสของชิ้นงาน ผลการทดลองที่ได้จากวิธีนี้มีความถูกต้องค่อนข้างสูง

### 4.2.3 การทดสอบในโรงงานจริงหรือสภาวะจริง

การทดสอบจะเกิดขึ้นได้ เมื่อมีการจัดการดำเนินงานในโรงงานจริง เป็นข้อมูลที่สามารถจะเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานรวมทั้งสามารถเปลี่ยนแปลงข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ และยังเหมาะสำหรับงานศึกษาพฤติกรรมการกักกร่อนด้วย

## 4.3 วัตถุประสงค์ของการทดสอบการกักกร่อน

วัตถุประสงค์หลักยังคงมุ่งเน้นที่ข้อมูลเกี่ยวกับการควบคุมคุณภาพและพฤติกรรมของวัสดุ ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ใช้งาน ซึ่งพอจะสรุปเรียบเรียงได้ดังนี้

4.3.1 เพื่อการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยอาจเป็นการทดสอบประจำวัน การทดสอบเพื่อการยอมรับในตลาด หรือเพียงให้ถูกต้องตามเงื่อนไขที่คู่สัญญาหรือลูกค้าได้ตกลงไว้ นอกจากนี้ยังส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่สม่ำเสมอตลอดเวลา

- 4.3.2 เพื่อประเมินอายุใช้งานของอุปกรณ์จากผลการทดสอบการกัดกร่อน
- 4.3.3 เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุต่างๆ ในการใช้งานสภาวะเดียวกัน
- 4.3.4 เพื่อเปรียบเทียบความรุนแรงของสิ่งแวดล้อมต่างๆ
- 4.3.5 เพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของโลหะวัสดุ

#### 4.4 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการกัดกร่อน

ในการจัดการทดสอบการกัดกร่อน ประกอบด้วยการจัดเตรียมการทดสอบหลายขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมชิ้นงานทดสอบ การกำหนดสภาวะทดสอบ การวิเคราะห์ผลทดสอบ การวัดและการชั่งน้ำหนักชิ้นงานทดสอบ ตลอดจนการจัดการทดสอบระยะเวลา และการประเมินผลการทดสอบ

##### 4.4.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบ ควรจะทราบข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบของวัสดุ วิธีการผลิต หรือข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่จะทดสอบในแง่ต่างๆ ขนาดและรูปร่างของชิ้นงาน อาจเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส งาน หรือทรงกระบอก ความหนาอาจจะเป็น 1/16, 1/4 หรือ 1 นิ้ว มีความยาว 2 นิ้ว เป็นขนาดของชิ้นงานที่เหมาะสมสำหรับใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ ส่วนการทดสอบการกัดกร่อนในโรงงานจริงก็เตรียมชิ้นงานให้มีขนาดตามที่ต้องการ

##### 4.4.2 การเตรียมพื้นผิว

การเตรียมพื้นผิวของชิ้นงาน เพื่อให้ใกล้เคียงกับสภาพพื้นผิวของอุปกรณ์ จะต้องมีการทำความสะอาดโดยการขัดด้วยกระดาษทรายละเอียด และล้างคราบไขมันด้วยตัวทำละลาย เช่น แอซิโตน เพื่อให้ชิ้นงานทดสอบมีพื้นผิวสะอาดและเหมาะสมกับการทดสอบ

##### 4.4.3 การจัดและชั่งน้ำหนัก

หลังจากการเตรียมชิ้นงานแล้วก็ต้องระมัดระวังในการหาพื้นผิวสัมผัสของชิ้นงานทดสอบ และจะใช้ค่าพื้นผิวสัมผัสเริ่มต้น เป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณตลอดการทดสอบ หลังจากวัดแล้วก็ต้องทำความสะอาด และล้างไขมันด้วยตัวทำละลาย ทำให้ชิ้นงานทดสอบแห้งและชั่งน้ำหนัก โดยให้มีความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักอยู่ในช่วง 0.1 มิลลิกรัม (สำหรับชิ้นงานขนาดเล็ก)

##### 4.4.4 Exposure Techniques

การที่จะติดตั้งชิ้นงานให้สัมผัสกับบรรยากาศ ไม่ว่าจะเป็นการทดสอบในห้องปฏิบัติการ หรือการทดสอบในโรงงาน ข้อสำคัญที่ควรพิจารณา ได้แก่

- เป็นการกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อนได้ง่ายๆ สำหรับชิ้นงาน

- ตัวรองรับชิ้นงานมีความคงทน ไม่เสียหายก่อนเสร็จสิ้นการทดสอบ
- ชิ้นงานไม่ควรสัมผัสกับโลหะชนิดอื่นๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการกัดกร่อนแบบโลหะต่างชนิด ซึ่งเป็นรูปแบบที่ไม่ได้พิจารณา
- ชิ้นงานจะอยู่ในสภาวะจุ่มลงในสารละลายทั้งหมด จุ่มบางส่วน อยู่ในบรรยากาศของไอหรือบรรยากาศแห้ง ขึ้นกับสิ่งแวดล้อมที่ต้องการจะศึกษา
- สำหรับชิ้นงานที่ทดลองในสภาวะโรงงาน ควรอยู่ในสภาพที่ง่ายต่อการติดตั้งและการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง

#### 4.4.5 เวลาที่ใช้ในการทดสอบ

การประเมินผลการทดสอบการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ตลอดจนเวลาต่างๆ ที่ใช้ไปในระหว่างทดสอบ การคำนวณเวลาที่ใช้ในการทดสอบมีสูตรง่ายๆ ดังนี้

$$\text{เวลาที่ใช้ในการทดลอง (ชั่วโมง)} = 2000/\text{มิลต่อปี (mpy)}$$

สำหรับอัตราการกัดกร่อน (mpy) คำนวณได้จากสูตร

$$\text{mpy} = 534 \text{ W/DAT}$$

โดยที่ W = น้ำหนักที่หายไป หน่วยเป็นมิลลิกรัม

D = ความหนาแน่นของชิ้นงาน หน่วยเป็นกรัม/ซม.

A = พื้นที่ของชิ้นงาน หน่วยเป็นตารางนิ้ว

T = เวลาที่ใช้ในการทดลอง หน่วยเป็นชั่วโมง

โดยที่สามารถจะเปลี่ยนแปลงอัตราการกัดกร่อนเป็นหน่วยอื่นๆ ได้ ดังนี้

$$\text{mpy} \times 1000 = \text{inch per year} = \text{นิ้วต่อปี}$$

$$\text{mpy} \times 12100 = \text{inch per month} = \text{นิ้วต่อเดือน}$$

$$\text{mpy} \times 1.44 / \text{Sp. Gr.} = \text{mg/dm}^2/\text{day (mdd)} = \text{มก./ตร.คม./วัน}$$

#### 4.5 ข้อควรคำนึงในการทดสอบการกัดกร่อน

ข้อควรระวังหรือปัญหาที่เกิดขึ้นเสมอในระหว่างการทำทดสอบ มีดังต่อไปนี้

#### 4.5.1 การทดสอบในห้องทดลอง

ก. การจำลอง (Reproduce) สภาวะจริงมาในห้องทดลองนั้นทำได้ยาก ความยากเริ่มตั้งแต่การใช้สารในห้องทดลองให้เหมือนกับอุปกรณ์จริงมีอยู่ส่วนใหญ่ สารเหล่านี้จะเป็นสารที่ไม่มีเสถียรภาพเชิงเทอร์โมไดนามิกส์ (สารที่มีอยู่ในสภาวะสมดุล) และยังมีสารเจือปนปริมาณน้อยมากที่มีผลต่อการกัดกร่อนปนอยู่ด้วยในอุปกรณ์จริง ตัวอย่างเช่นรูปที่ 6.1 เป็นแผนภูมิของหอสัมผัสของเหลวและก๊าซ (Gas-Liquid Contactor) แบบ Bubble cap ซึ่งใช้กันแพร่หลายในโรงงานเคมี เมื่อต้องการการกัดกร่อนของฝา (cap) ของเหลวที่สัมผัสกับฝาจะไม่อยู่ในสภาวะสมดุลอย่างสมบูรณ์กับไอ แต่จะเกิดการถ่ายเทของมวลระหว่างกัน ดังนั้นถ้าต้องการจำลองเงื่อนไขในการทดสอบในห้องจำลอง จะต้องมีการสร้างสภาวะสัมผัสระหว่างไอกับของเหลวที่เหมือนกับในอุปกรณ์จริง ประเด็นเดียวกันนี้จะเห็นได้ง่ายเมื่อพิจารณาปฏิกิริยาเคมีที่เกิดอยู่ ความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในเตาปฏิกรณ์ไม่ใช่เงื่อนไขสำหรับให้สารต่างๆ ในนั้นอยู่ในสภาวะที่มีเสถียรภาพ แต่เพื่อเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมี ดังนั้นถ้าต้องการคงสภาพของสารในอุปกรณ์เป็นเวลานาน จำเป็นต้องใช้ถังปฏิกรณ์แบบไหลผ่าน (plug flow) ซึ่งทำได้ลำบากในการทดสอบขนาดเล็กในห้องทดลอง ปัญหาที่จะตามมาอีกคือ สิ่งเจือปนมีพิษที่มาจากวัตถุดิบและบรรยากาศก่อนทำการทดสอบในห้องทดลอง จะต้องพิจารณาเกี่ยวกับสารมีพิษที่อาจจะก่อปัญหาให้ตัวอุปกรณ์อย่างรอบคอบเสียก่อน ซึ่งมักจะมาจากสารเจือปนที่มีปริมาณน้อยมากในวัตถุดิบของอุตสาหกรรม (แร่ น้ำมันดิบ และถ่านหิน) น้ำและอากาศ การทดลองจะไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากการละลายในรายละเอียดเหล่านี้ เช่น ถึงปฏิกรณ์ของโรงงานผลิตสารคลอไรด์อินทรีย์แห่งหนึ่ง ในการพัฒนากระบวนการระดับ Beaker scale จนถึง Pilot plant test ได้มีการพิจารณาวัสดุอย่างถี่ถ้วน แต่เมื่อลองสร้างถังปฏิกรณ์ตัวแรกด้วยเหล็กกล้าคาร์บอนจะถูกกัดกร่อนแบบทั่วไป (General corrosion) จนแตกระเบิดในเวลาประมาณ 3 เดือน เป็นต้น

ปัญหาต่อไปที่ทำให้การจำลองสภาวะจริงในห้องทดลอง ทำได้ยากลำบากก็คือการไหลและการถ่ายเทความร้อนผ่านผิววัสดุ ยกตัวอย่างเดิมคือหอแบบ Bubble cap ข้างต้นสภาวะการไหลบน cap จะสลับซับซ้อนมาก การจำลองสภาวะการไหลนี้บนชั้นทดสอบจะกระทำอย่างสะดวกได้อย่างไรนั้น ในปัจจุบันไม่สามารถบอกได้นอกจากอาศัยไหวพริบและประสบการณ์ของผู้ทดสอบเท่านั้น อย่างไรก็ตาม การทดสอบในห้องทดลอง ควรเลือกใช้อุปกรณ์ทดสอบที่รู้ปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลและการถ่ายเทความร้อนระหว่างชั้นทดสอบและของไหลเป็นอย่างดี

ข. เวลาทดสอบสั้น จากการทดสอบในห้องทดลอง พบว่าการรักษาเงื่อนไขการทดสอบให้คงที่อย่างแม่นยำเป็นเวลานานนั้นกระทำได้ยากลำบากมาก สาเหตุหนึ่ง ซึ่งได้กล่าวไว้ในข้อ ก. แล้ว ก็คือความลำบากในการจัดหาสารภายในตัวอุปกรณ์จริง และยังมีเวลาไม่พอ จะเป็นเหตุผลใดก็ตาม เวลาที่ใช้ทดสอบจะสั้นมาก เมื่อเทียบกับอายุการใช้งานนับสิบๆ ปี ของอุปกรณ์ที่กำลังศึกษาการกักกร่อน เมื่อเป็นเช่นนี้ มักนิยมทำการทดสอบแบบเร่งความเร็ว (Accelerated test) แต่ปัญหาใหญ่อยู่ที่ว่าจะประเมินผลการทดสอบที่ได้ได้อย่างไร

#### 4.5.2 การทดสอบในสถานที่จริง

การทดสอบในสถานที่จริงก็มีรูปแบบต่างๆ ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการสอดชิ้นตัวอย่างเข้าทดสอบในอุปกรณ์จริง ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุด

ก. การได้ข้อมูลเฉพาะของส่วนที่ถูกกำจัดเท่านั้น

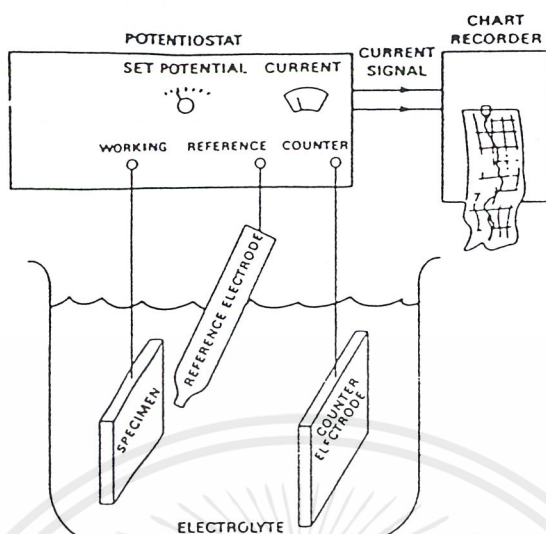
ในกรณีที่มีอุปกรณ์คล้ายคลึงกับอุปกรณ์ที่สนใจกำลังเดินเครื่องอยู่ วิธีทดสอบทำได้โดยการสอดชิ้นทดสอบเข้าไปในเครื่อง ซึ่งจะสามารถกำจัดปัญหาทั้งหมดเกี่ยวกับการจำลองสารภายในอุปกรณ์และสารเจือปนพิษ เมื่อหน้าที่หลักของโรงงานที่กำลังเดินเครื่องอยู่ คือการคงไว้ซึ่งอัตราการผลิต จึงต้องหลีกเลี่ยงการทดสอบที่อาจจะมีผลกระทบต่อการผลิต ดังนั้นตำแหน่งที่สามารถสอดชิ้นทดสอบและจำนวนชิ้นทดสอบก็จะถูกจำกัดลง ผลก็คือ ส่วนใหญ่จะไม่สามารถเข้าใจผลของการไหลและการถ่ายเทความร้อนอย่างสมบูรณ์ได้

ข. การได้ข้อมูลเฉพาะในสภาวะการใช้งานปกติเท่านั้น

ข้อมูลประเภทหนึ่งที่น่าสนใจก็คือการเปลี่ยนแปลงสภาวะการใช้งานที่มีต่อการกักกร่อน ซึ่งข้อมูลนี้ไม่สามารถได้มาโดยการสอดชิ้นทดสอบเข้าไปในระบบ และจังหวะที่สามารถสอดชิ้นทดสอบเข้าหรือดึงออกก็ถูกจำกัดในภาคปฏิบัติด้วย ทำให้ไม่ได้ข้อมูลในเวลาทดสอบที่ต้องการและไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของการกักกร่อนไปตามเวลา อันเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์มากในการทำนายพฤติกรรมการกักกร่อนเมื่อเวลาผ่านไปนานๆ

#### 4.6 การทดสอบโดยวิธี Potentiostatic

รูปแบบของการติดตั้งการทดสอบแบบ Potentiostatic แสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งประกอบด้วย ชิ้นโลหะทดสอบ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง และขั้วไฟฟ้าร่วมจุ่มลงไปในการละลายอิเล็กโทรไลต์ แล้วเชื่อมต่อเข้ากับเครื่อง Potentiostat กระแสที่ออกมาจะถูกบันทึกในรูปแบบของกราฟจากเครื่องบันทึก

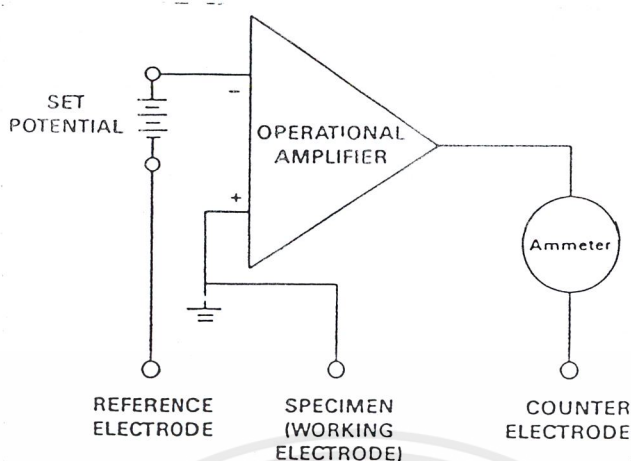


รูปที่ 4.2 การติดตั้งชุดทดลองแบบ Potentiostatic

#### 4.6.1 Potentiostat

ฟังก์ชันของเครื่อง Potentiostat จะเป็นการวัดค่าความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วโลหะทดสอบ กับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าหลายๆ ค่า เข้าไประหว่างขั้วโลหะทดสอบและขั้วไฟฟาร่วม แล้วนำมาเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้กับค่าที่ถูกปรับไว้ก่อนแล้ว สัญญาณผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะทำให้การจ่ายกระแสเข้าไปในขั้วโลหะทดสอบ เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วโลหะทดสอบเปลี่ยนไปในทิศทางที่ต้องการ แผนผังของวงจรอย่างง่ายแสดงในรูปที่ 4.3

การออกแบบ Potentiostat ที่ดีจะต้องมีค่าความต้านทานระหว่างขั้วโลหะทดสอบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิงประมาณ  $10^{12}$ - $10^{15}$  โอห์ม และจำเป็นต้องให้กระแสจากขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็นศูนย์ เพื่อป้องกันปัญหาความผิดพลาดของโพลาริเซชันที่ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง



รูปที่ 4.3 แผนผังอย่างง่ายของ Potentiostat

#### 4.6.2 ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode)

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทำจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่สามารถรักษาสภาพของศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ซึ่งใช้เป็นจุดอ้างอิงสำหรับวัดค่าศักย์ไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงส่วนใหญ่จะหุ้มด้วยแก้วเพื่อให้สามารถควบคุมสารละลายรอบๆ ขั้วได้ ตัวอย่างชนิดของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ใช้กับการทดสอบสารละลายที่อุณหภูมิห้อง ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าคาโลเมล ( $\text{Hg}/\text{HgCl}/\text{KCl}$ ) ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (silver/silver chloride electrode) และ ขั้วไฟฟ้าคอปเปอร์/คอปเปอร์ ซัลเฟต (copper/copper sulfate electrode) หากต้องการให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผ่านเข้าไปภายในแก้วที่หุ้มไว้เพื่อความเหมาะสมสำหรับการปฏิบัติงาน จึงต้องมีรูไว้เพื่อให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เกิดการผสมกันภายในขั้วไฟฟ้าอ้างอิงได้

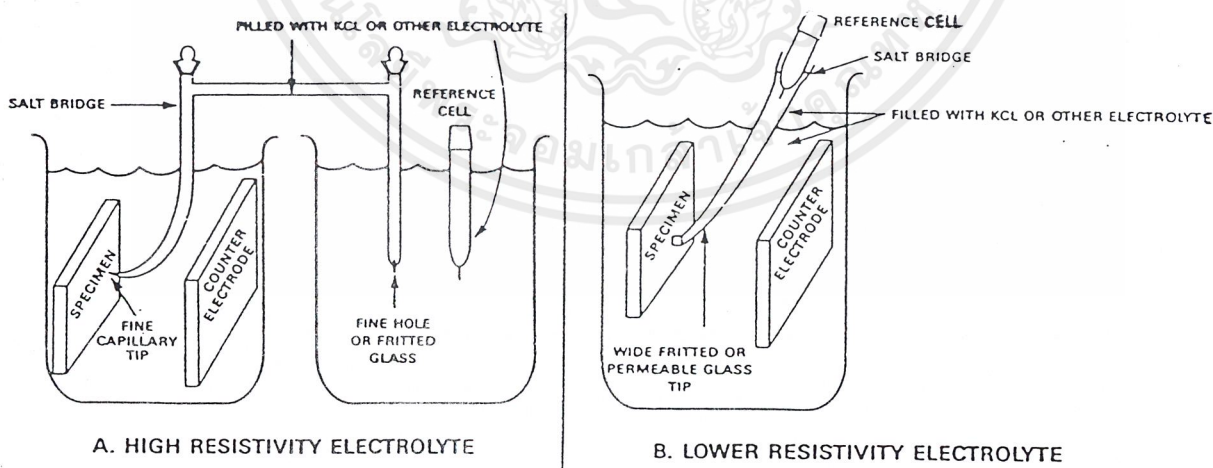
ในบางครั้งสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ทดสอบไม่บริสุทธิ์ จะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงคลาดเคลื่อนจึงต้องมีการป้องกันปัญหานี้ โดยการเลือกใช้ขั้วที่ทำจากวัสดุที่สามารถยอมให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผ่านไปได้บางส่วนเช่น Vycor ถึงแม้ว่าจะกำจัดสิ่งเจือปนออกไปได้บ้างแต่ยังต้องมีภาควัสดุซึ่งยอมให้สารละลายผ่านไปได้ด้วย ถ้าสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ทดสอบมีคุณสมบัติที่ดีและมีข้อผิดพลาดในศักย์ไฟฟ้าน้อยจึงไม่มีความสำคัญมากนัก ดังนั้นวัสดุบางชนิดสามารถนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิงโดยไม่ต้องมีแก้วครอบไว้ ตัวอย่างของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบน้ำทะเลประกอบด้วยสังกะสี และขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์/ซิลเวอร์ คลอไรด์ (silver/silver chloride electrode)

ตำแหน่งของเซลล์อ้างอิงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความต้านทาน เมื่อพิจารณาในสารละลาย กระแสระหว่างขั้วโลหะทดสอบ และขั้วไฟฟ้าร่วม เป็นสาเหตุให้ค่าศักย์ไฟฟ้าลดลงไปถึงค่าความต้านทานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตำแหน่งของเซลล์อ้างอิงที่วางห่างจาก ขั้วโลหะทดสอบ จะทำให้สามารถอ่านค่าศักย์ไฟฟ้าแตกต่างไปจากค่าศักย์ไฟฟ้าจริง

ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงสามารถวางในตำแหน่งที่ใกล้กับขั้วโลหะทดสอบมากที่สุด หรืออาจจะวางไว้ที่อีกบีกเกอร์หนึ่งซึ่งมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยมีสะพานเกลือเป็นสะพานเชื่อมระหว่างสองบีกเกอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4

#### 4.6.3 ขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter Electrode)

โครงสร้างของขั้วไฟฟ้าร่วมจะทำมาจากวัสดุที่ไม่ไวต่อปฏิกิริยา เช่น แพลทินัม หรือแกรไฟต์ แพลทินัมมีราคาแพงจึงนำไปใช้เคลือบผิว เนื่องจากแกรไฟต์มีราคาถูกจึงสามารถนำไปใช้กับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้หลายชนิด โดยจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าร่วม ในกรณีที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์มีสิ่งเจือปนมาก การเลือกใช้วัสดุของขั้วไฟฟ้าร่วม จะต้องเหมือนกับขั้วโลหะทดสอบ หรืออาจจะวางขั้วไฟฟ้าร่วมในกล่องแยกที่เชื่อมต่อเข้ากับหลอดทดลอง โดยค่าเฉลี่ยของความต้านทานของจานแก้วมีค่าน้อยหรือเป็นเชื้อที่ยอมให้สารบางชนิดผ่านเข้าออกได้



รูปที่ 4.4 การใช้จานสะพานเกลือ

#### 4.7 การทดสอบโดยวิธี Weight loss

ในการศึกษาการกัดกร่อน จะมีวิธีการวัดการกัดกร่อนของผิวของโลหะที่สัมผัสกับสถานะแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นได้หลายวิธีด้วยกัน วิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการวัด คือ การวัดปริมาณน้ำหนักของตัวอย่างที่สูญหายไปในช่วงเวลาหนึ่งหลังจากที่ได้สัมผัสกับสถานะแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนนั้น และแสดงอัตราเร็วของการกัดกร่อนในเทอมของน้ำหนักที่สูญหายไปต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของผิวสัมผัสต่อหนึ่งหน่วยเวลา ตัวอย่างเช่น การกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอของพื้นผิว มักจะแสดงในหน่วยของน้ำหนักที่สูญหายในหน่วยของมิลลิกรัมต่อตารางเดซิเมตรต่อวัน (mdd) นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่นที่นิยมใช้ คือ อัตราเร็วในการกัดกร่อน ซึ่งแสดงในเทอมของความลึกของวัสดุที่สูญหายต่อหนึ่งหน่วยเวลา เช่น มิลลิเมตรต่อปี (mm/yr) หรือ mils ต่อปี (mils/yr) ในที่นี้ 1 mil เท่ากับ 0.001 in สำหรับการกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในสารละลายนั้น อาจแสดงในเทอมของความหนาแน่นของกระแสก็ได้

#### 4.8 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)

รูปแบบของข้อมูลโดยส่วนใหญ่จะได้มาจากการทดสอบด้วยวิธี Potentiostatic ทำให้ขึ้นโลหะทดสอบมี Weight loss เกิดขึ้น และยังมีกระแสที่จ่ายกระแส ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาเข้าไป โดยปกติการทดสอบแบบ Potentiostatic นำไปสู่การกำหนดค่า Weight loss หรือค่ากระแสที่สถานะคงที่ ซึ่งสามารถนำไปใช้คำนวณหาอัตราการกัดกร่อนได้ตามสมการ

$$\text{corrosion rate } (\mu\text{m/y}) = \frac{\text{weight loss (g)} \times 3165 (\mu\text{m}\cdot\text{s}/\text{cm}\cdot\text{y})}{\text{area (cm}^2) \times \text{density (g/cm}^3) \times \text{time (s)}}$$

$$\text{weight loss (g)} = \text{current (C/s)} \cdot \text{time (s)} \cdot \text{equivalent weight (g/C)}$$

Weight loss สามารถคำนวณได้จากกระแสที่ถูกต้องเท่านั้น เมื่อขึ้นโลหะทดสอบ มีค่าศักย์ไฟฟ้าอย่างน้อย 60 ถึง 100 มิลลิโวลต์ รวมกับค่าการกัดกร่อนอย่างอิสระภายใต้สถานะที่เกิดกระแสขึ้น โดยที่ปฏิกิริยาแคโทดิกมีผลน้อยมาก

## บทที่ 5

### การทดลอง

#### 5.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

การทดสอบการกัดกร่อนโดยวิธี Potentiostat และวิธี Weight loss จะต้องใช้อุปกรณ์และสารเคมีในการทดลองดังนี้

- เครื่อง Potentiostat 1 ชุด ประกอบไปด้วยตัวเครื่อง Potentiostat Three - electrode cell และเครื่องวาดกราฟ
- ขวดสีชา 18 ขวด
- ขวดวัดปริมาตร 1000 มล. 1 ขวด
- กระจกตวงขนาด 10 กับ 100 มล. อย่างละ 1 ขวด
- หลอดหยด 1 หลอด
- บีเป็ดขนาด 10 มล.
- ขวดลูกชมพู่และจุกยาง 2 ชุด
- ขวดหยดสาร 1 ขวด
- บีกเกอร์ขนาด 50 กับ 250 มล. อย่างละ 1 ขวด
- กระดาษทราย
- เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)
- แผ่นพาราฟิล์ม
- กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl)
- กรดซัลฟูริกเข้มข้น ( $H_2SO_4$ )
- กรดไนตริกเข้มข้น ( $HNO_3$ )
- ไพริดีน ( $C_5H_5N$ )
- ไตรโซเดียมอโรฟอสเฟต ( $Na_3PO_4$ )
- แท่งดีบุก

## 5.2 ขั้นตอนการทดลอง

การทดสอบการกัดกร่อนของดีบุกในที่นี้แบ่งออกเป็น 2 วิธีใหญ่ๆ คือ วิธี Potentiostat และวิธี Weight loss ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

### 5.2.1 การทดสอบการกัดกร่อนโดยวิธี Potentiostat มีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1N ของ HCl HNO<sub>3</sub> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ให้มีปริมาตรอย่างละ 1000 มล.
2. เตรียมสารละลาย tri – Sodium orthophosphate (Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) เข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตร
3. เตรียมแท่งดีบุกที่มีขนาด กว้าง 2 ซม. ยาว 5 ซม. และหนา 0.5 ซม.
4. นำแท่งดีบุกไปขัดด้วยกระดาษทราย แล้วนำไปต้มในสารละลาย Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ที่เดือด เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดคราบไขมันและคราบออกไซด์ต่างๆ จากนั้นนำมาเช็ดให้แห้ง
5. เปิดเครื่อง Potentiostat และเครื่องวาดกราฟ
6. นำแท่งดีบุกมาประกอบเข้ากับ Three - electrode cell โดยให้มีพื้นที่ผิวของดีบุก ซึ่งสัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 1 ตารางเซนติเมตร
7. เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 250 cm<sup>3</sup> ลงไปใน Three - electrode cell ให้ท่วมพื้นที่ผิวของแผ่นดีบุก
8. ต่อขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) และขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) เข้ากับ Three - electrode Cell
9. ปรับ Cell switch ให้เลื่อนจากตำแหน่ง “dummy” ไปเป็น ตำแหน่ง “external” เพื่อทำการรับค่ากระแสจาก Three – electrode Cell
10. รอให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ( $E_0$ ) บันทึกค่า  $E_0$  และ  $I_0$
11. ปรับค่า E/I 1 และ E/I 2 เพื่อให้เครื่องทำการเพิ่มศักย์ไฟฟ้า ให้ครอบคลุมค่า  $E_0$
12. ปรับ Scan rate เพื่อกำหนดจำนวนข้อมูลที่ต้องการ
13. ปรับ Delay เพื่อทำการปรับตั้งค่าเครื่องวาดกราฟให้เหมาะสม
14. กดปุ่ม Start เครื่อง พร้อมทั้งปรับ Scale ของเครื่องวาดกราฟให้เหมาะสม เพื่อให้สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของกราฟ ในช่วงที่กราฟเปลี่ยนความชันได้อย่างชัดเจน
15. ทำการปรับเครื่องตั้งแต่ ข้อ 11. จนกระทั่งเห็นกราฟเริ่มเปลี่ยนความชันเป็นครั้งแรก

16. บันทึกเส้นกราฟลงในกระดาษกราฟ

17. ปรับ Cell switch ให้เลื่อนจากตำแหน่ง “external” ไปเป็น ตำแหน่ง “dummy”

18. เติม Pyridine ที่มีความเข้มข้น 200 400 600, 800 และ 1000 ppm ลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แล้วเริ่มทำการทดลองใหม่ตั้งแต่ข้อ 9

### 5.2.2 การทดสอบการกัดกร่อนโดยวิธี Weight loss มีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1N ของ HCl HNO<sub>3</sub> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ให้มีปริมาตรอย่างละ 1000 มล. ใส่ลงในขวดสีชาขนาด 1 ลิตร จำนวน 9 ขวด ดังนี้

ชุดที่ 1 ใช้สารละลายกรด HCl โดยที่ ชุดที่ 1 ไม่เติม pyridine ส่วนชุดที่ 2 ถึง 9 เติม pyridine ขวดละ 1 2 3 4 6 8 10 และ 20 หยด ตามลำดับ

ชุดที่ 2 และ 3 เตรียมสารละลายเหมือนกับชุดที่ 1 เพียงแต่เปลี่ยนจากสารละลายกรด HCl เป็นสารละลายกรด HNO<sub>3</sub> และ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ตามลำดับ

2. เตรียมสารละลาย tri – Sodium orthophosphate (Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) เข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ต่อปริมาตร

3. เตรียมแผ่นดีบุก 80 เปอร์เซ็นต์ ที่มีขนาด กว้าง 1.5 นิ้ว ยาว 2.5 นิ้ว และหนา 0.2 มม.

4. นำแผ่นดีบุกไปขัดด้วยกระดาษทราย แล้วนำไปต้มในสารละลาย Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> ที่เดือด เป็นเวลา 10 นาที แล้วนำมาเช็ดให้แห้ง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก จดบันทึกค่าแต่ละแผ่น

5. นำแผ่นดีบุกแช่ลงในสารละลายแต่ละขวดที่เตรียมไว้ ทิ้งไว้เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

6. เมื่อครบเวลาตามกำหนด นำแผ่นดีบุกมาทำความสะอาด โดยใช้แปรงล้างผ่านน้ำ เพื่อกำจัดสารที่เกิดจากการกัดกร่อน แล้วนำมาเช็ดให้แห้ง นำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง จดบันทึกค่าแต่ละแผ่น

## บทที่ 6

### ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

#### 6.1 ผลการทดลองการทดสอบการกัดกร่อนโดยวิธี Potentiostat

6.1.1 ผลการทดลองการกัดกร่อนของดีบุก ก่อนและหลังเติม Pyridine ที่ความเข้มข้น 0 200 400 600 800 และ 1000 ppm ในสารละลายกรด HCl ที่ความเข้มข้น 0.1 N โดยการทดสอบด้วยเครื่อง Potentiostat ทำการทดลอง 3 ครั้ง ได้ผลเป็นค่าเฉลี่ยตามตารางที่ 6.1 ดังนี้

ตารางที่ 6.1 ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองการกัดกร่อนของดีบุกใน 0.1 N HCl เมื่อเติม Pyridine ที่ความเข้มข้น 0 200 400 600 800 และ 1000 ppm โดยวิธี Potentiostat

ความเข้มข้น ของ Pyridine (ppm)	ค่าเฉลี่ย			
	$E_0$ (V)	$j_0$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$j_{min}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$j_{max}$ (mA/cm <sup>2</sup> )
0	-0.396	-0.1	0	-14.3
200	-0.371	-0.1	0	-13.6
400	-0.349	-0.1	0	-12.8
600	-0.360	-0.1	0	-12.3
800	-0.354	-0.1	0	-12.6
1000	-0.350	-0.1	0	-11.6

6.1.2 ผลการทดลองการกัดกร่อนของดีบุก ก่อนและหลังเติม Pyridine ที่ความเข้มข้น 2000 4000 และ 6000 ppm ในสารละลายกรด HCl H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และ HNO<sub>3</sub> ที่ความเข้มข้น 0.1 N โดยการทดสอบด้วยเครื่อง Potentiostat ได้ผลการทดลองตามตารางที่ 6.2 ดังนี้

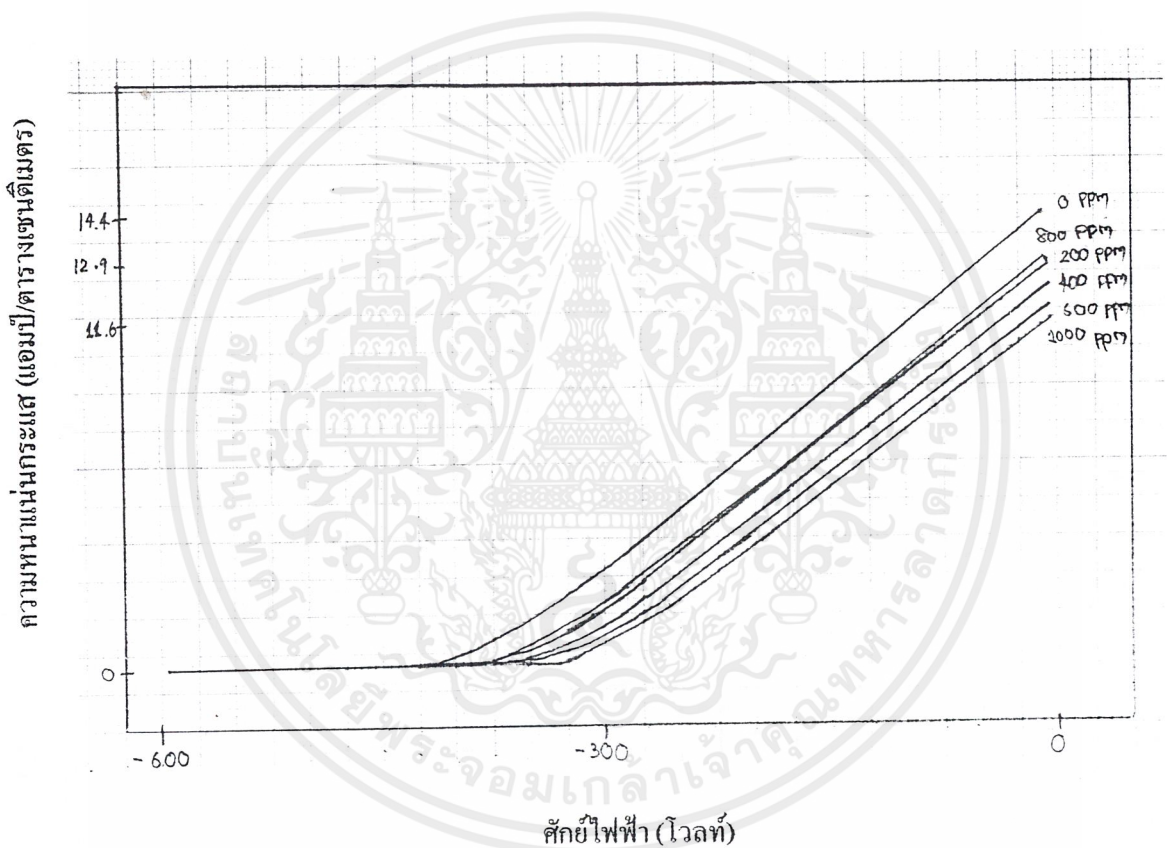
ตารางที่ 6.2 ผลการทดลองการกัดกร่อนของดีบุกในสารละลายกรด HCl H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และ HNO<sub>3</sub> ที่ความเข้มข้น 0.1 N เมื่อเติม Pyridine ที่ ความเข้มข้น 0 2000 4000 และ 6000 ppm โดยวิธี Potentiostat

ความเข้มข้น ของ Pyridine (ppm)	HCl				H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			
	E <sub>0</sub> (V)	j <sub>0</sub> (mA/ cm <sup>2</sup> )	j <sub>min</sub> (mA/ cm <sup>2</sup> )	j <sub>max</sub> (mA/ cm <sup>2</sup> )	E <sub>0</sub> (V)	j <sub>0</sub> (mA/ cm <sup>2</sup> )	j <sub>min</sub> (mA/ cm <sup>2</sup> )	j <sub>max</sub> (mA/ cm <sup>2</sup> )
0	-0.417	-0.1	0.9	-15.5	-0.434	-0.1	0	-17.8
2000	-0.342	-0.1	0.4	-12.0	-0.384	-0.1	0	-13.4
4000	-0.322	-0.1	0.5	-10.7	-0.370	-0.1	0	-12.6
6000	-0.345	-0.1	0.1	-10.2	-0.271	-0.1	0	-10.2

ความเข้มข้น ของ Pyridine (ppm)	HNO <sub>3</sub>			
	E <sub>0</sub> (V)	j <sub>0</sub> (mA/ cm <sup>2</sup> )	j <sub>min</sub> (mA/ cm <sup>2</sup> )	j <sub>max</sub> (mA/ cm <sup>2</sup> )
0	-0.285	-0.1	1.2	-8.3
2000	-0.275	-0.1	1.6	-8.6
4000	-0.270	-0.1	1.6	-11.2
6000	-0.230	-0.1	1.1	-6.0

จากผลการทดลองการกักตัวของดีบุก ก่อนและหลังเติม Pyridine ที่ความเข้มข้น 0 200 400 600 800 และ 1000 ppm ในสารละลายกรด HCl ที่ความเข้มข้น 0.1 N โดยการทดสอบด้วยเครื่อง Potentiostatic สามารถแสดงผลในรูปของกราฟดังรูปที่ 6.1

รูปที่ 6.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current density และ Potential ของการถูกกักตัวของดีบุกในสารละลายกรด HCl ความเข้มข้น 0.1 N ก่อนและหลังเติม Pyridine ที่ความเข้มข้น 0 200 400 600 800 และ 1000 ppm โดยการทดสอบด้วยเครื่อง Potentiostat



## 6.2 ผลการทดลองทดสอบการกัดกร่อนโดยวิธี Weight loss

6.2.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Pyridine ที่ความเข้มข้น 0 200 400 600 800 1200 1600 2000 และ 4000 ppm ในสารละลายกรด HCl ที่ความเข้มข้น 0.1 N โดยวิธี Weight loss ทำการเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง แสดงผลดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Pyridine ที่ความเข้มข้นต่างๆ ใน 0.1 N HCl

ความเข้มข้น ของ Pyridine (ppm)	น้ำหนักเฉลี่ยของแผ่นดิบูก (g)		น้ำหนักที่สูญ หายไป (g)
	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง	
0	2.5347	2.5179	0.0168
200	2.6188	2.6066	0.0122
400	2.5462	2.5341	0.0121
600	2.5116	2.4999	0.0116
800	2.4253	2.4142	0.0111
1200	2.4064	2.3993	0.0071
1600	2.3901	2.3857	0.0044
2000	2.4323	2.4292	0.0031
4000	2.4371	2.4361	0.0010

6.2.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Pyridine ที่ความเข้มข้น 0 200 400 600 800 1200 1600 2000 และ 4000 ppm ในสารละลายกรด  $H_2SO_4$  ที่ความเข้มข้น 0.1 N โดยวิธี Weight loss ทำการเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง แสดงผลดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Pyridine ที่ความเข้มข้นต่างๆ ใน 0.1 N  $H_2SO_4$

ความเข้มข้น ของ Pyridine (ppm)	น้ำหนักของแผ่นดีบุก (g)		น้ำหนักที่สูญ หายไป (g)
	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง	
0	2.5777	2.5206	0.0571
200	2.5384	2.5243	0.0141
400	2.4551	2.4379	0.0172
600	2.4563	2.4409	0.0154
800	2.3933	2.3773	0.0160
1200	2.4813	2.4698	0.0114
1600	2.4642	2.4470	0.0172
2000	2.4829	2.4680	0.0149
4000	2.4744	2.4569	0.0175

6.2.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Pyridine ที่ความเข้มข้น 0 200 400 600 800 1200 1600 2000 และ 4000 ppm ในสารละลายกรด  $\text{HNO}_3$  ที่ความเข้มข้น 0.1 N โดยวิธี Weight loss ทำการเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง แสดงผลดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพของ Pyridine ที่ความเข้มข้นต่างๆ ใน 0.1 N  $\text{HNO}_3$

ความเข้มข้น ของ Pyridine (ppm)	น้ำหนักเฉลี่ยของแผ่นดีบุก (g)		น้ำหนักที่สูญ หายไป (g)
	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง	
0	2.4945	2.2441	0.2504
200	2.5348	2.3291	0.2057
400	2.5034	2.3075	0.1958
600	2.5187	2.3670	0.1517
800	2.4827	2.3788	0.1040
1200	2.5057	2.3819	0.1238
1600	2.6045	2.4416	0.1629
2000	2.5163	2.3815	0.1348
4000	2.5713	2.4508	0.1205

### 6.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

6.3.1 น้ำหนักที่สูญหายไปหาได้จากการนำน้ำหนักของซึนทดสอบก่อนการทดลองลบด้วยซึนทดสอบหลังการทดลอง

$$W_L = W_i - W_f \quad \dots\dots\dots(6.1)$$

โดย  $W_L$  คือ น้ำหนักที่สูญหายไป

$W_i$  คือ น้ำหนักของซึนทดสอบก่อนทำการทดลอง

$W_f$  คือ น้ำหนักของซึนทดสอบหลังทำการทดลอง

ตัวอย่าง น้ำหนักของซึนงานก่อนทำการทดสอบคือ 2.5887 กรัม

น้ำหนักของซึนงานหลังการทดสอบ คือ 2.5720 กรัม

ดังนั้น น้ำหนักที่สูญหายไปคือ  $2.5887 - 2.5720 = 0.0167$  กรัม

หลังจากนั้นนำน้ำหนักที่สูญหายไป (Weight loss) ของซึนดินุกทดสอบทั้ง 3 ครั้งมาหาค่าเฉลี่ยในแต่ละความเข้มข้นของ Pyridine ได้ผลการคำนวณทั้ง 3 ครั้ง ดังตารางที่ 6.3 ถึง 6.5

6.3.2 การคำนวณประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกักกร่อน (จากวิธี Weight loss)

$$\%Eff = (1 - X_2/X_1) * 100 \quad \dots\dots\dots(6.2)$$

$\%Eff$  คือ ประสิทธิภาพของสารยับยั้งที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์

$X_1$  คือ น้ำหนักที่สูญหายไปในขณะที่ไม่มีสารยับยั้ง

$X_2$  คือ น้ำหนักที่สูญหายไปในขณะที่มีสารยับยั้ง

ตัวอย่าง เมื่อไม่มีสารยับยั้ง น้ำหนักที่สูญหายไปคือ 0.0126 กรัม

และในขวดที่ 1 ซึ่งมี Pyridine เป็นสารยับยั้งเข้มข้น 200 ppm

ดังนั้น น้ำหนักที่สูญหายไปคือ 0.0091

จะคำนวณประสิทธิภาพของสารยับยั้งได้ ดังนี้

$$\%Eff = (1 - 0.0091/0.0126) * 100 = 27.44\%$$

## 6.3.3 การคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน (จากวิธี Weight loss)

$$\text{Corrosion rate (mpy)} = 534W/DAT \dots\dots\dots(6.3)$$

โดย W = น้ำหนักที่สูญหายไป (Weight loss, mg)

D = ความหนาแน่นของชิ้นทดสอบ ( $\text{g/cm}^3$ )

A = พื้นที่ผิวของชิ้นทดสอบ ( $\text{in.}^2$ )

T = เวลาในการทำการทดสอบ (hr)

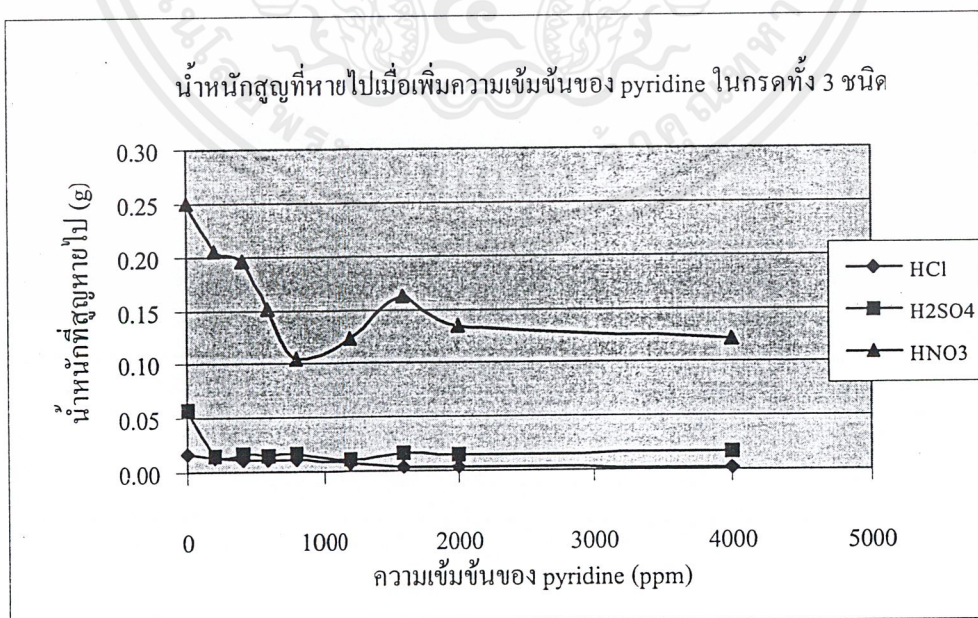
ตารางที่ 6.6 แสดงประสิทธิภาพของ Pyridine ที่ความเข้มข้นต่างๆ ใน 0.1 N HCl H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> HNO<sub>3</sub>

ความเข้มข้น ของ Pyridine (ppm)	% Efficiency (HCl)	% Efficiency (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	% Efficiency (HNO <sub>3</sub> )
0	0.00	0.00	0.00
200	27.44	75.31	17.85
400	28.03	69.82	21.79
600	30.62	73.09	39.42
800	34.00	72.04	58.48
1200	57.85	79.98	50.55
1600	73.56	69.94	34.96
2000	81.71	73.85	46.17
4000	93.84	69.29	51.88

ตารางที่ 6.7 ผลการคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนจากวิธี Weight loss ของกรด HCl H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และ HNO<sub>3</sub> ที่มีความเข้มข้น 0.1 N

ความเข้มข้นของ Pyridine (ppm)	อัตราการกัดกร่อนใน HCl (mpy)	อัตราการกัดกร่อนใน H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (mpy)	อัตราการกัดกร่อนใน HNO <sub>3</sub> (mpy)
0	1.7011	5.7933	25.4054
200	1.2344	1.4306	20.8702
400	1.2243	1.7485	19.8691
600	1.1803	1.5591	15.3914
800	1.1228	1.6200	10.5484
1200	0.7170	1.1600	12.5640
1600	0.4498	1.7417	16.5243
2000	0.3111	1.5151	13.6767
4000	0.1048	1.7789	12.2258

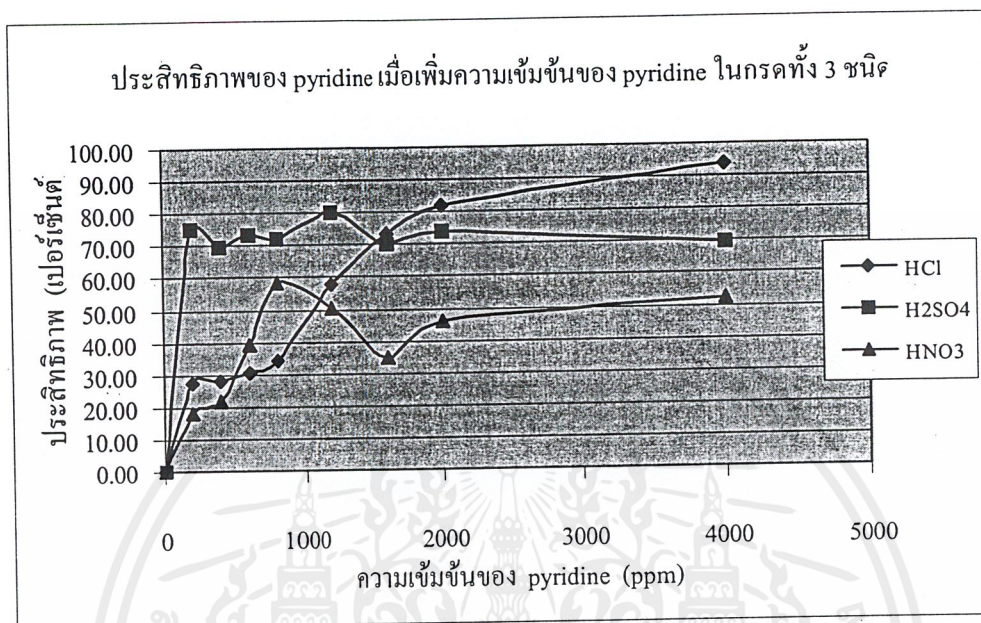
รูปที่ 6.2 กราฟแสดงน้ำหนักที่สูญหายไปเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Pyridine ในกรดทั้ง 3 ชนิด



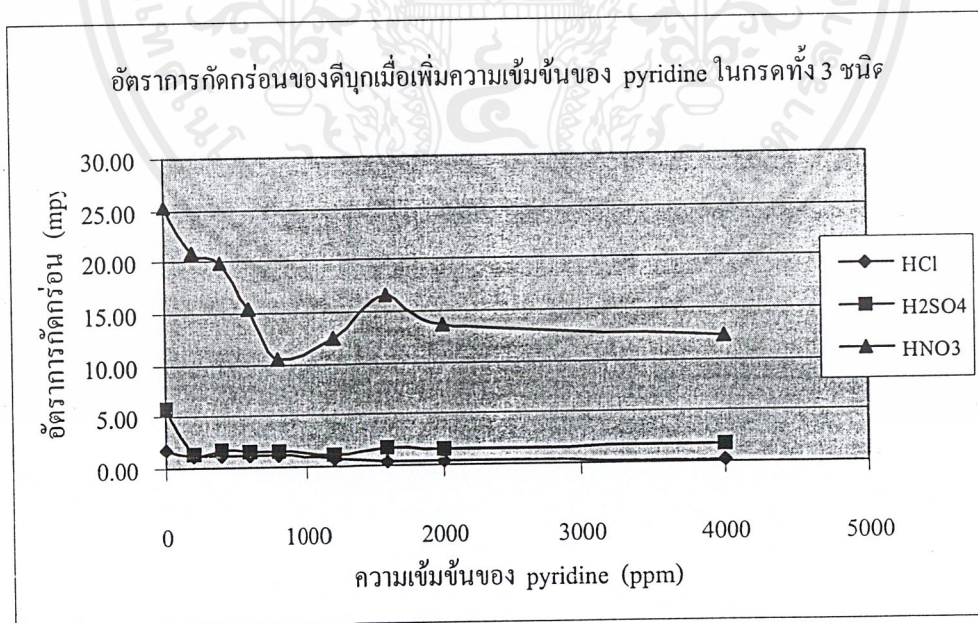
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.3 กราฟแสดงประสิทธิภาพของ Pyridine ที่ความเข้มข้นต่างๆกัน ในกรดทั้ง 3 ชนิด

ชนิด



รูปที่ 6.4 กราฟแสดงอัตราการกัดกร่อนเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Pyridine ในกรดทั้ง 3 ชนิด



## 6.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบการกัดกร่อนโดยวิธี Potentiostat พบว่า

- 6.4.1 เมื่อพิจารณาจากค่า  $E_0$  ก่อนและหลังเติม Pyridine พบว่า ค่า  $E_0$  มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่า ดีบุกมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของ Pyridine ที่เติมลงไป
- 6.4.2 เมื่อพิจารณาจากกราฟในช่วงที่กราฟเปลี่ยนความชัน พบว่า หลังจากฟิล์มป้องกันของดีบุกถูกทำลายแล้ว ดีบุกยังมีความยืดหยุ่นที่ทนต่อการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย
- 6.4.3 เมื่อพิจารณาจากความชันของกราฟพบว่า หลังจากที่ดีบุกเริ่มมีการกัดกร่อน ความชันของกราฟมีแนวโน้มลดลง และค่า  $j_{max}$  ลดลง แสดงว่า หลังจากที่ดีบุกเริ่มถูกกัดกร่อนแล้ว อัตราการกัดกร่อนหลังเติม Pyridine ลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก และกรดไนตริก ที่มีความเข้มข้น 0.1 N ลดลง
- 6.4.4 สำหรับกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟูริก เมื่อสังเกตจากรูปที่ 6.1 (กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Current density และ Potentiostat) พบว่า Pyridine จะช่วยป้องกันการกัดกร่อนได้อย่างชัดเจน แต่สำหรับกรดไนตริก พบว่า แนวโน้มในการป้องกันการกัดกร่อนยังไม่ชัดเจนเท่าที่ควร
- 6.4.5 เมื่อสังเกตจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของ Pyridine กับความเข้มข้นของ Pyridine ที่ความเข้มข้นสูง ๆ เช่น 4000 และ 6000 ppm พบว่า ประสิทธิภาพของ Pyridine มีแนวโน้มที่ดีขึ้น

จากการทดสอบการกัดกร่อนโดยวิธี Weight loss พบว่า

- 6.4.6 อัตราการกัดกร่อนของดีบุกจะลดลงเมื่อเติม Pyridine ลงไปในสารละลายกรด โดยเฉพาะในกรดไฮโดรคลอริก อัตราการกัดกร่อนจะลดลงค่อนข้างมาก คือ ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับ กรดซัลฟูริก และกรดไนตริก

## 6.5 วิจารณ์ผลการทดลอง

- 6.5.1 ในการทดลองยังมีตัวแปรหลายตัวที่ควบคุมได้ไม่ดี เช่น พื้นที่ผิวของชั้นดินปลูกทดสอบ และที่สำคัญคือ ปริมาณเกลือที่เป็นผลจากการกักกรองน ทำให้น้ำหนักของชั้นดินปลูกทดสอบที่ได้มีค่าที่ไม่แน่นอน
- 6.5.2 ดินุกออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวของชั้นดินปลูกทดสอบ สามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา มีผลทำให้ความหนาแน่นกระแสดลาดเคลื่อนไป
- 6.5.3 จากกราฟแสดงประสิทธิภาพของ Pyridine จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพที่คำนวณได้มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลง อาจเป็นเพราะผลของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายกรด ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ Pyridine ในปริมาณที่ไม่อาจคาดคิดได้ จึงเหลือ Pyridine เพียงบางส่วนถูกดูดซับที่ผิวของดินุก



## เอกสารอ้างอิง

1. กัญญา ตระกูล เทคโนโลยีการกัดกร่อน พิมพ์ครั้งที่ 2 ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็กซ์เพรส มีเดีย 2534
2. Fontana, M. G., Corrosion Engineering. Third Edition, McGraw-Hill, New York, 1988.
3. Smith, William F., Principles of Materials Science and Engineering. Third Edition, McGraw-Hill, New York, 1996.
4. Revie, R. W., Uhlig's Corrosion Handbook. Second Edition, John Wiley & Sons, New York, 2000.
5. Suzuki, I., Corrosion-Resistant Coating Technology, Marcel Dekker Incorporation, New York, 1989.
6. Trethewey, K. R., and Chamberlain, J., Corrosion for Science and Engineering. Second Edition, Longman Scientific & Technology, Singapore, 1995.
7. Uhlig, H. H., Corrosion and Corrosion Control. Second Edition, John Wiley & Sons, New York, 1971.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

*Corrosion inhibitor reference list*

Metal	Environment	Inhibitor
Admiralty	Ammonia, 5%	0.5% hydrofluoric acid
Admiralty	Sodium hydroxide, 4° Be	0.6 moles H <sub>2</sub> S per mole NaOH
Aluminium	Acid hydrochloric, 1N	0.003M $\alpha$ phenylacridine, $\beta$ naphthoquinone, acridine, thiourea or 2-phenylquinoline
Aluminium	Acid nitric, 2-5%	0.05% hexamethylene tetramine
Aluminium	Acid nitric, 10%	0.1% hexamethylene tetramine
Aluminium	Acid nitric, 10%	0.1% alkali chromate
Aluminium	Acid nitric, 20%	0.5 hexamethylene tetramine
Aluminium	Acid phosphoric	Alkali chromates
Aluminium	Acid phosphoric, 20%	0.5% sodium chromate
Aluminium	Acid phosphoric, 20-80%	1.0% sodium chromate
Aluminium	Acid sulphuric, conc.	5.0% sodium chromate
Aluminium	Alcohol anti-freeze	Sodium nitrite and sodium molybdate
Aluminium	Bromine water	Sodium silicate
Aluminium	Bromoform	Amines
Aluminium	Carbon tetrachloride	0.05% formamide
Aluminium	Chlorinated aromatics	0.1-2.0% nitrochlorobenzene
Aluminium	Chlorine water	Sodium silicate
Aluminium	Calcium chloride, sat	Alkali silicates
Aluminium	Ethanol, hot	Potassium dichromate
Aluminium	Ethanol, commercial	0.03% alkali carbonates, lactates, acetates or borates
Aluminium	Ethylene glycol	Sodium tungstate or sodium molybdate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*Corrosion inhibitor reference list (continued)*

Metal	Environment	Inhibitor
Aluminium	Ethylene glycol	Alkali borates and phosphates
Aluminium	Ethylene glycol	0.01-1.0% sodium nitrate
Aluminium	Hydrogen peroxide, alkali	Sodium silicate
Aluminium	Hydrogen peroxide	Alkali metal nitrates
Aluminium	Hydrogen peroxide	Sodium metasilicate
Aluminium	Methyl alcohol	Sodium chlorate plus sodium nitrite
Aluminium	Methyl chloride	Water
Aluminium	Polyoxyalkene glycol fluids	2% Emery's dimmer acid (dilinoleic acid), 1.25% N(CHMe <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> , 0.05-0.2% mercaptobenzothiazole
Aluminium	Seawater	0.75% sec. Amyl stearate
Aluminium	Sodium carbonate, dilute	Sodium fluosilicate
Aluminium	Sodium hydroxide, 1%	Alkali silicates
Aluminium	Sodium hydroxide, 1%	3-4% potassium permanganate
Aluminium	Sodium hydroxide, 4%	18% glucose
Aluminium	Sodium hypochlorite contained in bleaches	Sodium silicate
Aluminium	Sodium acetate	Alkali silicates
Aluminium	Sodium chloride, 3.5%	1% sodium chromate
Aluminium	Sodium carbonate, 1%	0.2% sodium silicate
Aluminium	Sodium carbonate, 10%	0.05% sodium silicate
Aluminium	Sodium sulfide	Sulfur
Aluminium	Sodium sulfide	1% sodium metasilicate

*Corrosion inhibitor reference list (continued)*

Metal	Environment	Inhibitor
Aluminium	50% sodium trichloroacetate soln.	0.5% sodium dichromate
Aluminium	Tetrahydrofurfuryl alcohol	1% sodium nitrate or 0.3% sodium chromate
Aluminium	Trithanoamine	1% sodium metasilicate
Brass	Carbon tetrachloride, wet	0.001-0.1 aniline
Brass	Furfural	0.1% mercaptobenzothiazole
Brass	Polyoxyalkene glycol fluids	2.0% Emery's acid (dilinoleic acid), 1.25% N(CHMe <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> , 0.05-0.2% mercaptobenzothiazole
Brass	50% sodium trichloroacetate soln.	0.5% sodium dichromate
Cadium plated steel	55/45 ethylene glycol-water	1% sodium fluorophosphates
Copper	Fatty acids as acetic	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , (COOH) <sub>2</sub> or H <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>
Copper	Hydrocarbons containing sulfur	P-hydroxybenzophenone
Copper	Polyoxyalkene glycol fluids	2% Emery's acid (dilinoleic acid), 1.25% N(CHMe <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> , 0.05-0.2% mercaptobenzothiazole
Copper & brass	Acid sulfuric, dil	Benzyl thiocyanate
Copper & brass	Ethylene glycol	Alkali borates & phosphates

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*Corrosion inhibitor reference list (continued)*

Metal	Environment	Inhibitor
Copper & brass	Polyhydric alcohol anti-freeze	0.4-1.6% Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> plus 0.3-0.6 sodium silicate plus 0.2-0.6% sodium mercaptobenzothiazole
Copper & brass	Rapeseed soil	Succinic acid
Copper & brass	Sulfur in benzene solution	0.2% 9,10 anthraquinone
Copper & brass	Tetrahydrofurfuryl alcohol	1% sodium nitrate or 0.3% sodium chromate
Copper & brass	Water-alcohol	0.25% benzoic acid, or 0.25% sodium benzoate at a pH of 7.5-10
Galvanized iron	Distilled water	15 ppm. mixture calcium and zinc metaphosphate
Galvanized iron	55/45 ethylene glycol-water	0.025% trisodium phosphate
Iron	Nitroarylamines	Dibenzylaniline
Lead	Carbon tetrachloride, wet	0.001-0.1% aniline
Magnesium	Alcohol	Alkaline metal sulfides
Magnesium	Alcohol, methyl	1% oleic or stearic acid neutralized with ammonia
Magnesium	Alcohols, polyhydric	Soluble fluorides at pH 8-10
Magnesium	Glycerine	Alkaline metal sulfides
Magnesium	Glycol	Alkaline metal sulfides
Magnesium	Trichloroethylene	0.05% formamide
Magnesium	Water	1% potassium dichromate
Monel	Carbon tetrachloride, wet	0.001-0.1% aniline
Monel	Sodium chloride, 0.1%	0.1% sodium nitrite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*Corrosion inhibitor reference list (continued)*

Metal	Environment	Inhibitor
Monel	Tap water	0.1% sodium nitrite
Nickel & silver	Sodium hypochloride contained in bleaches	Sodium silicate
Stainless steel	Acid sulfuric, 2.5%	5-20 ppm. $\text{CaSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Stainless steel	Cyanamide	50-500 ppm. ammonium phosphate
Stainless steel, 18-8	Potassium permanganate contained in bleaches	Sodium silicate
Stainless steel, 18-8	Sodium chloride, 4%	0.8% sodium hydroxide
Steel	Acid citric	Cadmium salts
Steel	Acid sulfuric, dil	Aromatic amines
Steel	Acid sulfuric, 60-70%	Arsenic
Steel	Acid sulfuric, 80%	2% boron trifluoride
Steel	Aluminium chloride- hydrocarbon complexes formed during isomerization	0.2-2.0% iodine, hydriodic acid or hydrocarbon iodide
Steel	Ammoniacal ammonium nitrate	0.2% thiourea
Steel	Ammonium nitrate-urea solns.	0.05-0.10% ammonia 0.1% ammonium thiocyanate
Steel	Brine containing oxygen	0.001-3.0 methyl, ethyl or propyl substituted dithiocarbamates
Steel	Carbon tetrachloride, wet	0.001-0.1% aniline

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*Corrosion inhibitor reference list (continued)*

Metal	Environment	Inhibitor
Steel	Caustic-cresylate solution as in regeneration of refinery caustic wash solutions, 240-260F	0.1-1.0% trisodium phosphate
Steel	Ethyl alcohol, aqueous or pure	0.03% ethylamine or diethylamine
Steel	55-45 ethylene glycol-water	0.025% trisodium phosphate
Steel	Ethylene glycol	Alkali borates & phosphates
Steel	Ethylene glycol	Guanidine or guanidine carbonate
Steel	Ethylene alcohol, 70%	0.15% ammonium carbonate plus 1% ammonium hydroxide
Steel	Furfural	0.1% mercaptobenzothiazole
Steel	Halogenated dielectric fluids	0.05-4% ( $\gamma$ C <sub>4</sub> H <sub>3</sub> S) <sub>4</sub> Sn $\gamma$ (C <sub>4</sub> H <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Sn or $\gamma$ C <sub>4</sub> H <sub>3</sub> S SnPh <sub>3</sub>
Steel	Halogenated organic insulating materials as chlorinated diphenyl	0.1% 2, 4(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> NHPh, <i>o</i> -MeH <sub>4</sub> NH <sub>2</sub> or <i>p</i> -NO <sub>2</sub> C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> NH <sub>2</sub>
Steel	Herbicides as 2, 4 dinitro- 6-alkyl phenols in aromatic oils	1.0-1.5% furfural
Steel	Isopropanol, 30%	0.03% sodium nitrite plus 0.015% oleic acid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*Corrosion inhibitor reference list (continued)*

Metal	Environment	Inhibitor
Steel	1:4 methanol-water	To 4 l. water and 1 l. methanol add 1 g. pyridine and 0.05 g. pyragalol
Steel	Nitrogen fertilizer solution	0.1% ammonium thiocyanate
Steel	Phosphoric acid, conc.	0.01-0.5% dodecylamine or 2 amino bicyclohexyl and 0.001% potassium-iodide, potassium iodate or iodacetic acid
Steel	Polyoxyalkene glycol fluids	2% Emery's acid (dilinoic acid) 1.25% N(CHMe <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> 0.05-0.2% mercaptobenzothiazole
Steel	Sodium chloride, 0.05%	0.2% sodium nitrite
Steel	50% sodium trichloracetate soln.	0.5% sodium dichromate
Steel	Sulfide containing brine	Formaldehyde
Steel	Tetrahydrofurfuryl alcohol	1% sodium nitrite or 0.3% sodium chromate
Steel	Water	Benzoic acid
Steel	Water for flooding operations	Rosin amine
Steel	Water saturated hydrocarbons	Sodium nitrite
Steel	Water, distilled	Aerosol (an ionic wetting agent)
Tin	Carbon tetrachloride, wet	0.001-0.1% aniline

*Corrosion inhibitor reference list (continued)*

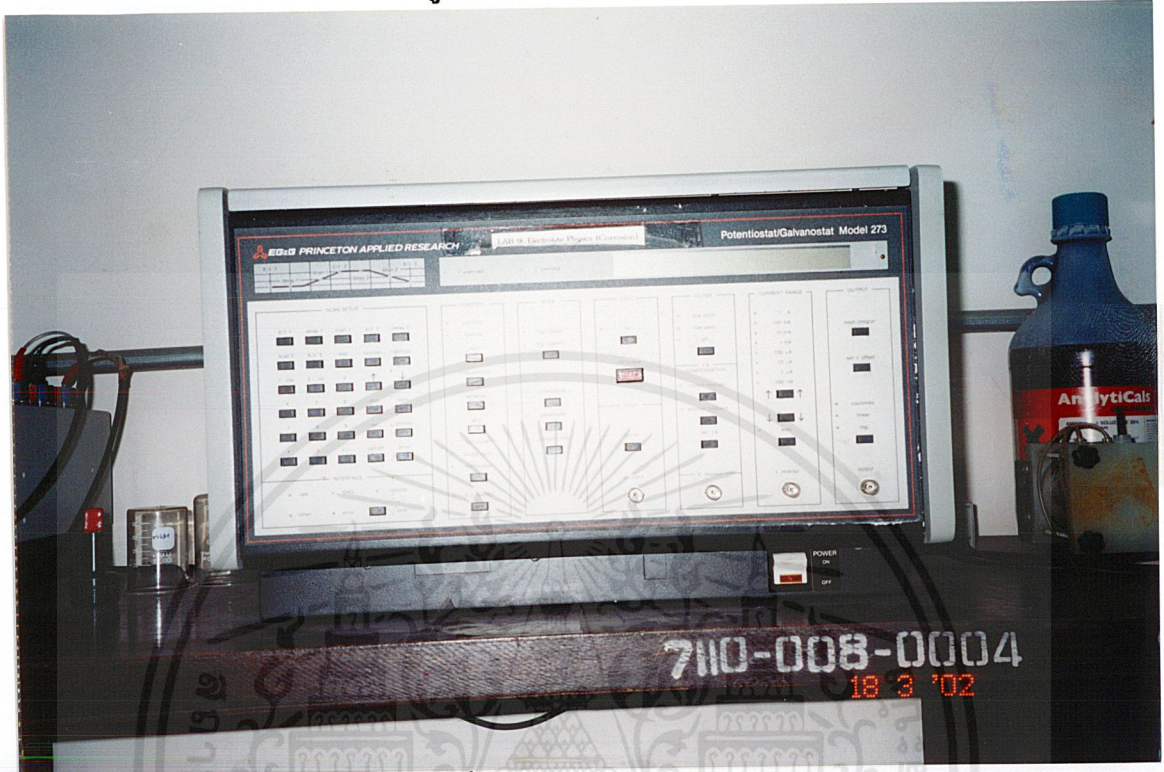
Metal	Environment	Inhibitor
Tin	Chlorinated aromatics	0.1-2.0% nitrochlorobenzene
Tinned copper	Sodium hypochlorite contained bleaches	Sodium silicate
Tin plate	Alkali cleaning agents as trisodium phosphate, sodium carbonate, etc.	Diethylene diaminocobaltic nitrate
Tin plate	Alkaline soap	0.1% sodium nitrite
Tin plate	Carbon tetrachloride	2% mesityl oxide, 0.001% diphenylamine
Tin plate	Sodium chloride, 0.05%	0.2% sodium nitrite
Titanium	Hydrochloric acid	Oxidizing agrnts as chromic acid or copper sulfate
Titanium	Sulfuric acid	Oxidizeing agents or inorganic sulfates
Zinc	Distilled water	15 ppm. Mixture calcium and metaphosphates

*Source:* Maxey Brooke, Corrosion Inhibitor Checklist, *Chem. Eng.*, 230-234 (Dec. 1954).

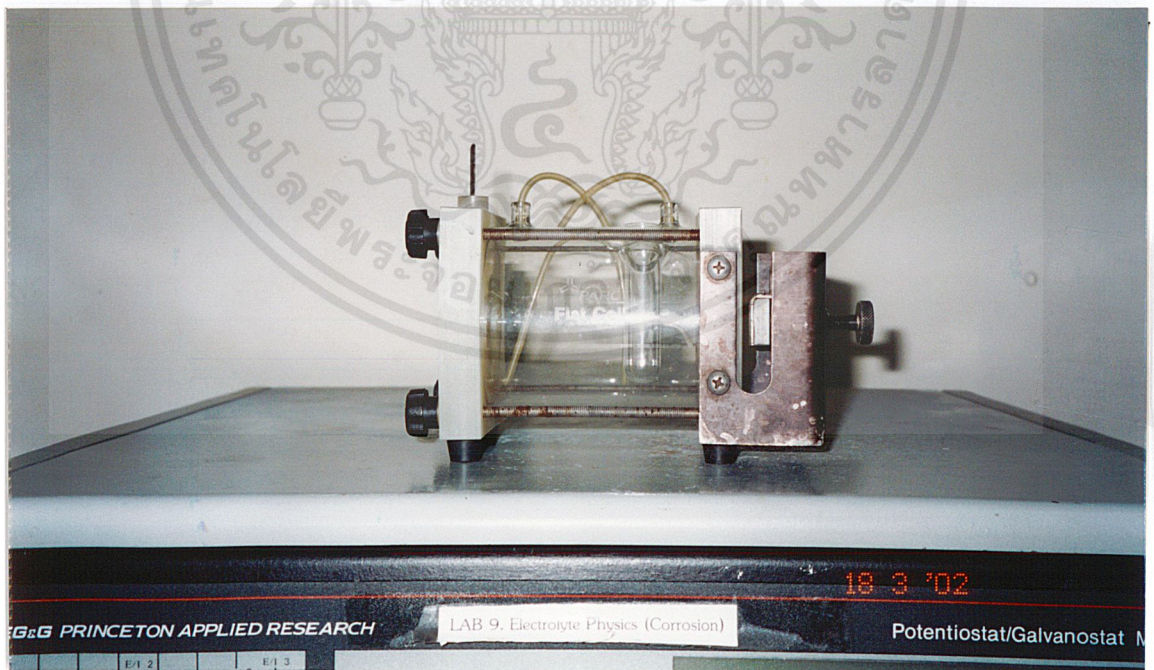


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รูปประกอบการทดลอง



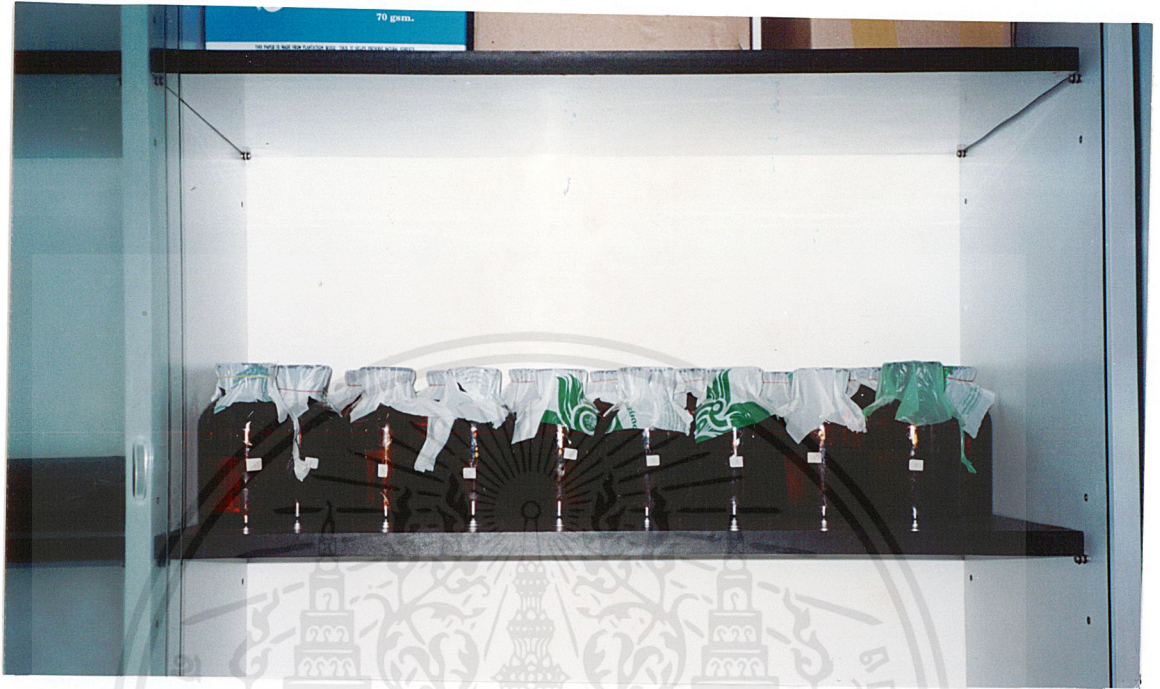
รูปที่ ข.1 เครื่อง Potentiostat / Galvanostat



รูปที่ ข.2 Three - electrode cell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### รูปประกอบการทดลอง (ต่อ)



รูปที่ ข.3 การทดลองวิธี Weight loss

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้