สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สื่อเพื่อการเรียนรู้คุณสมบัติของการกัดกร่อน

LEARNING MEDIA ABOUT PROPERTY OF CORROSION

นายจรัล สุขแก้ว

ว.ค.
จ 156 ส
ฐ.ว
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 83144
วัน,เดือน,ปี.....16 สิงหา. 2551
b.11962203
i.....

ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LEARNING MEDIA ABOUT PROPERTY OF CORROSION

JARUN SUKKAEW

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING

DEPARTMENT OF INSTRUMENTATION ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

หัวข้อปริญญานิพนธ์ สื่อเพื่อการเรียนรู้คุณสมบัติของการกัดกร่อน

LEARNING MEDIA ABOUT PROPERTY OF CORROSION

นักศึกษาผู้จัดทำ นายจรัล สุขแก้ว **รหัสนักศึกษา** 46015435

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม

ปีการศึกษา 2550

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.วิศรุต ศรีรัตนะ	

ภาควิชารับรองแล้ว

(รศ.ประภาษ อุดคกิมาพันธุ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	สื่อเพื่อการเรียนรู้คุณสมบัติของการกัดกร่อน LEARNING MEDIA ABOUT PROPERTY OF CORROSION		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายจรัล สุขแก้ว	**รหัสนักศึกษา**	46015435
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.วิศรุต ศรีรัตนะ		
ปีการศึกษา	2550		

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการศึกษาลักษณะการผุกร่อนของเครื่องจักรที่เกิดจากน้ำ ซึ่งเป็นรูปแบบที่พบได้ทั่วไปในกระบวนการอุตสาหกรรม โดยได้ทดสอบการเกิดการกัดกร่อนของชิ้นงานตัวอย่างด้วยวิธีการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่อุณหภูมิน้ำเดือดและอุณหภูมิปกติ จากการทดสอบพบว่าเมื่อมีการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานตัวอย่างผ่านไปช่วงระยะเวลาหนึ่งจะทำให้เกิดตะกรันจับรอบ ๆ บริเวณผิวของชิ้นงาน ในขณะที่ชิ้นงานตัวอย่างที่ไม่ได้รับความร้อนจะเกิดการผุกร่อนขึ้นในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Learning Media About Property of Corrosion
Author	Mr.Jarun Sukkaew
Thesis Advisor	Asst.Prof. Witsarut Sriratana
Year	2007

ABSTRACT

This project states the performance about corrosion of machine which of occurs from water as be seen general in industrial operation. Testing of corrosion of the sample part is by method to be heated to the sample part at boiled temperature and room temperature.The results of testing are ,when it was heated to the sample part for a while. It occurs calces on surface of the sample part. In case of no heat to the sample part , it will be corroded in system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ส่วนหนึ่งเพราะได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นอาจารย์วิศรุต อาจารย์ที่ปรึกษาในการทำโครงงาน พี่อ้อ เจ้าหน้าที่ธุรการภาค ที่คอยแนะนำการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ รวมถึงเพื่อนร่วมห้องตลอดจนบุคคลอื่นที่ช่วยเหลือเรื่องเครื่องมือ อุปกรณ์ที่จำเป็น และอื่น ๆ ที่ไม่สามารถกล่าวได้หมด ต้องขอขอบพระคุณอย่างสูง หากไม่มีบุคคลเหล่านี้แล้วการทำโครงงานนี้คงไม่สำเร็จลุล่วงได้โดยง่าย

ท้ายที่สุด สำหรับ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่งซึ่งให้โอกาสทางการศึกษา อีกทั้งเป็นแรงบันดาลใจที่สำคัญจนทำให้มีวันนี้ ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VII

สารบัญภาพ.....VIII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 บทนำ.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน.....1

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....1

บทที่ 2 ทฤษฎีการกัดกร่อน.....2

2.1 การกัดกร่อน.....2

2.2 ประเภทของการกัดกร่อน.....2

2.2.1 การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นสม่ำเสมอทั่วผิวหน้า.....2

2.2.2 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก.....3

2.2.3 การกัดกร่อนในที่อับ.....4

2.2.4 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม.....5

2.2.5 การสูญเสียส่วนผสมบางตัว.....7

2.2.6 การกัดกร่อนตามขอบเกรน.....8

2.2.7 การกัดกร่อน-สึกกร่อน.....9

2.2.8 การกัดกร่อน-ความล้า.....10

2.2.9 การกัดกร่อนแบบถูครูด.....10

2.2.10 การกัดกร่อนแบบรูพรุน.....11

2.2.11 การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น.....12

2.2.12 การกัดกร่อนแบบใต้ชั้นเคลือบ.....14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.13 Graphitic Corrosion....15

2.3 เทคนิคในการตรวจสอบการสึกกร่อน....15

2.3.1 Mass Loss....15

2.3.2 Resistance Measurements....16

2.3.3 Polarization Resistance....16

2.3.4 Acoustic Emission....16

2.3.5 Ultrasonic Examinations....16

2.4 Automated Corrosion Monitoring Techniques....16

2.4.1 Linear Polarization Resistance (LPR)....16

2.4.2 Harmonic Distortion Analysis (HDA)....17

2.4.3Electrochemical Noise (ECN)....18

2.5 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบพฤติกรรมและอัตราการกัดกร่อนของวัสดุ....18

2.6 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบพฤติกรรมและอัตราการกัดกร่อนที่ความด่างศักย์ด่างๆ..20

2.7 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบอัตราการกัดกร่อนชนิดเคลื่อนที่....22

2.8 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนของวัสดุเนื่องจากความล้า....24

2.9 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบหาปริมาณอิออนลบและอิออนบวก....26

2.10 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบหาปริมาณโลหะหนัก....28

2.11 เครื่องทดสอบด้วยหมอกเกลือ....29

บทที่ 3 หลักการ....31

3.1 การผุกร่อนของเครื่องจักรที่เกิดจากน้ำ....31

3.2 การผุกร่อนทางไฟฟ้า....33

3.3 แนวความคิดในการควบคุมการผุกร่อน....36

บทที่ 4 การทดสอบ....38

4.1 การทดสอบ Corrosion....38

4.1.1 ชิ้นงานทดสอบ....38

4.1.2 วิธีการทดสอบ....38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 ผลการทดสอบ Corrosion.....39

บทที่ 5 สรุปผลและแนวทางการพัฒนา.....44

5.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบการกัดกร่อน.....44

5.2 แนวทางการพัฒนา.....45

บรรณานุกรม.....46

ภาคผนวก.....47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 ลำดับทางไฟฟ้าของโลหะทั่วไปที่พบในระบบน้ำหล่อเย็น....34

4.1 แสดงน้ำหนักหลังการทดลองครั้งที่1....39

4.2 แสดงน้ำหนักหลังการทดลองครั้งที่2....39

4.3 แสดงน้ำหนักหลังการทดลองครั้งที่3....40

4.4 แสดงน้ำหนักหลังการทดลองครั้งที่4....40

4.5 แสดงน้ำหนักหลังการทดลองครั้งที่5....41

4.6 แสดงน้ำหนักหลังการทดลองครั้งที่6....41

4.7 แสดงน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของชิ้นงานทดสอบก่อนและหลังการทดลอง....42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

2.1 รูปแบบการกัดกร่อนทั่วผิวหน้า....2

2.2 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก....3

2.3 แสดงการผุกร่อนรูปแบบ Crevice....4

2.4 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม....5

2.5 ภาพถ่ายหน้าตัดการกัดกร่อนแบบรูเข็ม....6

2.6 การผุกร่อนแบบ PITTING ของ Stainless Steel 304....6

2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับการกัดกร่อนในโลหะผสม....6

2.8 แสดงการสูญเสียส่วนผสมบางตัว....7

2.9 Stainless Steel ที่เกิดการผุกร่อนแบบ Inter-granular....8

2.10 ภาพถ่ายของข้อต่อของท่อไอน้ำที่เกิดการผุกร่อนแบบ Erosion....9

2.11 การกัดกร่อนแบบรูพรุน....11

2.12 ภาพขยายแสดงการผุกร่อนแบบ Stress Corrosion....13

2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน....17

2.14 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบพฤติกรรมและอัตราการกัดกร่อนของวัสดุ....18

2.15 แสดงลักษณะการพล็อตค่าของโปรแกรม 352 SoftCorr III Version 3.6....19

2.16 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบพฤติกรรมและอัตราการกัดกร่อนที่ความต่างศักย์ต่างๆ....20

2.17 การพล็อตค่าระหว่างกระแสกับเวลาของโปรแกรม Datalogger 2.44 MPT....21

2.18 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบอัตราการกัดกร่อนชนิดเคลื่อนที่....22

2.19 ลักษณะของโปรแกรม Microcor Data Ploter....23

2.20 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนของวัสดุเนื่องจากความล้า....24

2.21 การทดสอบ Corrosion Fatigue และ SSRT....25

2.22 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบอิออนลบและอิออนบวก....26

2.23 การแสดงผลของโปรแกรม IC Net Version 2.1....27

2.24 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบหาปริมาณโลหะหนัก....28

2.25 การแสดงผลของโปรแกรม VA Computrace....29

2.26 เครื่องทดสอบด้วยหมอกเกลือ....29

3.1 แสดงเซลล์การผุกร่อน....32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.2 การผุกร่อนจากความแตกต่างของความเข้มข้น	35
3.3 การผุกร่อนชนิดที่เป็นร่อง	36
3.4 ผลของค่า pH ต่ออัตราการผุกร่อน	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำ

การกัดกร่อน หรือ corrosion คือการเสื่อมสภาพของโลหะที่มีผลทำให้คุณสมบัติของโลหะเปลี่ยนไปในทางเลวลง โดยโลหะเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบของโลหะหรือที่เรียกว่าสนิม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของการกัดกร่อนเป็นเหตุให้โลหะเกิดความเสียหาย ในแต่ละปีโลกมีค่าใช้จ่ายจากปัญหาการกัดกร่อนมากมาย ทั้งที่เป็นการซ่อมแซม บำรุงรักษา หรือการรื้อใหม่ทดแทน ส่วนที่ชำรุดเสียหายจนไม่อาจใช้การได้อีกต่อไป บางครั้งก็เป็นค่าใช้จ่ายที่มากเกินควรเช่น การออกแบบเผื่อ ใช้โลหะหนาเกินความจำเป็น นอกจากนั้นยังมีค่าใช้จ่ายของการค้นคว้าวิจัย เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ได้พัฒนาให้มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง สามารถใช้ได้แม้ในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. ทำการศึกษาหลักการพื้นฐานในการเกิดการกัดกร่อน
2. ทำการศึกษากรรมวิธีการตรวจเช็คการกัดกร่อนด้วยเครื่องมือชนิดต่างๆ
3. เพื่อเสริมสร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับรูปแบบของการกัดกร่อนชนิดต่างๆที่เกิดขึ้น

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจปัจจัยที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนในกระบวนการอุตสาหกรรม
2. มีความรู้ความเข้าใจลักษณะรูปแบบการกัดกร่อนชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการอุตสาหกรรม
3. สามารถเลือกวัสดุมาใช้ได้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีการกัดกร่อน

2.1 การกัดกร่อน

การกัดกร่อน คือปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (oxidation reaction) ของโลหะ โดยที่โลหะประกอบด้วยอะตอมโลหะเกาะเกี่ยวกันตลอดเนื้อโลหะด้วยพันธะโลหะซึ่งเป็นพันธะโควาเลนท์ ที่มีคู่อิเลคตรอนที่พันธะเป็นชนิดไม่ประจำ โลหะจึงมีอิเลคตรอนที่เคลื่อนย้ายได้ที่ยึดเหนี่ยวทั้งหมดเข้าด้วยกัน โลหะจึงมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าเมื่อโลหะเกิดการกัดกร่อน อิเลคตรอนที่พันธะจะหลุดออก ทำให้อะตอมโลหะเปลี่ยนเป็นอิออนโลหะประจุบวก เมื่อมีการให้และรับอิเลคตรอนครบเซลไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า เซลการกัดกร่อน โลหะที่ให้อิเลคตรอนเป็นขั้วแอโนด (anode) อิเลคตรอนเดินทางไปตามเนื้อโลหะ สิ่งแวดล้อมที่รับอิเลคตรอนเป็นขั้วคาโธด (cathode) และความชื้นหรือสารละลายที่ผิวโลหะเป็นอิเลคโตรไลท์ (electrolyte) ให้อิออนเดินทางให้ครบเซล

ดังนั้น การกัดกร่อนจึงสามารถเกิดขึ้นได้ทั่วไป อาจกล่าวได้ว่าโลหะเกือบทุกชนิดเกิดการกัดกร่อนได้เสมอ ต่างกันที่ความยากง่ายของการเกิดการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนเร็ว-ช้า สาเหตุของการเกิดการกัดกร่อนจึงมาจากทั้งโลหะและสิ่งแวดล้อม

2.2 ประเภทของการกัดกร่อน

2.2.1 การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นสม่ำเสมอทั่วผิวหน้า (General or Uniform Corrosion)

การกัดกร่อนแบบนี้เห็นอยู่ทั่วไป โลหะจะถูกกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวของโลหะนั้น โดยปกติจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมี หรือปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า การกัดกร่อนเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอบนผิวหรือเป็นบริเวณกว้างมีผลให้โลหะบางเรื่อย ๆ หรือมีน้ำหนักหายไป คือ เบาลงเรื่อย ๆ การกัดกร่อนประเภทนี้ในแง่ของเทคนิคไม่ค่อยเป็นปัญหาและไม่ก่อให้เกิดอันตรายรุนแรงเท่าใดนักเพราะเนื่องจากสามารถหาอัตราการกัดกร่อนและออกแบบเผื่อ พร้อมทั้งทำนายอายุการใช้งานของชิ้นส่วนที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ได้และเปลี่ยนใหม่เมื่อถึงเวลาอันควร

ภาพที่ 2.1 รูปแบบการกัดกร่อนทั่วผิวหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอสามารถป้องกันหรือลดปริมาณการกัดกร่อนได้โดย

(1) เลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมและอาจทำการเคลือบผิวด้วย

(2) ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน

(3) ใช้การป้องกันแบบคาโทดิก (cathodic protection)

2.2.2 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion)

โลหะแต่ละชนิดจะมีค่าศักย์เฉพาะตัว ดังนั้นถ้าหากมีโลหะ 2 ชนิด สัมผัสกันอยู่ และมีสารละลายอิเลคโตรไลท์ และส่วนโลหะเชื่อมต่อที่นำไฟฟ้าหรือต่อกันอย่างครบวงจรไฟฟ้าเคมีเมื่อเวลาผ่านไป โลหะที่ศักย์ต่ำกว่าจะเกิดการกัดกร่อน (อาโนด) ขณะที่โลหะที่มีศักย์สูงกว่าจะไม่กัดกร่อน (คาโธด) ความต่างศักย์ของโลหะทั้งสอง ยิ่งมากเท่าไหร่ความรุนแรงก็มากขึ้นเท่านั้น

ภาพที่ 2.2 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก

ความต่างศักย์จะทำให้เกิดการไหลของอิเลคตรอนระหว่างวัสดุทั้งสอง ทำให้เพิ่มอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่มีค่าความต้านทานต่อการกัดกร่อนน้อยและจะลดอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่มีค่าความต้านมากกว่า โดยปกติโลหะที่มีค่าความต่างศักย์มากจะมีการกัดกร่อนค่อนข้างน้อยหรือแทบจะไม่เกิดเลย เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเกี่ยวข้องกับกระแสไฟฟ้าและความแตกต่างของโลหะ จึงมีการเรียกการกัดกร่อนแบบนี้ว่า Galvanic Corrosion หรือ Two-metal Corrosion ปริมาณกระแสและการกัดกร่อนขึ้นกับความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะทั้งสอง วิศวกรรมการออกแบบจะต้องทราบถึงความเป็นไปได้ของการกัดกร่อนแบบ galvanic ตั้งแต่การระบุรายละเอียดของวัสดุที่จะนำไปใช้ในเครื่องจักร บางครั้งเพื่อเป็นการประหยัดอาจใช้วัสดุต่างชนิดกันมาเชื่อมกัน โดยเฉพาะโลหะที่มีค่าความต่างศักย์กันมากควรระมัดระวังให้ดี ความต่างศักย์ที่เกิดจาก galvanic cell สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลา เนื่องจากผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนที่สะสมอยู่ที่ขั้วคาโธดหรืออาโนดจะทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง

การป้องกัน

วิธีการลดหรือป้องกันการกัดกร่อนแบบ galvanic มีหลายวิธีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เลือกใช้วัสดุที่มีค่า galvanic series ใกล้เคียงกันเท่าที่เป็นได้
2. หลีกเลี่ยงอัตราส่วนของพื้นที่ คาโธด/อาโนด ปรับให้พื้นที่ทั้งสองใกล้เคียงกัน
3. ใช้ฉนวนกั้นในบริเวณที่ใช้โลหะต่างชนิดกันมาสัมผัสกัน
4. ใช้สารเคลือบผิวอย่างระมัดดูแลการเคลือบผิวให้อยู่ในสภาพดี
5. เติมสารยับยั้ง เพื่อลดความรุนแรงของการกัดกร่อน

2.2.3 การกัดกร่อนในที่อับ (Crevice Corrosion)

การกัดกร่อนในที่อับคือ การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในพื้นที่อับบนผิวโลหะที่สัมผัสโดยตรงกับสารกัดกร่อน การกัดกร่อนประเภทนี้เกี่ยวข้องกับปริมาณของสารละลายที่ค้างอยู่ตามพื้นที่ที่เป็นหลุม หรือพื้นที่ที่เป็นซอกบริเวณแคบ ๆ ที่มีสารละลายเข้าไปขังอยู่ได้เป็นเวลานาน โดยไม่มีการถ่ายเททำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนในน้ำหรือสารละลายภายในซอกไม่เท่ากับภายนอก ทำให้เกิดการครบเซลการกัดกร่อนชนิดเซลความเข้มข้น โดยบริเวณในซอกจะเกิดเป็นขั้วอาโนดคือเกิดการสูญเสียเนื้อโลหะ

ภาพที่ 2.3 แสดงการผุกร่อนรูปแบบ Crevice

การสัมผัสระหว่างผิวโลหะและผิวที่ไม่ใช่โลหะ สามารถทำให้เกิดการกัดกร่อนในที่อับได้เช่นกัน ปะเก็นรอยต่อระหว่างยางกับเหล็กกล้าไร้สนิมที่จุ่มอยู่ในน้ำทะเล เนื่องจากสารละลายที่ขังอยู่มีปริมาณจำกัดและหยุดนิ่ง ออกซิเจนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาคาโธดิกจึงลดจำนวนลดลงเรื่อย ๆ จนหมด แต่ปฏิกิริยาอาโนดิกยังดำเนินอยู่ จึงทำให้ความเข้มข้นของประจุบวกสูง ดังนั้นเพื่อรักษาสมดุลของประจุไว้ ถ้ามีสารเจือปนโดยเฉพาะคลอรีน ประจุลบของคลอรีนจะเคลื่อนที่เข้ามาในรอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

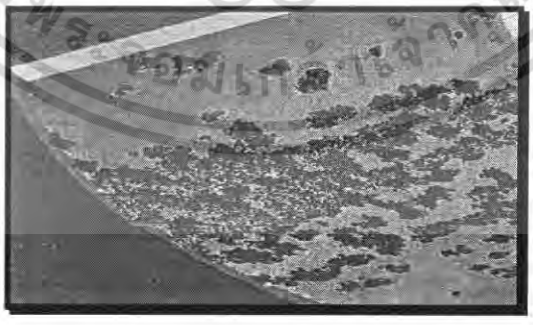
แตก และทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เป็นโลหะไฮดรอกไซด์และกรดไฮโดรคลอริก กรดนี้จะกัดผิวของโลหะออกมาทีละน้อย ส่งผลให้รอยแตกและรอยร้าวขยายตัวไปเรื่อย ๆ

การป้องกัน

1. ใช้การเชื่อมแบบ butt joint แทนการย้ำหมุดหรือการยึดด้วยสลักเกลียว
2. ปิดบริเวณที่เป็นที่อับโดยการเชื่อมหรือการบัดกรี
3. ออกแบบถังความดันให้สามารถระบายน้ำได้ดี พยายามหลีกเลี่ยงรูปร่างที่เป็นมุม
4. ตรวจสอบเครื่องมือและสารแปลกปลอมอยู่เสมอ
5. กำจัดของแข็งที่ลอยอยู่ก่อนเข้ากระบวนการผลิต
6. กำจัดวัสดุเปียกที่ตกค้างอยู่ในระหว่างการหยุดซ่อมประจำปี
7. จัดสภาวะสิ่งแวดล้อมให้มีความสม่ำเสมอ
8. ใช้ปะเก็นที่เป็นของแข็งและไม่มีการดูดซึม
9. ใช้การเชื่อมแทนการม้วนเป็นท่อ

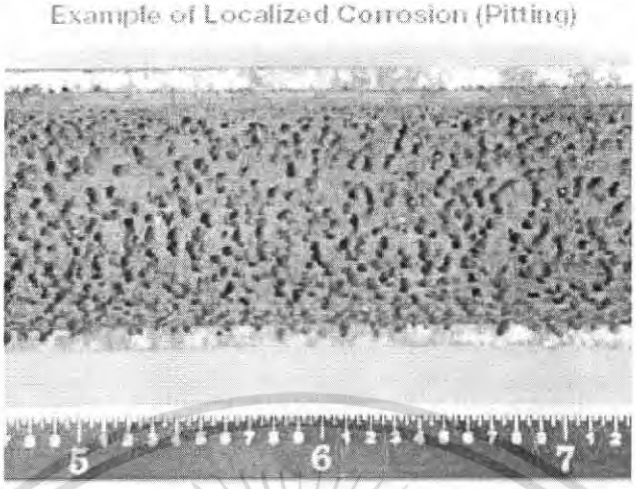
2.2.4 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion)

การกัดกร่อนแบบสนิมขุมหรือการกัดกร่อนแบบรูเข็ม เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมากโดยเฉพาะกับโลหะที่ได้พัฒนาให้มีฟิล์มป้องกันการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้าได้แล้ว แต่เมื่อฟิล์มบางแตกแยกออกเฉพาะบางที่ ก็จะเกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่กัดกร่อนลึกลงไปเรื่อย ๆ ทำให้สังเกตเห็นได้ยาก เนื่องจากผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนได้ปกคลุมเอาไว้ การกัดกร่อนแบบนี้ทำให้ทำนายได้ยาก โดยทั่วไปสนิมขุมมักจะเกิดทิศทางเดียวกันกับแรงโน้มถ่วงของโลก การเกิดการกัดกร่อน



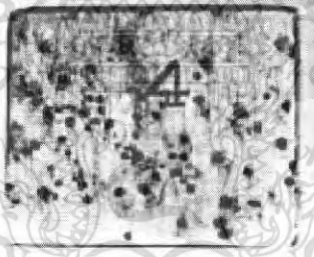
ภาพที่ 2.4 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

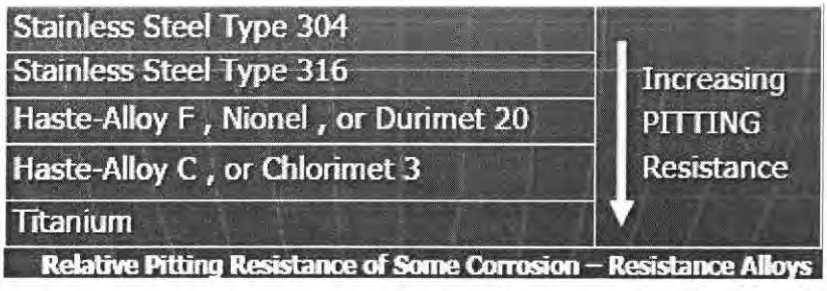


ภาพที่ 2.5 ตัวอย่างการกัดกร่อนแบบรูเข็ม

pitting เป็นลักษณะที่ทำให้เป็นรูหรือหลุมในเนื้อโลหะ รูเหล่านี้อาจมีขนาดเล็กหรือใหญ่ก็ได้ แต่โดยส่วนมากจะมีขนาดเล็ก บางครั้งจะเห็นรูกระจายอยู่ห่างกัน หรืออาจอยู่ใกล้กันจนดูคล้ายผิวโลหะที่ขรุขระ



ภาพที่ 2.6 การผุกร่อนแบบ PITTING ของ Stainless Steel 304



ภาพที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับการกัดกร่อนในโลหะผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

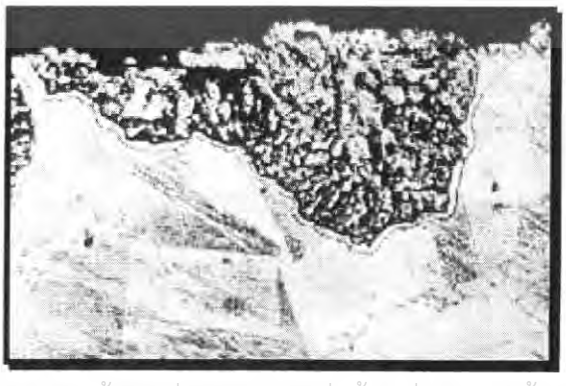
Pitting เป็นการกัดกร่อนที่ก่อให้เกิดความเสียหายและรุนแรงที่สุด ซึ่งทำให้อุปกรณ์ เครื่องมือหรือชิ้นส่วนต่าง ๆ เกิดความเสียหายเนื่องจากการเจาะลึกด้วยเปอร์เซ็นการสูญเสียน้ำหนักของโครงสร้างทั้งหมดที่น้อย ลักษณะมักยากที่จะตรวจสอบพบยากเพราะมีขนาดเล็ก นอกจากนั้นยังยากที่จะตรวจวัดเชิงปริมาณและตรวจวัดการขยายตัวของสภาพการกัดกร่อนของ pitting ได้ เพราะความลึกและจำนวนของรูที่เปลี่ยนแปลงภายใต้สภาวะเฉพาะสภาวะใดสภาวะหนึ่ง การเกิด pitting ยังยากที่จะทำนายได้จากการทดสอบในห้องทดลองอีกด้วย บางครั้งอาจใช้เวลานานจึงปรากฏสภาพของการกัดกร่อน การเกิด pitting เป็นการเกิดเฉพาะที่และเป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่รุนแรง ความเสียหายที่เกิดขึ้นมักจะเกิดอย่างฉับพลัน

การป้องกัน

โดยทั่วไป วิธีที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนในที่อับก็สามารถนำมาใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนแบบ pitting ได้เช่นกัน วัสดุที่มีการกัดกร่อนหรือมีแนวโน้มที่จะเกิดการกัดกร่อนแบบ pitting ไม่ควรนำมาใช้ในการสร้างโรงงานหรือเครื่องมือ วัสดุแต่ละชนิดมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ต่างกัน เช่น การเติมโมลิบดินั่มลงไปในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ในปริมาณ 2 % ซึ่งทำให้ได้เหล็กกล้าไร้สนิม 316 โดยจะเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบ pitting โดยจะทำให้เกิดผิว passive ที่มีความเสถียรมากกว่า คือมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนมาก วัสดุ 2 ชนิดนี้ประพฤติตัวต่างกันคือชนิดหนึ่ง ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในน้ำทะเลแต่อีกชนิดหนึ่งสามารถใช้ได้ในบางกรณี

2.2.5 การสูญเสียส่วนผสมบางตัว (Selective leaching)

เป็นรูปแบบหนึ่งของการกัดกร่อนซึ่งเกิดโดยการละลายของธาตุบางตัวจากโลหะอัลลอยด์ เป็นผลจากการกระทำซึ่งสิ่งแวดล้อมไล่โลหะที่ว่องไวที่สุดออกจากอัลลอยด์ เหลือไว้แต่โครงสร้างพรุนซึ่งเต็มไปด้วยโลหะที่เสถียรที่สุด วัสดุที่เหลือจึงสูญเสียความแข็งแรงทางกายภาพไปมาก การกัดกร่อนแบบนี้มักมีชื่อตามธาตุที่ละลายออกมา



ภาพที่ 2.8 การสูญเสียส่วนผสมบางตัว (Selective leaching)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะผสมประกอบด้วยโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป จากที่กล่าวมาว่าโลหะจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าเฉพาะตัว ดังนั้นโลหะที่เป็นส่วนผสมที่มีศักย์ต่ำกว่าจะถูกกัดกร่อนไป ตัวอย่างที่พบมากคือทองเหลือง (ประกอบด้วยทองแดงและสังกะสี) สูญเสียสังกะสีไปทำให้ทองเหลืองที่เหลืออยู่เป็นทองแดงส่วนมากและพรุน ความแข็งแรงต่ำลง การสูญเสียสังกะสีอาจสังเกตได้จากที่เดิมที่เคยมีสีเหลือง เมื่อสูญเสียสังกะสีไปจะทำให้มีสีแดงขึ้น ทองเหลืองที่มีปริมาณสังกะสีผสมอยู่มากจะเกิดการสูญเสียสังกะสีได้ง่าย

กลไกการสูญเสียสังกะสีแบ่งเป็นขั้นตอนคือ

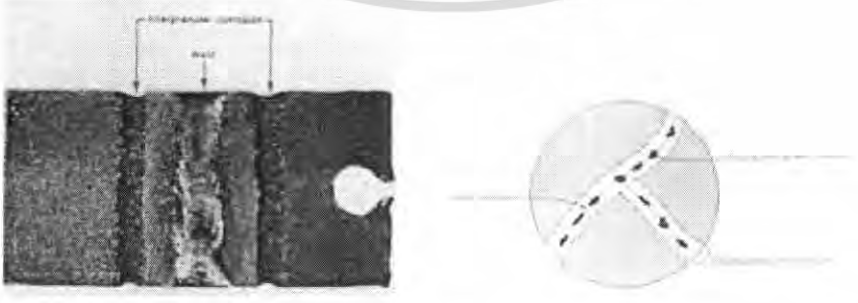
1. ทองเหลือง (ทองแดงและสังกะสี) ถูกกัดกร่อนหรือละลายลงมาในสารละลาย
2. สังกะสียังคงอยู่ในสารละลาย
3. ทองแดงกลับไปเป็นโลหะอีกครั้งโดยติดกับชิ้นงานเดิม

การป้องกัน

1. ลดความรุนแรงของสภาวะแวดล้อม เช่นกำจัดออกซิเจนจากสารละลาย
2. ใช้การป้องกันแบบคาโธด

2.2.6 การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion)

โดยปกติขอบเกรนมักจะเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าเนื้อเกรนอยู่แล้ว โดยขอบเกรนจะแสดงตัวเป็นขั้วอาโนด (สูญเสียเนื้อโลหะ) ภายในเกรนจะแสดงตัวเป็นขั้วคาโธด หากบริเวณขอบเกรนมีอนุภาคอื่น ๆ มาตกตะกอนอยู่หรือมีธาตุหนึ่งมากหรือน้อยเกินไป ขอบเกรนอาจจะถูกกัดกร่อนหรือทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้นอีก เมื่อการกัดกร่อนเกิดขึ้นได้ระยะเวลาหนึ่ง บริเวณพื้นที่ที่แสดงตัวเป็นอาโนดจะเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไป การกัดกร่อนก็จะเกิดกระจายอยู่ทั่วไปเป็นแบบ Uniform attack กัดเซาะทั้งก้อน บริเวณที่เป็นอาโนด คาโธด จะเปลี่ยนตลอดเวลา



ภาพที่ 2.9 Stainless Steel ที่เกิดการผุกร่อนแบบ Inter-granular

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ถ้าบริเวณขอบเกรนแสดงตัวเป็นอาโนดตลอดเวลา การกัดกร่อนก็จะเกิดเฉพาะบริเวณขอบเกรนตลอดเวลา เป็นการกัดกร่อนที่เรียกว่าการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) เหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติกเกิดการกัดกร่อนตาทขอบเกรนได้ หากนำไปใช้งานอย่างไม่เหมาะสม โดยทั่วไปเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติกทนการกัดกร่อนได้ดี แต่ถ้าเหล็กประเภทนี้ได้รับอุณหภูมิในช่วง 500-800 องศาเซลเซียสเป็นเวลานานพอสมควร จะทำให้เกิดโครเมี่ยมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน โครเมียมที่เดิมเคยอยู่ในเนื้อเหล็กและคอยป้องกันการกัดกร่อนให้เหล็กก็จะมารวมตัวกับคาร์บอน ทำให้บริเวณใกล้ ๆ หรือชิดกับขอบเกรนมีโครเมียมต่ำกว่าร้อยละ 12 ซึ่งถือว่าบริเวณนี้ไม่ใช่เหล็กกล้าไร้สนิมอีกต่อไป ดังนั้นบริเวณที่มีโครเมี่ยมต่ำตามขอบเกรนจึงถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น

การควบคุมหรือลดการกัดกร่อนตามขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิมออสเตนนิติก
สามารถทำได้ 3 วิธีคือ

1. การทำ heat treatment ที่อุณหภูมิสูงซึ่งปกติจะเรียกว่า quench annealing หรือ solution quenching
2. การเติมธาตุบางตัวที่สามารถรวมตัวเป็นคาร์ไบด์ได้ดี (stabilizer)
3. การลดปริมาณคาร์บอนให้ต่ำกว่า 0.03 เปอร์เซ็นต์

2.2.7 การกัดกร่อน-สึกกร่อน (Erosion Corrosion)

เมื่อมีการเสียดสีและการสึกกร่อนต่อโลหะ ในสิ่งแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนได้ด้วยนั้น จะมีผลรวมของการกระทำต่อโลหะอันเนื่องมาจากปรากฏการณ์เชิงกลและเชิงเคมีซึ่งส่งผลให้เกิดการการทำลายและการเสื่อมสภาพของโลหะอย่างรวดเร็ว

ภาพที่ 2.10 ภาพถ่ายของข้อต่อของท่อไอน้ำที่เกิดการผุกร่อนแบบ Erosion

การกัดกร่อนประเภทนี้เริ่มจากการกัดกร่อนที่มีของไหลไหลผ่านโลหะและมักจะไหลด้วยความเร็วสูงหากของไหลนี้มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง เมื่อโลหะเริ่มสึกจะทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายขึ้น หากโลหะนั้นมีฟิล์มปกคลุมผิวได้การไหลของของไหลอาจทำให้ฟิล์มถูกทำลายไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางส่วน ถ้าฟิล์มนี้สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้อย่างง่ายและรวดเร็วการกัดกร่อนก็จะไม่รุนแรงนัก แต่ถ้าฟิล์มใหม่เกิดขึ้นได้ช้าก็จะทำให้การกัดกร่อนเกิดขึ้นรุนแรงและรวดเร็ว

2.2.8 การกัดกร่อน-ความล้า (Fatigue Corrosion)

ความล้าหรือ fatigue เป็นอาการของโลหะที่ถูกแรงกระทำซ้ำ ๆ กัน หรือซ้ำแล้วซ้ำเล่า แรงที่กระทำเป็นได้ทั้ง tensile และ compressive stress จนที่สุดแล้วโลหะนั้นก็แตกหักเสียหาย (fracture) โดยปกติแล้วการกัดกร่อนแบบนี้เกิดเมื่อขนาดแรงเค้นต่ำกว่าค่า yield point และเกิดเมื่อถูกกระทำซ้ำแล้วซ้ำเล่าในช่วงเวลาหนึ่งและในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนด้วย ดังนั้นจึงถูกกระทำทั้งทางกล และทางเคมีโดยมีผลไปลดความต้านทานของโลหะจนถึงจุดที่เกิดความเสียหาย

2.2.9 การกัดกร่อนแบบถูครูด (Fretting Corrosion)

เป็นการกัดกร่อนที่เกิดในสภาวะบรรยากาศปกติ บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะ เมื่อโลหะนั้นกำลังถูกแรงกระทำ

ปัจจัยพื้นฐานของการเกิด Fretting corrosion

1. โลหะที่หันหน้าเข้าหากันนั้น กำลังถูกแรงกระทำ
2. มีการสั่นสะเทือนบริเวณผิวหน้าสัมผัส ผิวด้านหนึ่งตีกระทบหรือถูอยู่อีกผิวหน้าหนึ่ง
3. ระหว่างผิวหน้าโลหะทั้งสองมีการลื่นไถล (เช่นผิวสัมผัสระหว่าง bearing กับเพลา)

ผลที่เกิดจาก Fretting corrosion

1. สูญเสียเนื้อโลหะบริเวณพื้นผิวสัมผัสเป็นโลหะออกไซด์ สามารถ เกิดกับเหล็กและเหล็กกล้า (ferric oxide)
2. ทำให้ size tolerance เสีย จากที่เคยเข้ากันได้ดีก็จะหลวม
3. fretting corrosion ทำให้เกิดการหลวมแล้วก็จะเกิด excessive strain นำไปสู่การเกิดร่องซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของร้อยร้าว และเป็น fatigue fracture ในที่สุด

กลไกการเกิด fretting corrosion 2 แนวคิด

1. เนื้อโลหะเป็น particle เล็กๆ ของผิวโลหะที่สัมผัสกัน
2. เกิดเป็น oxide แล้วหลุดออกมา

ความชื้นลดความเสียหายจาก fretting corrosion ความชื้นจะทำตัวเป็นสารหล่อลื่นเพราะว่า hydrate rust (สนิม+น้ำ) ก่อให้เกิดความเสียหายจากการเสียดสีน้อยกว่าออกไซด์ที่มีสภาพแห้งและบริเวณที่ขาดออกซิเจนหรือไม่มีออกซิเจน จะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบถูครูดน้อยลง fretting จะเกิดมากขึ้นเมื่อมีน้ำหนักหรือความเค้นมากระทำมากขึ้นและถ้าอากาศดึงเอา particles ของโลหะเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

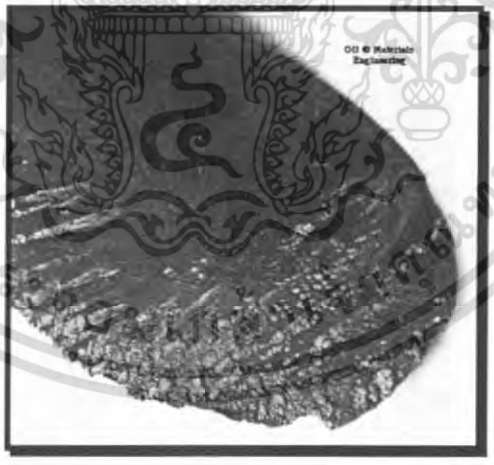
มาร่วมด้วยแสดงว่ามี tension , shear stress ร่วมด้วย fretting corrosion บางที่เรียกว่า friction oxidation , wear oxidation , false brinelling

การป้องกัน

1. หล่อลื่นด้วยน้ำมันที่มีความหนืดต่ำ คุณสมบัติการเกาะยึดสูง
2. เพิ่ม load เพื่อลด slip ระหว่างผิวหน้าสัมผัส
3. ใช้ปะเก็นเพื่อดูดซับการสั่นสะเทือน ป้องกันออกซิเจน
4. เพิ่มความแข็งแรงผิวหน้าสัมผัส
5. ใช้ coating หรือ surface treatment เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของผิวโลหะที่สัมผัสกัน
6. เพิ่มความแข็งแรงด้วยการยิงทราย (shot peening)

2.2.10 การกัดกร่อนแบบรูพรุน (cavitation corrosion)

เป็นรูปแบบหนึ่งของการกัดกร่อนเฉพาะที่ซึ่งเกิดจากผลรวมของความเสียหายบนผิวโลหะเป็นแห่ง ๆ อันเนื่องมาจากฟองอากาศที่มาจับตัวกันซ้ำแล้วซ้ำเล่า หรือเนื่องมาจากการกัดเซาะทางเคมีต่อพื้นที่ที่ถูกทำลาย การกัดกร่อนแบบนี้อาจพบได้ในสภาพไหลปั่นป่วน (Turbulent flow) ของของเหลว เช่นใกล้ ๆ ใบพัดเรือและในปั๊มน้ำ



ภาพที่ 2.11 การกัดกร่อนแบบรูพรุน (cavitation corrosion)

การเกิดและการแตกของฟองกาซซ้ำแล้วซ้ำเล่าอาจเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความดันในบางบริเวณซึ่งลดต่ำลงกว่าหรือเพิ่มสูงกว่าความดันไอของของเหลว การสืบต่ออย่างรวดเร็วของการเกิดและการแตกของฟองอากาศนี้ทำให้เกิด shock ที่ทรงพลังซึ่งสามารถทำลายผิวโลหะหรือวัสดุได้เป็นจุด ๆ ถ้ามีผิวออกไซด์บางบนโลหะ shock wave จะไปถูเอา protective film ออก ทำให้โลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลือยและว่องไวต่อการกัดกร่อน โดยโลหะเปลือยจะสัมผัสกับอิเลคโตรไลต์ในบางจุดพื้นผิวตรงนั้นอาจปรากฏให้เห็นลักษณะพรุนๆคล้ายฟองน้ำ ลักษณะการเสียหายจะคล้ายกับ pitting

กลไกการเกิด cavitation

1. การเกิดฟองบน protective film
2. ฟองกาซแตกสลายและทำลาย protective film
3. เนื้อโลหะใต้ protective film ถูกทำลายเกิดการกัดกร่อนต่อมาเกิด protective film ขึ้นใหม่
4. ต่อมาฟองกาซฟองใหม่มาสัมผัสตำแหน่งเดิมอีก
5. ฟองก๊าซใหม่แตกสลายทำลาย protective film อีก
6. เนื้อโลหะบริเวณที่ฟิล์มถูกทำลายกัดกร่อนต่อไปอีก ต่อมาเกิด protective film ขึ้นใหม่อีก
7. กระบวนการกัดกร่อนเกิดซ้ำซาก จนรอยกัดกร่อนเป็นรูลึก

cavitation ที่เกิดส่วนใหญ่ มีสาเหตุร่วมกันกับการกัดกร่อนและแรงกระทำทางกล ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะไปลดประสิทธิภาพของอุปกรณ์ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมสูงขึ้น

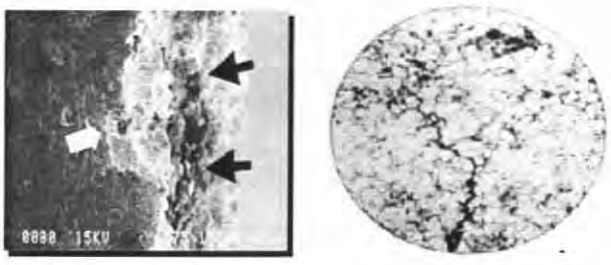
การป้องกัน

1. ปรับปรุงการออกแบบ เพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงของ hydrodynamic pressure น้อยที่สุด
2. เลือกใช้โลหะที่แข็งแรงกว่า มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนดีกว่า
3. ชิ้นส่วนบริเวณที่มีโอกาสเกิด cavitation มาก ให้แต่งผิวให้เรียบมากที่สุดเป็นกรณีพิเศษ
4. หุ้มด้วยวัสดุที่ยืดหยุ่นได้ เช่น ยาง

2.2.11 การกัดกร่อนร่วมกับความเค้น (Stress Corrosion)

การกัดกร่อนชนิดนี้จะมีโอกาสเกิดกับโลหะที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีสารกัดกร่อนและมีความเค้นแรงดึงกระทำกับโลหะ ความเค้นนี้อาจเป็นความเค้นตกค้างหรือความเค้นภายนอกที่มากระทำ การเสียหายแบบนี้ผิวโลหะอาจไม่ถูกกัดกร่อนหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย แต่ในเนื้อโลหะจะมีรอยร้าวเล็กๆ อยู่มากมาย ตัวอย่างโลหะที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้ เช่น ทองเหลืองจะไม่ทนต่อแอมโมเนีย ในขณะที่เหล็กกล้าไร้สนิมจะไม่ทนต่ออิออนของคลอไรด์ เป็นต้น ลักษณะของการกัดกร่อนที่มีความเค้นเข้ามาเกี่ยวข้องจะมีลักษณะรอยร้าวเป็นกิ่งก้าน โดยที่รอยร้าวนี้อาจเกิดตามขอบเกรนหรือผ่าเกรนก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.12 ภาพขยายแสดงการผุกร่อนแบบ Stress Corrosion

ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อน

1. ความเค้น ต้องเป็นความเค้นแรงดึงซึ่งอาจเป็นความเค้นตกค้างในเนื้อวัสดุ ความเค้นมาจากภายนอก ความเค้นเนื่องจากความร้อนหรืออาจจะเกิดจากการเชื่อมก็ได้

2. สภาวะแวดล้อม

การกัดกร่อนแบบนี้ทำให้โลหะเกิดความเสียหาย เนื่องจาก cracking ที่เกิดขึ้นโดยการกระทำร่วมกันของสิ่งแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อการกัดกร่อนกับ tensile stress คำว่า tensile stress มุ่งคือความเค้นที่กระทำกับโลหะ (applied stress) และความเค้นภายใน (internal residual stress) ในบางกรณีความเค้นอาจเกิดจากการสะสมตัวของผลิตภัณฑ์อันเนื่องจากการกัดกร่อน ตัวอย่าง เช่น น็อตและสกรู เมื่อถูกวางไว้ในสิ่งแวดล้อมที่เอื้อต่อการกัดกร่อน ผลิตภัณฑ์การกัดกร่อนจะถูกสะสมตัวอยู่ระหว่างน็อตและสกรู อย่างไรก็ตามปริมาตรของผลิตภัณฑ์เหล่านี้มากกว่าปริมาตรดั้งเดิมของโลหะมันจึงทำให้เกิด tensile stress ขึ้นบนสกรูซึ่งก็จะเสียหายด้วยกระบวนการ cracking

การกัดกร่อนแบบนี้ปกติมีลักษณะพิเศษคือ

1. ปรากฏการณ์นี้จะเกิดเฉพาะในโลหะผสมเท่านั้น ในโลหะบริสุทธิ์ไม่เกิด

2. ประเภทของสิ่งแวดล้อมที่จะให้เกิดการแตกหักนั้นมีลักษณะเฉพาะตัว สำหรับโลหะผสมแต่ละชนิด

3. การอบชุบด้วยความร้อนทำให้โครงสร้างเปลี่ยนไปมีผลกับการแตกหัก

4. การป้องกันแบบคาโธดิกเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด

ตัวแปรที่มีอิทธิพลกับ stress corrosion cracking ได้แก่

- อุณหภูมิ
- องค์ประกอบสารละลาย
- องค์ประกอบของโลหะ- ขนาดของแรงเค้น
- โครงสร้างของโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การป้องกัน

1. ลดความเค้นในเนื้อโลหะลง หรือลดความเค้นที่กระทำกับผิวโลหะ
2. ลดความรุนแรงของสภาวะแวดล้อม
3. เลือกโลหะที่ทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน
4. ใช้การป้องกันแบบคาโธด
5. ใช้สารยับยั้ง

2.2.12 การกัดกร่อนแบบใต้ชั้นเคลือบ (filiform corrosion)

เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นภายใต้ชั้นเคลือบ เช่น การทาสีพลาสติกบนผิวเหล็กกล้าหรือการเคลือบแลกเกอร์บนผิวแผ่นเหล็กเคลือบดีบุก จัดเป็นการกัดกร่อนแบบ Crevice ประเภทหนึ่ง ซึ่งเป็นแบบ Under film corrosion พบได้กับโลหะที่มีการทาเคลือบผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อนทั่วผิวหน้า เช่น เหล็กกล้าคาร์บอน แมกนีเซียม และอลูมิเนียม ที่เคลือบผิวด้วยดีบุก เงิน ทอง ฟอสเฟต สีน้ำมันและแลกเกอร์

การกัดกร่อนแบบนี้มีผลให้สภาพผิวของชิ้นงานเสียไปเท่านั้น แต่ไม่ได้ทำความเสียหายแก่โครงสร้างของชิ้นงาน ดังนั้นงานที่ต้องการผิวที่ดี เช่นกระป๋องอาหาร รถยนต์ จึงต้องระวังปัญหาจาก *filiform corrosion* ภายใต้ผิวเคลือบจะเกิดการกัดกร่อนลุกลามเป็นบริเวณ ซึ่งเป็นผลจากการเกิดการกัดกร่อนภายใต้บริเวณจำกัดคือ ทำให้สนิมและอิเลคตรอนที่เกิดขึ้นวนเวียนอยู่ภายใต้ผิวเคลือบแล้วส่งผลต่อเนื่องให้เกิดเป็นบริเวณกว้างขึ้น การกัดกร่อนแบบบริเริ่มจากบริเวณหนึ่งซึ่งเรียกว่าส่วนหัว (active head) แล้วไปปรากฏสนิมเช่น สีน้ำตาลแดงของสนิมเหล็กในส่วนหาง (inactive tail) ดังนั้นปฏิกิริยาการกัดกร่อนดำเนินไปในบริเวณส่วนหัวสำหรับเหล็ก จะเกิดเป็นอิออนเหล็ก Fe^{2+} ที่จะให้ผลทดสอบสีน้ำเงินเขียวกับสารละลายไซยาไนด์ที่ใช้ทดสอบเฉพาะบริเวณหัวและจะเห็นคราบสนิมเหล็กที่บริเวณหาง

การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นเมื่อมีความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 65-90% ทั้งนี้ชนิดของการเคลือบผิว สีน้ำมันแลกเกอร์และโลหะชนิดที่ยินยอมให้น้ำซึมผ่านได้น้อยจะช่วยลดการเกิดFiliform corrosion นอกจากนั้นการขัดผิวโลหะก่อนการเคลือบก็มีผล เพราะพบว่าทิศทางการขยายตัวของการกัดกร่อนจะไปตามรอยขีดหรือรอยขัดผิวก่อนเคลือบ การกัดกร่อนแบบนี้เริ่มจากจุดหนึ่งบนผิวโลหะด้วยการซึมผ่านแบบออสโมซิส เพราะบริเวณนั้นมีอิออนเหล็ก (Fe^{2+}) เกิดขึ้นมาก่อนและมีความเข้มข้นสูง น้ำจากภายนอกจึงผ่านเข้ามาได้ในบริเวณ active head แต่ในส่วนของ active tail จะปรากฏสนิมเหล็กจะมีการซึมออกของน้ำออกไป ขณะนี้ออกซิเจนซึมผ่านแผ่นฟิล์มได้ทั่วผิว ในส่วนหางจะเกิดสภาพกรดจากการเกิดปฏิกิริยาของสนิมกับน้ำ ทำให้การกัดกร่อนเกิดการลุกลามได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การป้องกัน

1. เก็บชิ้นงานที่เคลือบผิวเสร็จแล้วในบริเวณที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ
2. เลือกวัสดุเคลือบผิวที่เหนียวเพราะจะช่วยให้ฟิล์มไม่แตกและการลุกลามไม่รุนแรง
3. เลือกใช้วัสดุเคลือบที่ยินยอมให้น้ำซึมผ่านได้น้อย

2.2.13 Graphitic Corrosion หรือ Graphitization

เป็นปัญหาของความเสียหายแบบการสูญเสียส่วนผสมบางตัว (selective leaching) อีกรูปแบบหนึ่งที่เกิดกับเหล็กหล่อเทา เมื่อถูกใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนพอสมควร (โดยสารละลายจะต้องไม่รุนแรงเกินไป) การกัดกร่อนจะเกิดขึ้นโดยเนื้อเหล็กหล่อเทาที่ผิวชั้นนอกถูกกัดกร่อนเหลือกราไฟต์ปรากฏให้เห็น จึงเข้าใจผิดเรียกว่า graphitization และบางคนก็เรียกผิด ๆ ว่า graphitic corrosion สาเหตุก็เพราะว่าในเหล็กหล่อเทา กราไฟต์จะมีขั้วเป็นแคโทดเมื่อเทียบกับเนื้อเหล็กที่มีขั้วเป็นแอโนด

การเกิด selective leaching โดยเนื้อเหล็กส่วนที่เป็นเนื้อโลหะหลัก (matrix) เป็นขั้วแอโนด (anode) จะถูกละลายออกไป ส่วนที่เป็นร่างแหกราไฟต์ซึ่งคือคาร์บอนจะแสดงตัวเป็นแคโทด (cathode) เหล็กจะถูกละลายออกไปเหลือมวลสารที่เป็นรูพรุนของ complex iron oxide โดยผลจะทำให้เหล็กหล่อเทาสูญเสียความแข็งแรงไปมากและสูญเสียคุณสมบัติของโลหะไปด้วย แต่มิติภายนอกจะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นถ้าไม่ตรวจสอบพบสภาพความบกพร่องก่อนจะเป็นสภาพที่ก่อให้เกิดอันตรายมากและขั้นตอนการเกิดจะช้าถ้าอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อน (corrosive) มาก ผิวทั้งหมดจะถูกชะละลายออกมา กลายเป็นการกัดกร่อนทั่วผิวหน้า (uniform attack) ส่วนเหล็กหล่อกราไฟต์กลม (nodular iron) และเหล็กหล่ออบเหนียว (malleable iron) จะไม่เกิด graphitization เพราะว่าไม่มีร่างแหของกราไฟต์ที่จะช่วยพยุงเนื้อเหล็กหล่อส่วนที่เหลือให้คงรูปร่างไว้ได้

2.3 เทคนิคในการตรวจสอบการสึกกร่อน

2.3.1 Mass Loss

เทคนิคนี้จะดูจากโลหะที่สูญเสีย (Metal loss) คือ อัตราการสูญเสียเนื้อโลหะจะบอกออกมาในรูป mils per year (mpy) ซึ่งน้ำหนักที่หายไปของอุปกรณ์ เครื่องมือ หรือชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่เป็นโลหะ โดยต้องทราบน้ำหนักก่อนใช้งานและน้ำหนักหลังจากการใช้งานของอุปกรณ์นั้นแล้ว เนื่องจากถ้าเกิดการกัดกร่อนที่ผิวโลหะจะทำให้น้ำหนักของโลหะนั้นลดลงได้ โดยปกติควรที่จะทำการตรวจเช็คหลังจากที่มีการใช้งานไปแล้ว 90 วันเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักและเพื่อที่จะได้ศึกษาถึงอัตราการสึกกร่อนที่เกิดขึ้นและชนิดของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 Resistance Measurements

เทคนิคนี้จะใช้การวัดความต้านทานเป็นตัวหาการกัดกร่อน โดยจะใช้ลวดเป็นตัวจุ่มลงไปในของเหลวในท่อ เมื่อถูกวัดความต้านทานที่ลวด ลวดถูกกัดกร่อน ความต้านทานก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าเกิดการกัดกร่อนเกิดขึ้นที่ลวดนั้น

2.3.3 Polarization Resistance

เทคนิคนี้จะเป็นการวัดกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการที่โลหะเกิดการกัดกร่อน ซึ่งจะอยู่ในรูปของแบบปริมาณของการกัดกร่อนต่อหน่วยเวลาและต่อหน่วยของพื้นที่หรือความหนาแน่นของกระแสนั่นเอง ซึ่งการเกิด polarization นั้นไม่เพียงขึ้นกับคุณสมบัติของโลหะเท่านั้นยังขึ้นกับชนิดของของเหลวหรือก๊าซและพื้นที่ของอุปกรณ์นั้น ๆ ด้วย

2.3.4 Acoustic Emission

เทคนิคนี้จะแตกต่างไปจากเทคนิคอื่น ๆ คือ เทคนิคนี้ใช้เสียงที่แตกต่างกันที่ปล่อยออกมาเมื่อเกิดการกัดกร่อนขึ้นในระบบ โดยเสียงเหล่านี้จะถูกบันทึกและเก็บเป็นข้อมูลว่ามีพารามิเตอร์ใดที่มีผลต่อการสึกกร่อน

2.3.5 Ultrasonic Examinations

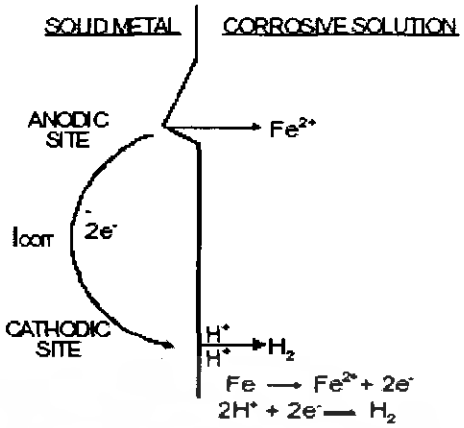
เครื่องมือทดสอบท่อโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูง เมื่อเกิดการกัดกร่อนขึ้นความหนาของท่อจะเปลี่ยนแปลงไป หลังจากนั้นเมื่อใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงทำการตรวจวัดความหนาของท่อที่เหลือจากการกัดกร่อนแล้วนำไปคำนวณหาความหนาของท่อที่เหลือ โดยที่จะใช้คลื่นความถี่เสียงนี้เป็นตัวอ้างอิงกับเวลาที่เสียงใช้ในการเดินทางไปและกลับ

2.4 Automated Corrosion Monitoring Techniques

2.4.1 Linear Polarization Resistance (LPR)

เป็นวิธีการคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate) โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งแปรผกผันกับกระแสที่เกิดจากการกัดกร่อน (I corr) โดยในช่วงสั้น ๆ จะมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรงดังนั้นเมื่อวัดค่าความต้านทานขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าได้ก็สามารถหาค่ากระแสที่เกิดจากการกัดกร่อนได้จากความสัมพันธ์แบบกราฟเส้นตรง ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน

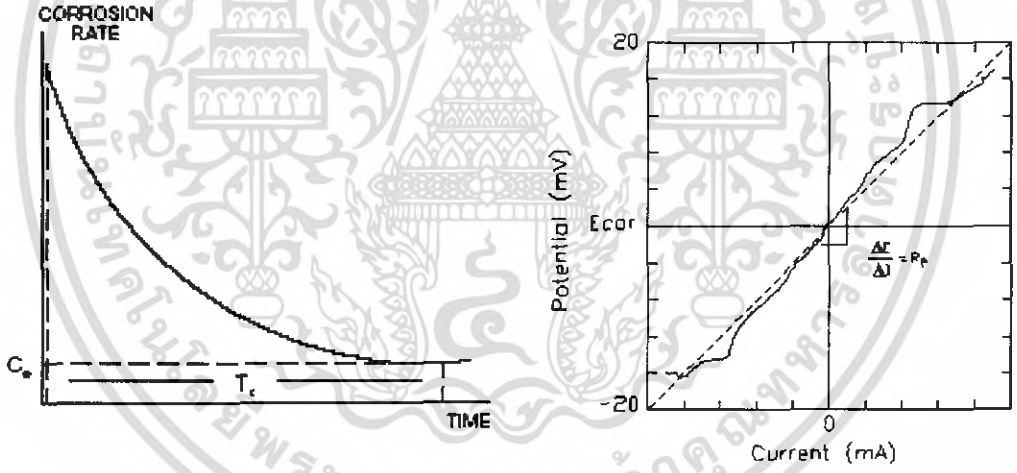
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โดย

$$C = \frac{I_{corr} \times E}{A \times D} \times 125.67 \quad (1)$$

where:
C = Corrosion rate in "mils per year" (MPY)
E = Equivalent weight of the corroding metal (g)
A = Area of corroding electrode (cm^2)
d = Density of corroding metal (g/cm^3)



ภาพที่ 2.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

2.4.2 Harmonic Distortion Analysis (HDA)

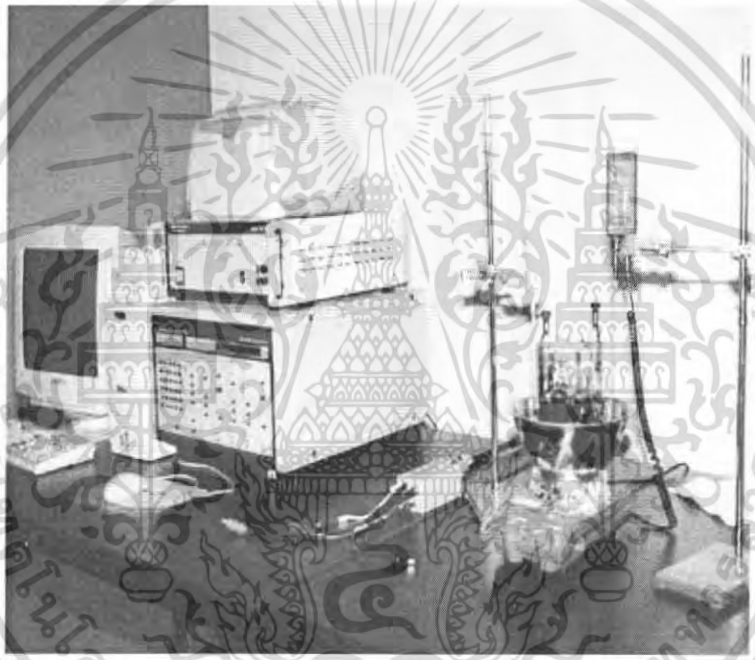
เป็นวิธีการคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate) ที่ถูกต้องและแม่นยำกว่าวิธี LPR โดยทำการวัดค่าความต้านทานของการกัดกร่อนของสารละลาย โดยใช้คลื่นความถี่ต่ำรูปแบบ sine wave มาประยุกต์ในการหาค่ากระแสที่เกิดจากการกัดกร่อน (I corr) และนำไปวิเคราะห์แบบ Harmonic รวมเข้ากับวิธีการวัดแบบ LPR เพื่อให้การคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน(Corrosion Rate) ที่ถูกต้องและแม่นยำขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
83144

2.4.3 Electrochemical Noise (ECN)

เป็นวิธีการตรวจสอบหาการกัดกร่อนที่เป็นแบบชนิดเฉพาะที่เจาะจง หรือชนิดที่ไม่มีรูปแบบแน่นอน โดยใช้การวิเคราะห์การแกว่งแบบกลับไปมาของเสียงที่เกิดจากกระแสของการกัดกร่อน (I corr) และแรงดันที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างโลหะกับสารละลายทีมีการสึกกร่อนเกิดขึ้น ซึ่งวิธีนี้นิยมใช้ในตรวจหาการกัดกร่อนที่เป็นชนิดแบบเฉพาะที่หรือชนิดที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน

2.5 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบพฤติกรรมและอัตราการกัดกร่อนของวัสดุ (Potentiostat and Galvanostat)



ภาพที่ 2.14 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบพฤติกรรมและอัตราการกัดกร่อนของวัสดุ

2.5.1 Potentiostat/Galvanostat

เป็นเครื่องมือสำหรับวัดค่าอัตราการกัดกร่อนของวัสดุในสิ่งแวดล้อม โดยการจำลองสภาวะการใช้งานจริง ยกตัวอย่างเช่น ชนิดของวัสดุ , สารเคมี , อุณหภูมิ เป็นต้น อาศัยหลักการผ่านค่ากระแสไฟฟ้าหรือค่าความต่างศักย์ให้กับระบบด้วยกรรมวิธีทางเคมีไฟฟ้าเพื่อที่จะทำการวัดความต่างศักย์หรือกระแสไฟฟ้าและนำมาคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อนตามกฎของฟาราเดย์ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ข้อมูลเบื้องต้นของเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 Hardware

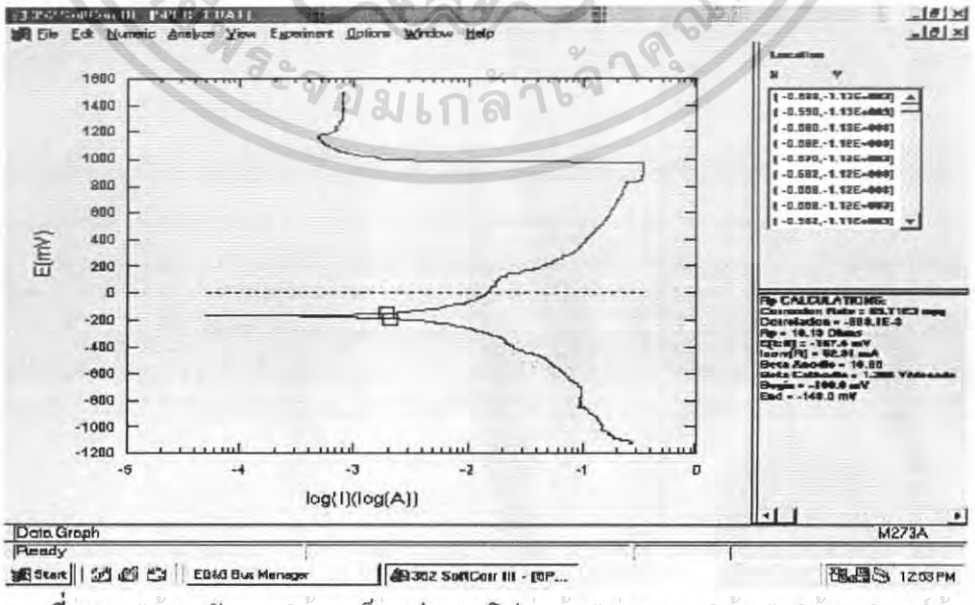
ประกอบด้วยเซลล์การกัดกร่อน 2 แบบ ได้แก่ flat cell สำหรับการกัดกร่อนที่อุณหภูมิห้อง และ V-cell สำหรับการกัดกร่อนที่อุณหภูมิต่างๆ ในแต่ละเซลล์การกัดกร่อนจะมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ ขั้วอ้างอิง (Reference Electrode) ขั้วที่สาม (Auxillary Electrode) สำหรับ flat cell จะใช้ Ag/AgCl เป็นขั้วอ้างอิง และแพลตินัมเป็นขั้วที่สาม ส่วน V-cell จะใช้ SCE (Saturated Calomel Electrode) เป็นขั้วอ้างอิงและกราไฟต์เป็นขั้วที่สามสำหรับขั้วทำงาน ซึ่งก็ ได้แก่วัสดุที่ต้องการหาค่าอัตราการกัดกร่อนในสารละลายที่ใช้งานจริง

2.5.3 Software

ประมวลผลด้วยโปรแกรม 352 SoftCorr III Version 3.6 ประกอบด้วยเทคนิคการทดลองต่างๆ ได้แก่ Linear Polarization , Tafel , Potentiodynamic , Cyclic Polarization , Potentiostatic , Reactivation , Ecorr vs Time , Galvanostatic และ Galvanic Corrosion นอกจากนี้ยังมีเทคนิคในการคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อนต่างๆ ได้แก่ Rp Calc , Quick Calc , Par Calc , Least Squares Fit และ Find Peak and Area

2.5.4 Potentiostat/Galvanostat

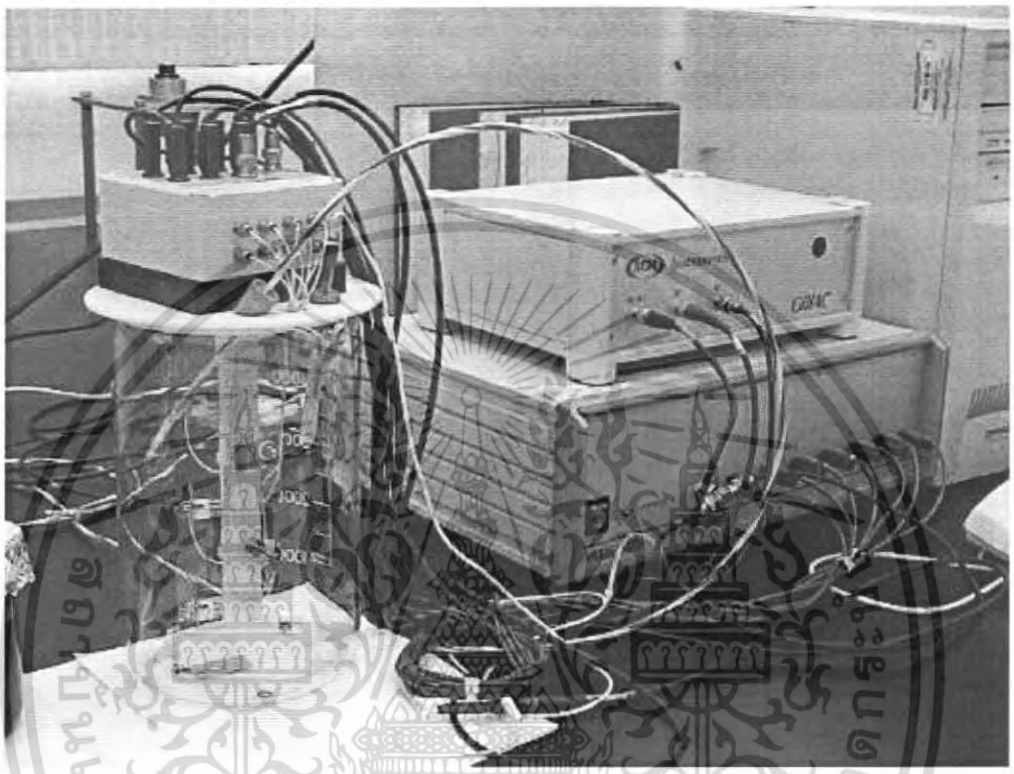
สามารถคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อนได้ในหน่วย mpy และ mmpy และศึกษาพฤติกรรมการการกัดกร่อนของวัสดุในสิ่งแวดล้อมต่างๆ ได้จาก Polarization Curve นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาค่า Ecorr และ Icorr จากเทคนิคต่างๆ ได้อีกด้วย



ภาพที่ 2.15 แสดงลักษณะการพล็อตค่าของโปรแกรม 352 SoftCorr III Version 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบพฤติกรรมและอัตราการกัดกร่อนที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ (Multi Potential Test System)



ภาพที่ 2.16 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบพฤติกรรมและอัตราการกัดกร่อนที่ต่างศักย์

2.6.1 MPT (Multipotential Testing)

เป็นเครื่องมือสำหรับวัดค่าอัตราการกัดกร่อนของวัสดุในสิ่งแวดล้อมโดยการจำลองสภาวะการใช้งานจริง ยกตัวอย่างเช่น ชนิดของวัสดุ, สารเคมี, อุณหภูมิ เป็นต้น โดยอาศัยหลักการวิธีทางเคมีไฟฟ้า

2.6.2 Hardware ประกอบด้วยส่วนหลัก 4 ส่วน ได้แก่

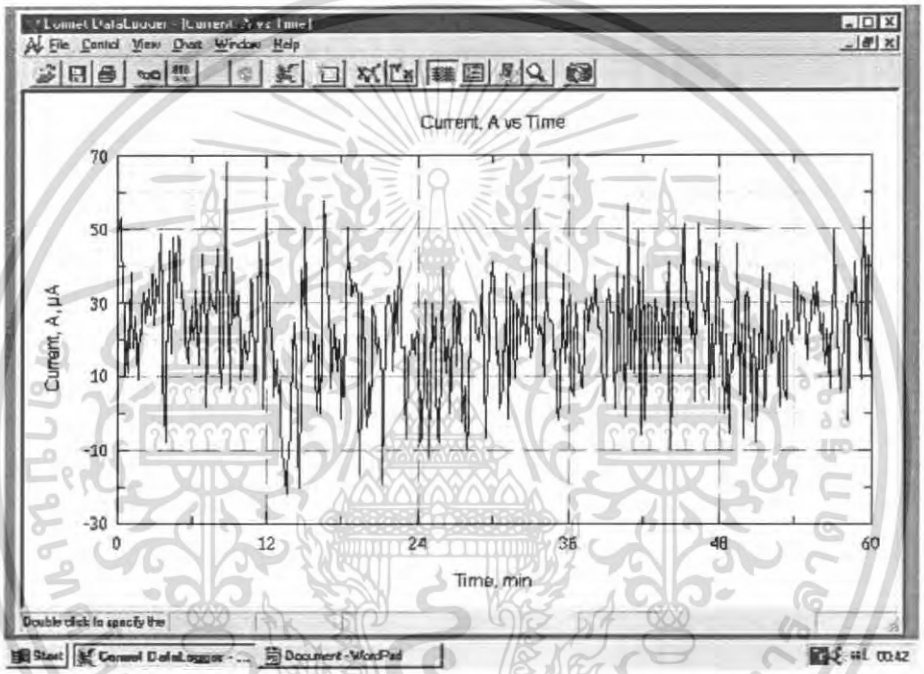
- MPT Unit
- Potentio stat สำหรับจ่ายความต่างศักย์
- Measurement Unit ประกอบด้วยแกนใส่ชิ้นงานทดสอบ ซึ่งสามารถใส่ชิ้นงานทดสอบได้สูงสุด 7 ชิ้นงานต่อ 1 การทดลอง ขั้วอ้างอิงชนิด Ag/AgCl และ Temperature Sensor
- Computer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 Software ประมวลผลด้วยโปรแกรม Datalogger 2.44 MPT

2.6.4 ขีดความสามารถของเครื่อง

MPT (Multipotential Testing) สามารถทดสอบการกัดกร่อนได้ทั้งที่อุณหภูมิห้อง และสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ นอกจากนี้ยังสามารถทดสอบชิ้นงานได้สูงสุด 7 ชิ้นงานต่อ 1 การทดลอง จึงช่วยให้ประหยัดเวลาและสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการเปรียบเทียบคุณภาพของวัสดุ



ภาพที่ 2.17 การพล็อตค่าระหว่างกระแสกับเวลาของโปรแกรม Datalogger 2.44 MPT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบอัตราการกัดกร่อนชนิดเคลื่อนที่ (Portable Corrosion Rate Test System)

ภาพที่ 2.18 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบอัตราการกัดกร่อนชนิดเคลื่อนที่

เทคโนโลยีในการตรวจจับหรือตรวจสอบการกัดกร่อนของโลหะ ได้ถูกพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะเทคนิคการตรวจสอบที่ต้องการทราบผลในระยะเวลาอันสั้น เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการประเมินสภาพของโลหะที่กำลังใช้งาน และสามารถตรวจสอบการกัดกร่อนที่เวลาจริง (Real time) และเนื่องจากการทดสอบการกัดกร่อนด้วยเทคนิคอื่น โดยส่วนมากจำเป็นต้องนำชิ้นงานและสารละลายมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ในการทดลองต้องตั้งค่าตัวแปรต่าง ๆ ให้ใกล้เคียงกับสภาวะการใช้งานจริงของวัสดุนั้น ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดลองจึงอาจจะไม่ตรงกับความเป็นจริง

เครื่องทดสอบ Portable corrosion test system สามารถให้บริการตรวจสอบการกัดกร่อนในบริเวณที่ทำงานจริงได้ (หน้างาน) โดยเครื่องมือดังกล่าวได้นำเทคนิค Coupons , เทคนิค LPR (linear polarization resistance measurements) และ E/R (electrical resistant resistance measurements) มาประยุกต์เข้าด้วยกันเพื่อประสิทธิภาพและความแม่นยำของผลการตรวจสอบ

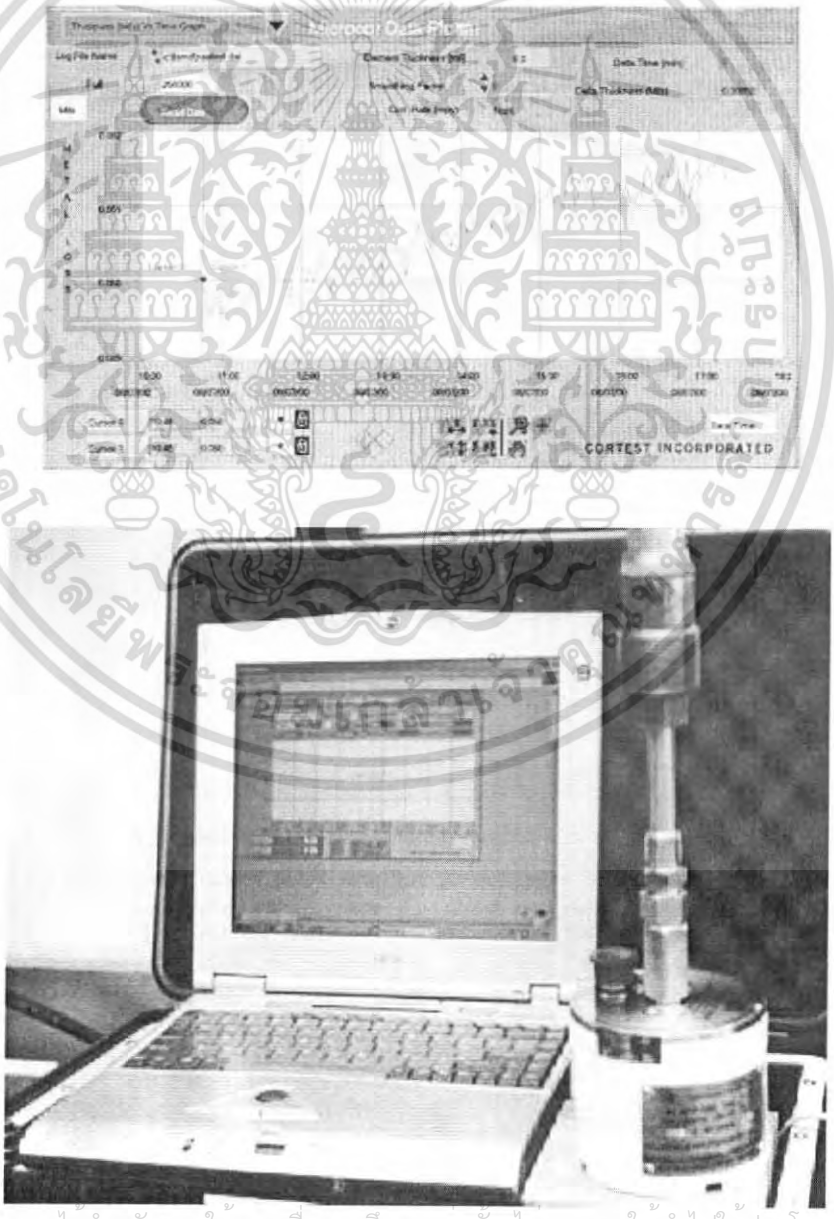
อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบประกอบด้วยโพรบ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีเกรดเดียวกันหรือใกล้เคียงกับวัสดุที่ใช้งานจริง โดยโพรบที่ใช้ในการทดสอบสามารถทนแรงดันได้ถึง 3,600 psi (24.8 MPa) และทนอุณหภูมิได้ประมาณ230องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 เทคนิคการทดสอบนี้สามารถนำไปประยุกต์ในการตรวจสอบการกัดกร่อนต่าง ๆ ได้ดังนี้

- Underground corrosion เช่น ท่อที่ฝังอยู่ใต้ดินและมีของไหลอยู่ภายใน
- Erosion monitoring ประยุกต์ใช้ในการวัดผลที่เกิดจากความเร็วของสารละลายต่อค่าอัตราการกัดกร่อน
- Atmospheric corrosion วัดอัตราการกัดกร่อนของวัสดุเมื่อสัมผัสอยู่กับบรรยากาศทั่วไป
- นอกจากนั้นยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการได้

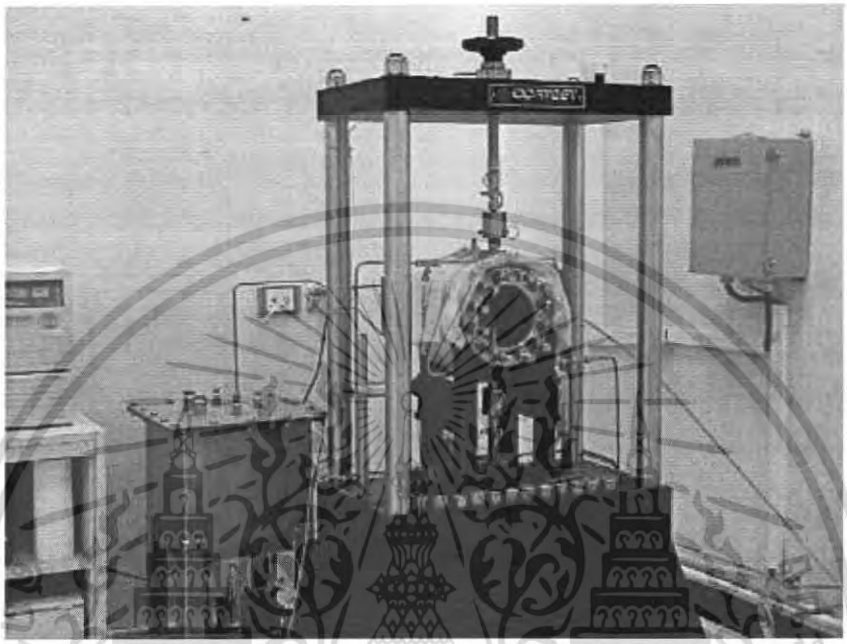
ค่าที่ได้จากการตรวจสอบจะอยู่ในรูปของโลหะที่สูญเสีย (Metal loss) คือ อัตราการสูญเสียเนื้อโลหะเช่น จะบอกออกมาในรูป mils per year (mpy) เป็นต้น



ภาพที่ 2.19 ลักษณะของโปรแกรม Microcor Data Ploter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนของวัสดุเนื่องจากความล้าและพฤติกรรมการกัดกร่อนของวัสดุเมื่อมีการยืดตัวอย่างช้า ๆ (Corrosion Fatigue Test and Slow Strain Rate Test)



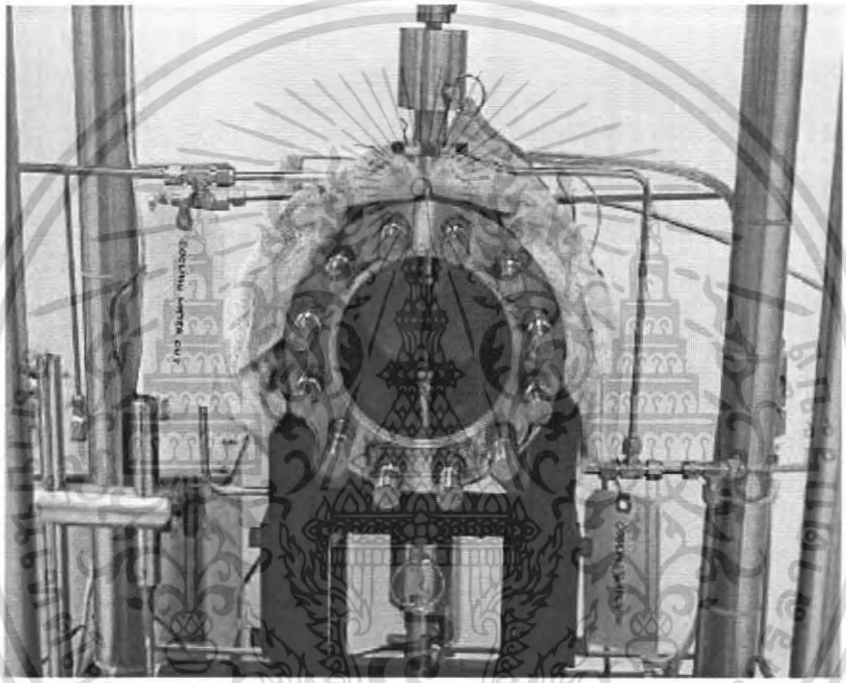
ภาพที่ 2.20 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบพฤติกรรมการกัดกร่อนของวัสดุเนื่องจากความล้า

เครื่องทดสอบการกัดกร่อนเนื่องจากความล้า (Corrosion fatigue) จะนำมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุ เมื่ออยู่ในสภาวะได้รับความเค้นทางกลแบบคาบ (Cycli load) และสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน (corrosive media) จะทำให้วัสดุมีความเสี่ยงต่อความเสียหายที่เรียกว่า การกัดกร่อนเนื่องจากความล้า (corrosion fatigue) หรือใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของวัสดุเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีการยืดตัวต่ำๆ (slow strain rate test (SSRT)) นอกจากนั้นยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบพฤติกรรมของวัสดุในลักษณะอื่น ๆ ได้ เช่น ศึกษาความเสียหายที่เกิดจากความเค้นร่วมกับการกัดกร่อน (stress corrosion cracking) ศึกษาความเสียหายของวัสดุที่เกิดจากสารไฮโดรเจน (hydrogenembrittlement) ได้แก่ตัวอย่างชิ้นงานที่สัมผัสอยู่กับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H2S) แก๊สไฮโดรคาร์บอน หรือปิโตรเลี่ยม เป็นต้น นอกจากนั้นยังสามารถนำเครื่องมืออื่นมาร่วมตรวจสอบได้ เช่นในการวัดหาค่าอัตราการกัดกร่อนซึ่งจะเหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โรงไฟฟ้า หรืออุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่ชิ้นงานอยู่ภายใต้สภาวะดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 การทดสอบ Corrosion Fatigue และ SSRT สามารถปรับเงื่อนไขตัวแปรในการตรวจสอบได้ดังนี้

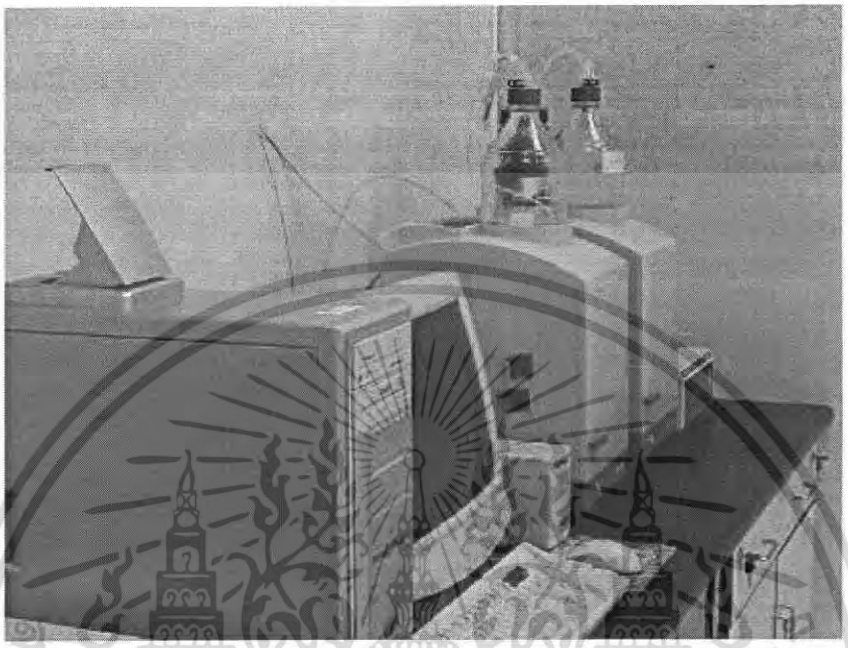
1. สามารถปรับอุณหภูมิทดสอบภายใน autoclave ได้สูงสุดประมาณ 400 C
2. สามารถปรับแรงดันภายใน autoclave ได้สูงสุดประมาณ 4,000 psi (~28Mpa)
3. ค่า strain rate 10-5 ถึง 10-7 ต่อวินาที
4. ค่า maximum load สำหรับชุดทดสอบ SSRT ประมาณ 30 kN
5. สามารถเติม corrosive media ภายใน autoclave ได้ทั้งที่เป็นของเหลวและแก๊ส



ภาพที่ 2.21 การทดสอบ Corrosion Fatigue และ SSRT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบหาปริมาณอิออนลบและอิออนบวก (Ion Chromatography)



ภาพที่ 2.22 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบอิออนลบและอิออนบวก

2.9.1 IC (Ion Chromatography)

เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่อยู่ในรูปของประจุ โดยมีความสามารถในการแยกและวิเคราะห์ประจุบวกและประจุลบสำหรับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในสารละลาย โดยอาศัยหลักการของ Liquid Chromatography และประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

2.9.2 Hardware

ประกอบด้วย Injection valve , Double Piston Pump ซึ่งมีอัตราการไหลอยู่ในช่วง 0.2-2.5 mL/min ความดันสูงสุด 25 MPa , Pulsation Damper , Column Chamber , Column , Suppressor , Peristaltic Pump ซึ่งมีอัตราการไหลอยู่ในช่วง0.5-0.6mL/minและDetector

2.9.3 Software

ประมวลผลด้วยโปรแกรม IC Net Version 2.1 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ

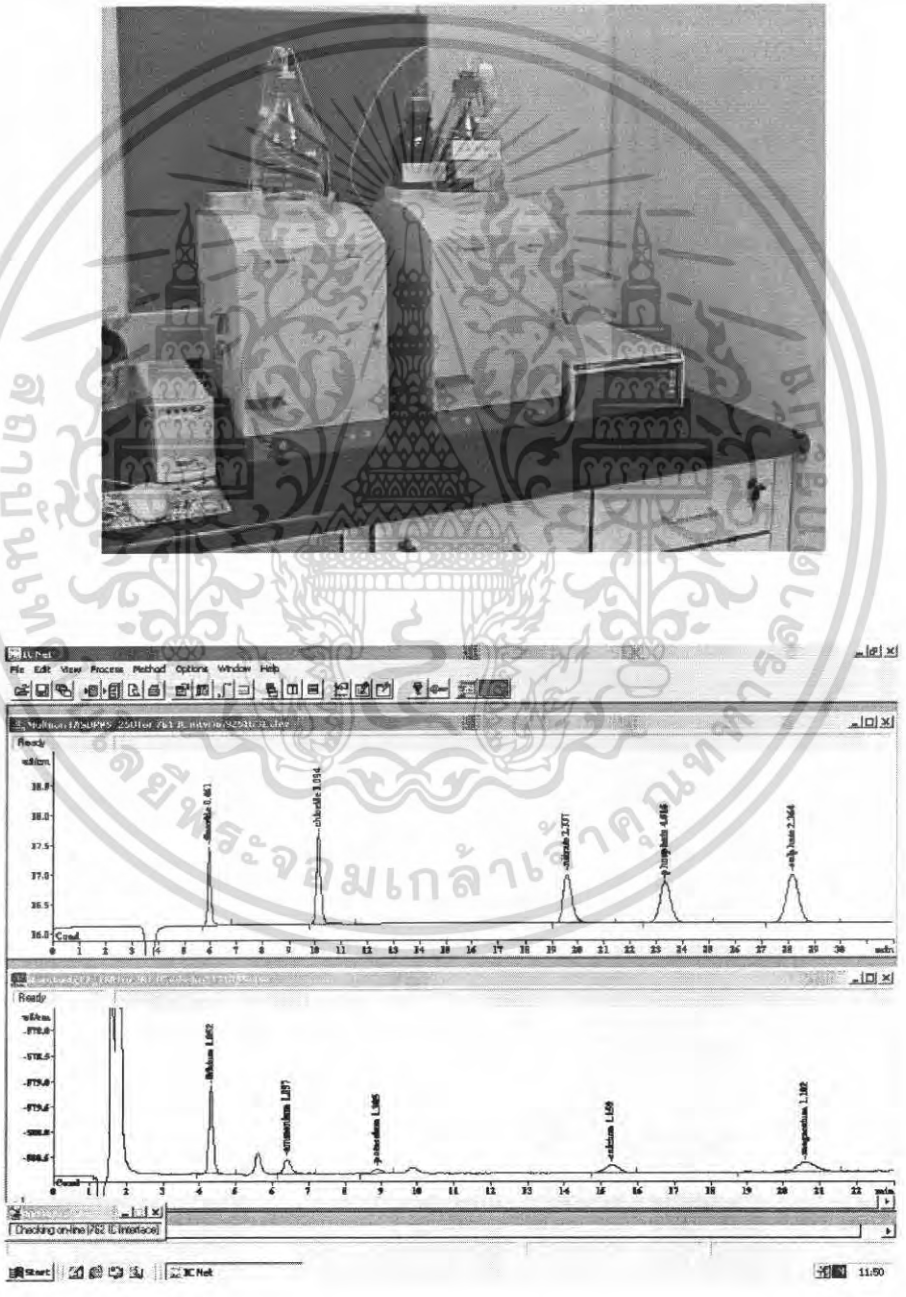
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.4 ขีดความสามารถของเครื่อง

761 Compact IC สามารถแยกและวิเคราะห์ธาตุได้ในระดับ ppm , ppb และ ppt โดยธาตุที่สามารถวิเคราะห์ได้มีดังนี้

ประจุลบ (Anions) : Fluoride (F-) , Chrolide (Cl-) , Nitrate (NO3-) , Phosphate (PO43-) และ Sulfate (SO42-)

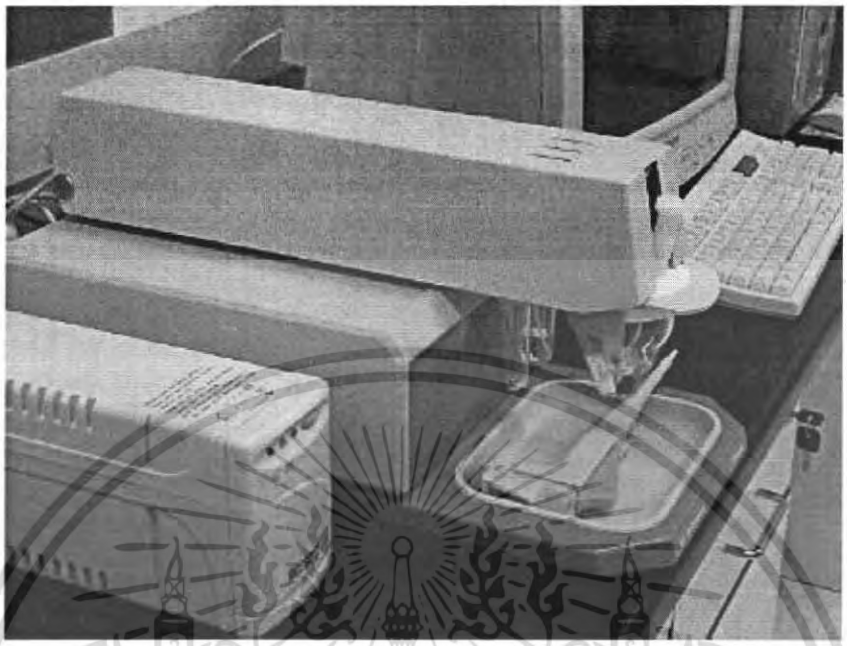
ประจุบวก (Cations) : Lithium (Li+) , Ammonium (NH4+) , Potassium (K+) , Magnesium (Mg2+) และCalcium (Ca2+)



ภาพที่ 2.23 การแสดงผลของโปรแกรม IC Net Version 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบหาปริมาณโลหะหนัก (Vatammetry)



ภาพที่ 2.24 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบหาปริมาณโลหะหนัก

2.10.1 VA (Voltammetry)

เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในสารละลาย โดยอาศัยหลักการของวิธีเคมีไฟฟ้าและประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

2.10.2 Hardware

ส่วนหลักประกอบด้วยขั้วอ้างอิง (Reference Electrode) ได้แก่ Ag/AgCl ขั้วทำงาน (Working Electrode) ได้แก่ ปรอท (Mercury) ขั้วที่สาม (Auxillary Electrode) ได้แก่แพลตินัม (Platinum) และแท่งกวนสารตัวอย่าง (Stirrer Tip) เพื่อกวนสารตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกันตลอดเวลา

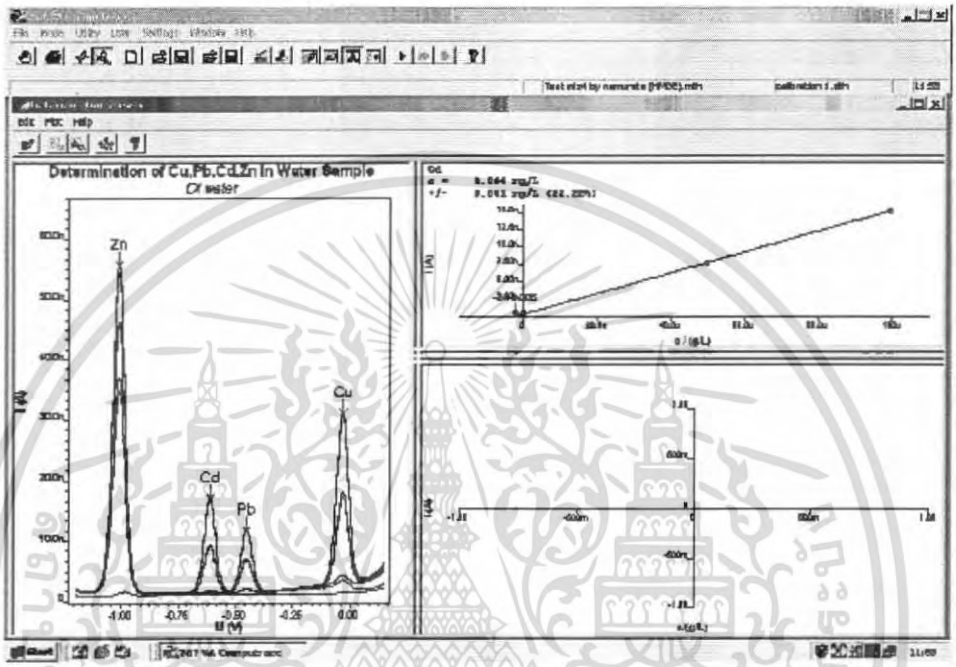
2.10.3 Software

ประมวลผลด้วยโปรแกรม VA Computrace Version 2.0.000 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.4 ขีดความสามารถของเครื่อง

757 VA Computrace สามารถแยกและวิเคราะห์โลหะหนักได้ในระดับ ppm , ppb และ ppt ซึ่งโลหะหนักที่สามารถวิเคราะห์ได้มีดังนี้ Arsenic (As) , Iron (Fe) , Mercury (Hg) , Nickle (Ni) , Copper (Cu) , Cadmium (Cd) , Zinc (Zn) , Cobalt (Co) และ Lead (Pb)



ภาพที่ 2.25 การแสดงผลของโปรแกรม VA Computrace

2.11 เครื่องทดสอบด้วยหมอกเกลือ (Salt Fog Test)

ภาพที่ 2.26 เครื่องทดสอบด้วยหมอกเกลือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นวิธีการทดสอบการกัดกร่อนของวัสดุโดยการเร่งให้เกิดการกัดกร่อน(Accelerated tests) เพื่อวิเคราะห์หาความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนของโลหะชนิดต่าง ๆ หรือเพื่อทำการศึกษาความสามารถในการปกป้องผิวหน้าของวัสดุ ที่เคลือบผิวโลหะด้วยสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ เป็นการประเมินประสิทธิภาพของวัสดุ เมื่อจะนำไปใช้ในสภาวะการใช้งานจริง และเพื่อให้ได้รับการยอมรับตามมาตรฐานหรือเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผิวเคลือบแต่ละชนิด

การทดสอบการพ่นด้วยไอเกลือหรือหมอกเกลือ (Salt Fog (spray)) สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทดสอบความผิดปกติหรือความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงของการผลิต มาตรฐานที่กำหนดขึ้นเพื่อช่วยในการตัดสินใจคัดเลือกชิ้นงานให้อยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งลูกค้าเองสามารถกำหนดเงื่อนไขในการทดสอบได้ตามความพอใจ เช่นชนิดและปริมาณสารละลาย จำนวนรอบและเวลาของการพ่น รวมทั้งอุณหภูมิเป็นต้น

Salt fog (spray) test นำไปประยุกต์ใช้ในการทดสอบต่าง ๆ ดังนี้

- organic coating testing
- organic film testing
- galvanize conversion coating
- cadmium coating
- copper, tin , galvalume , galvanneal , galfan , aluminized steel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
หลักการ

3.1 การผุกร่อนของเครื่องจักรที่เกิดจากน้ำ

การผุกร่อนของเครื่องจักรที่เกิดจากน้ำเป็นเรื่องราวเกี่ยวกับสาเหตุ และการควบคุมการผุกร่อนของโลหะที่พบได้โดยทั่ว ๆ ไปในระบบที่ใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งในท่อขนาดใหญ่ (Pipes) ท่อขนาดเล็กที่ไม่มีรอยต่อ (Tubes) คอยล์ (Coils) แทงค์น้ำ (Water Boxes) และคูลลิ่งเทาเวอร์ (Cooling Tower) ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะมีการป้องกันมิให้เกิดการผุกร่อนเกิดขึ้น ในแต่ละระบบของคูลลิ่งเทาเวอร์มักจะมีการรวมเอาโลหะ , การไหลเวียนของน้ำ , อุณหภูมิ และคุณภาพน้ำเดิมไว้ด้วยกันโดยยังมิได้คำนึงถึงมาตรการการควบคุมการผุกร่อน ขั้นแรกสุดในการเลือกวิธีการคือจะต้องระบุชัดถึงโลหะทั้งหมดในระบบก่อน จากนั้นต้องทราบถึงข้อจำกัดและสารที่จะยับยั้งการผุกร่อน สุดท้ายจึงจะเลือกว่าควรลงทุนกับสารยับยั้งตัวใด อย่างไรก็ตาม สิ่งแรกสุดที่ควรจะทราบคือ การทำความเข้าใจ

ในที่นี้เราจะพิจารณาเพียงการผุกร่อนของโลหะที่เกิดจากน้ำเท่านั้น ซึ่งมักจะประกอบไปด้วยปฏิกิริยาทางเคมี-ไฟฟ้าเสมอ ดังแสดงในภาพที่ 3.1 ไฟฟ้าจะไหลเวียนอยู่ระหว่างโลหะผ่านทางสารละลาย การผุกร่อนจะเกิดขึ้นแทนที่อิเลคตรอนที่วิ่งออกจากโลหะและอิออนที่วิ่งเข้าสู่สารละลาย ซึ่งเราเรียกว่า แอโนด ส่วนแคโทดจะเป็นส่วนที่อิเลคตรอนวิ่งกลับเข้าสู่โลหะนั่นเอง ในขณะเดียวกันสารละลายที่เป็นตัวนำทางไฟฟ้า (อิเลคโตรไลท์) และอิเลคโตรดทั้งสอง (แอโนดและแคโทด) จะต้องเป็นทางเดินของอิเลคตรอนเพื่อที่จะทำให้ครบวงจรทางไฟฟ้า โครงสร้างของโลหะในตัวของมันเองอาจจะเป็นทางเดินของอิเลคตรอนก็ได้ หรืออาจจะครบวงจรทางไฟฟ้าได้จากการสัมผัสทางกายภาพระหว่างโลหะก็ได้ ตัวอย่างที่ง่ายที่สุดคือ การผุกร่อนทางไฟฟ้า (Galvanic Corrosion) ของโลหะ 2 ชนิด ที่ไม่เหมือนกัน หรือตัวอย่างที่เราคุ้นเคยกันดีคือ การหมุนท่อเหล็กกล้าเข้าไปในทองแดงที่มีขนาดพอดี และการแลกเปลี่ยนความร้อนของเหล็กกล้าอ่อนที่บรรจุอยู่ในท่อทองเหลือง เซลล์ที่มีการผุกร่อนแสดงไว้ในภาพที่3.1 หลังจากที่อะตอมของเหล็กที่เป็นกลางสูญเสียอิเลคตรอนไป 2 ตัวแล้วจะกลายเป็นอิออนของเหล็ก Fe++ ในสารละลายอิเลคโตรไลท์ อิเลคตรอนจะไหลผ่านโลหะไปยังแคโทดและกลับเข้าสู่อิเลคโตรไลท์ซึ่งจะไปรวมกับอิออน ของไฮโดรเจนที่มีประจุบวก 2 ตัวในอิเลคโตรไลท์ ผลก็คือโมเลกุลของไฮโดรเจนจะกลายเป็นแก๊ส

ถ้าโครงสร้างอย่างง่ายข้างต้นนี้เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด ระบบควรจะเข้าสู่สมดุลและการผุกร่อนควรจะหยุดลง เรียกสภาวะเช่นนี้ว่า พาสซิเวชั่น (Passivation) อย่างไรก็ตามจะเกิดปฏิกิริยาเข้ามาแทนที่การเปลี่ยนแปลงของอิออน ไฮโดรเจนจากอิเลคโตรไลท์ที่แคโทด (ทำให้เกิดโมเลกุลของไฮโดรเจนขึ้น) จะปล่อยอิออนของไฮดรอกไซด์ (OH) ออกมา ซึ่งจะมาทำปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

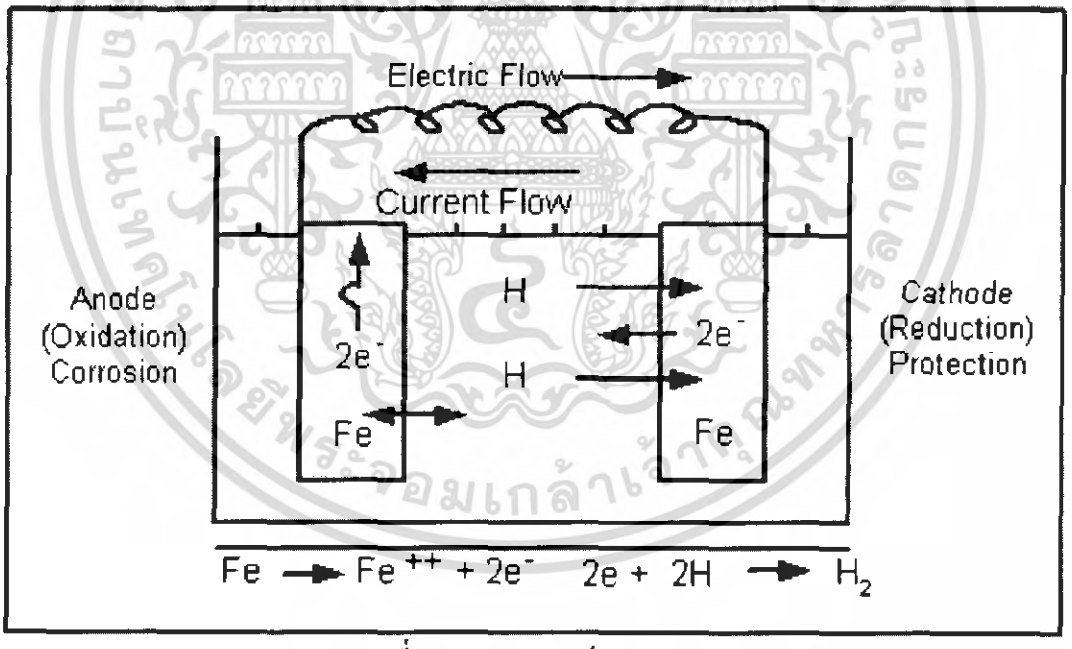
กับอิออนของเหล็กในสารละลายได้เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ออกมา ออกซิเจนจะถูกเพิ่มเข้าไปในน้ำด้วยระบบเปิดที่คล้ายกับคูลลิ่งเทาเวอร์ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อไป สารละลายของออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่แอโนด ทำให้ได้เฟอร์ริดไฮดรอกไซด์ซึ่งสามารถละลายได้น้อยกว่าเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ที่แคโทด สารละลายของไฮโดรเจนทำปฏิกิริยากับสารละลายของออกซิเจนทำให้เกิดน้ำขึ้นมา ภาพรวมของการผุกร่อนทางไฟฟ้าในปัจจุบันของออกซิเจนจะเหมือนกับภาพที่ 3.1 ดังปฏิกิริยาเหล่านี้ ซึ่งแสดงไว้ในสมการ

$$Fe^{++} + 2OH^- \longrightarrow Fe(OH)_2$$

$$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \longrightarrow 4Fe(OH)_3$$

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \longrightarrow 4OH^-$$

$$4H^+ + 4OH^- \longrightarrow 4H_2O$$



ภาพที่ 3.1 แสดงเซลล์การผุกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การผุกร่อนทางไฟฟ้า

ลำดับทางไฟฟ้าดังตารางที่ 3.1 จะช่วยให้วิศวกรสามารถทำนายได้ว่าโลหะจะผุกร่อน เมื่อมีการสัมผัสกันของโลหะที่ต่างชนิดกันกรณีที่พบมากที่สุดคือโลหะที่อยู่ด้านบนของตารางจะผุกร่อน ส่วนโลหะที่อยู่ด้านล่างของตารางจะไม่ผุกร่อน ลำดับทางการไฟฟ้านี้จะทำนายได้เฉพาะการผุกร่อนที่จะเกิดขึ้นเท่านั้นว่าโลหะใดจะเกิดการผุกร่อน ส่วนอัตราการผุกร่อนจะหาได้จากการพิจารณาเงื่อนไข ดังต่อไปนี้

- โลหะชนิดใด ที่เป็น คู่กันทางไฟฟ้า
- ความสัมพันธ์ของพื้นที่ผิวที่เป็นแอโนดกับ แคโทด
- ถ้าแคโทดมีขนาดใหญ่กว่าแอโนด จะทำให้มีอัตราการผุกร่อนสูง
- ถ้าแคโทดมีขนาดเล็กกว่าแอโนด จะทำให้มีอัตราการผุกร่อนต่ำ
- ถ้าแอโนดมีขนาดใหญ่ จะทำให้เกิดการผุกร่อนแบบเป็นแผ่น
- ถ้าแอโนดมีขนาดเล็ก จะทำให้เกิดการผุกร่อนแบบเป็นหลุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ลำดับทางไฟฟ้าของโลหะทั่วไปที่พบในระบบน้ำหล่อเย็น

Active (Corroded) End

Magnesium
Magnesium Alloys
Zinc
Galvanized Steel

Aluminum 1100

Aluminum 6053
Alclad

Cadmium

Aluminum 2024 (4.5 cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn)
Mild Steel
Wrought Iron
Cast Iron

13% Chromium Stainless Steel Type 410 (Active)

18 - 8 Stainless Steel Type 304 (Active)
18 - 12 - 3 Stainless Steel Type 316 (Active)

Lead - Tin Solders
Lead
Tin

Muntz Metal
Managanese Bronze
Naval Brass

Nickel (Active)
76 Ni - 16 Cr - 7 Fe alloy (Active)

60 Ni - 30 Mo - 6 Fe - 1 Mn

Yellow Brass
Admiralty Brass
Aluminum Brass
Red Brass
Copper
Silicon Bronze

70 - 30 Cupro Nickel
G - Bronze
M - Bronze
Silver Solder
Nickel (Passive)
76 Ni - 16 Cr - 7 Fe Alloy (Passive)
67 Ni - 33 Cu Alloy (Monel)

13% Chromium Stainless Steel Type 410 (Passive)
Titanium

18 - 8 Stainless Steel Type 304 (Passive)
18 - 12 - 3 Stainless Steel Type 316 (Passive)

Silver

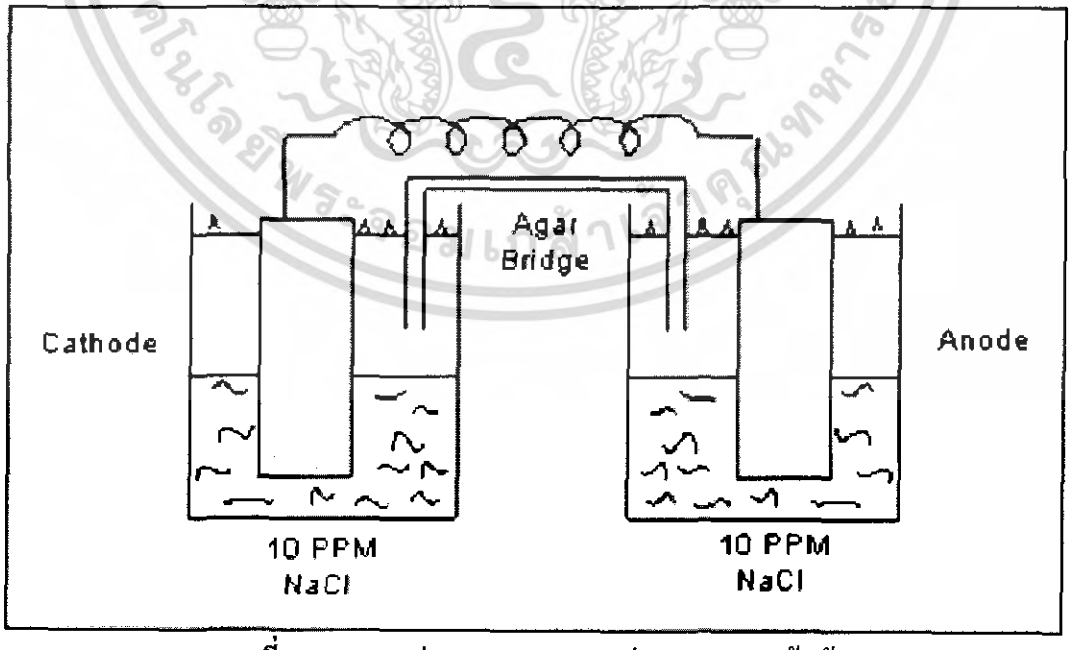
Graphite
Gold
Platinum

Noble or Passive
(Protected) End

ไม่จำเป็นที่จะต้องมีโลหะที่ต่างชนิดกันในระบบที่เกิดการผุกร่อน โลหะหลาย ๆ ชนิดเช่น เหล็กชนิดพิเศษ สามารถที่จะมีพื้นที่ที่เป็นทั้งแอโนดและแคโทดได้ในเวลาเดียวกัน ความแตกต่าง

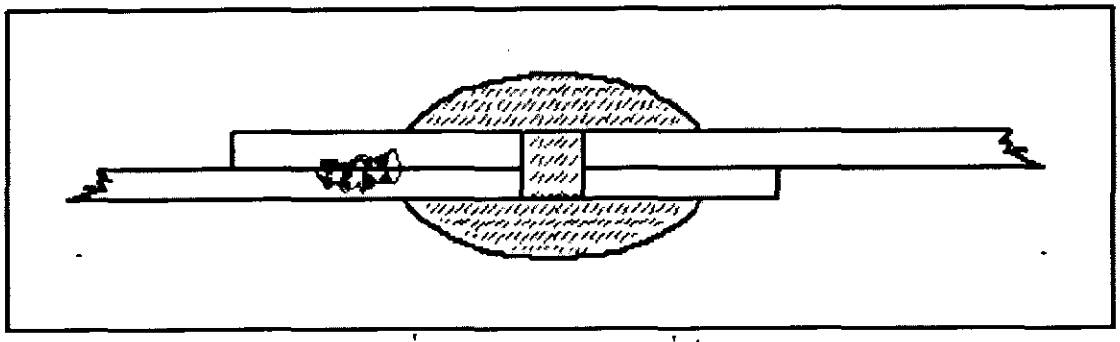
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของระดับแรงดันไฟฟ้าระหว่างพื้นที่ที่เป็นแอโนดและแคโทดในโลหะชิ้นเดียวกัน เป็นผลจากขอบเขตของเกรน (Grain) การกลับตัวของเกรน, ความแตกต่างของขนาดเกรน, ความแตกต่างในการปฏิบัติทางอุณหภูมิ, ความขรุขระของพื้นผิว, รอยขีดข่วน, ความแตกต่างของความเครียด (Strain) เป็นต้น เมื่อมีอิเลคโตรไลท์ท่วมโลหะกระแสจะไหลจากพื้นที่ที่เป็นแอโนดไปยังแคโทดและทำให้เกิดการผุกร่อนขึ้น แอโนดและแคโทดจะเป็นเหมือนกับเซลล์ทางไฟฟ้า โลหะจะมีรูปแบบทางเดินอิเลคตรอนของมันเองในเซลล์ทางไฟฟ้า ไม่ว่าจะเกิดรูปแบบการผุกร่อนมากหรือน้อยก็ตามจะทำให้เกิดการงอขึ้น ซึ่งเป็นผลให้เกิดหลุมในชิ้นโลหะแม้แต่โลหะที่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมดก็สามารถผุกร่อนได้ ถ้ามันจมอยู่ในของเหลวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน แนวความคิดเดิมของเซลล์ที่รวมตัวกันแสดงในภาพที่3.2 โดยปกติก้อนแร่ตัวอย่างในสารละลายเข้มข้นสูงซึ่งเป็นแอโนดจะถูกส่งผ่านไปยังก้อนแร่ตัวอย่างในสารละลายที่เข้มข้นต่ำ โดยพื้นฐานแล้วเซลล์จะรวมตัวกันในร่องหรือพื้นที่ปิด เช่นตะกอน ปรากฏการณ์นี้เป็นที่รู้จักในการผุกร่อนชนิดที่เป็นร่อง และได้อธิบายไว้ในภาพที่3.3 นอกเหนือจากร่องที่กล่าวมาแล้วยังมีตัวอย่างอื่นอีกเช่นพื้นที่เปียกชื้นของหมุดเหล็ก 2 ตัวที่ เหลื่อมกันอยู่เป็นตัวขัดขวางการแพร่ของออกซิเจน ผลก็คือจะเกิดออกซิเจนปริมาณสูงในส่วนที่เป็นน้ำและออกซิเจนปริมาณต่ำในส่วนที่เป็นร่อง ซึ่งเป็นสาเหตุให้เซลล์รวมตัวกันถ้าโลหะนี้เป็นเหล็กกล้าพื้นที่ที่มีความเข้มข้นต่ำจะเป็นแอโนด ถ้าเป็นทองแดงก็จะเป็นแคโทด การผุกร่อนจะเกิดขึ้นได้นั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีเซลล์เคมี-ไฟฟ้า การป้องกันการผุกร่อนก็คือการทำลายเซลล์นั่นเอง ตัวอย่างเช่น การสร้างเครื่องขัดขวางการนำทางไฟฟ้าระหว่างโลหะและอิเลคโตรไลท์ เป็นต้น



ภาพที่ 3.2 การผุกร่อนจากความแตกต่างของความเข้มข้น

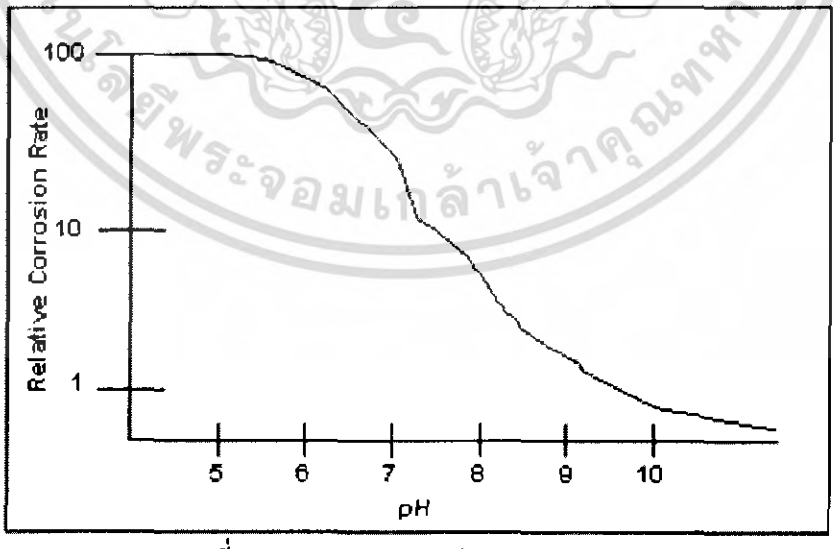
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 การผุกร่อนชนิดที่เป็นร่อง

3.3 แนวความคิดในการควบคุมการผุกร่อน

อัตราการทำลายจากการไหลเวียนของน้ำหล่อเย็นบนเหล็กกล้า เป็นฟังก์ชั่นของอุณหภูมิและค่า pH คือเพิ่มตามอุณหภูมิและค่า pH ที่ลดลง การป้องกันการผุกร่อนจะเป็นไปตามกฎ 2 ข้อ คือ 1. ค่า pH สูง ๆ จะส่งเสริมให้เกิดตะกรันเป็นตัวช่วยยับยั้งการผุกร่อน 2. ค่า pH ต่ำ ๆ จะยับยั้งการเกิดตะกรันและช่วยส่งเสริมให้เกิดการผุกร่อน ดังภาพที่ 3.4 อธิบายถึงอัตราการผุกร่อนที่เกิดกับเหล็กกล้าอ่อนที่ไม่มีการป้องกันในน้ำ อันเป็นผลจากค่า pH การควบคุมการผุกร่อนจะต้องใช้ตัวขัดขวางแยกโลหะออกจากตัวกลางที่ทำให้เกิดการผุกร่อน ตัวขัดขวางนี้อาจจะเป็นตะกรันของแคลเซียมคาร์บอเนตหรือแคลเซียมฟอสเฟตที่ก่อตัวขึ้นในระบบ ความหนาของตัวขัดขวางเหล่านี้จะมีผลกระทบอย่างมากกับการส่งผ่านความร้อน อย่างไรก็ตามตัวยับยั้งทางเคมีก็สามารถสร้างขึ้นเป็นฟิล์มป้องกันบาง ๆ ได้ ซึ่งฟิล์มนี้อาจจะเป็นโลหะหรือไม่เป็นโลหะก็ได้



ภาพที่ 3.4 ผลของค่า pH ต่ออัตราการผุกร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามระดับค่า pH สูง ๆ จะมีข้อเสียเปรียบดังนี้

- ค่า pH สูง ๆ (โดยเฉพาะที่มากกว่า 9) จะเพิ่มการผุกร่อนที่มีต่อทองแดง และโลหะชุบสังกะสี

- ค่า pH สูง ๆ (โดยเฉพาะกับน้ำกระด้างและกับการบำบัดฟอสเฟต) ต้องการตัวยับยั้งตะกรัน ระดับสูง เป็นผลให้ราคาสารที่ใช้บำบัดน้ำหล่อเย็นเพิ่มขึ้น

- ค่า pH สูง ๆ จะลดประสิทธิภาพของ Biocides หลายๆ ตัว รวมไปถึงคลอรีนด้วย ซึ่งเป็นข้อจำกัดของประสิทธิภาพ Biocides โดยปกติการเพิ่มราคาการควบคุมชีววิทยาและการทำการควบคุมทางชีววิทยาจะยากกว่ามาก

- ตัวยับยั้ง ตะกรัน บางชนิดจะใช้เมื่อ pH สูง ๆ ในการผุกร่อนของโลหะผสมทองแดง โลหะชุบสังกะสี และแม้แต่โลหะเบา ตัวยับยั้งตะกรันเหล่านี้ อาจช่วยให้เกิดตะกรันได้ ถ้าใช้งานในปริมาณน้อย แต่ถ้าใช้มากไปก็อาจเป็นอันตรายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลอง

หลังจากได้ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อน และศึกษาโครงสร้างทางเคมีของธาตุต่าง ๆ จึงได้ทำการทดสอบการเกิดการกัดกร่อน ดังนี้

4.1 การทดสอบ Corrosion

4.1.1 ชิ้นงานทดสอบ

ชิ้นงานทดสอบเป็น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ มีจำนวน 6 ชิ้น โดยชิ้นงานมีความหนา 7 มิลลิเมตร กว้าง 5 เซนติเมตร และยาว 11 เซนติเมตร น้ำหนัก 325 กรัม

4.1.2 วิธีการทดสอบ

เมื่อได้ชิ้นงานทดสอบแล้วนำไปทดสอบด้วยการต้มในน้ำเดือด เพื่อหาปริมาตรที่หายไป โดยจะทำการชั่งน้ำหนัก เปรียบเทียบกันระหว่างก่อนการทดลองและหลังการทดลอง มีวิธีดังนี้

1. นำชิ้นงานทดสอบทั้ง 6 ชิ้น มาชั่งน้ำหนักและบันทึกผลไว้
2. ใช้น้ำทำการทดสอบ 3 ชนิดดังนี้
   - 2.1 ใส่น้ำประปาลงในบีกเกอร์เบอร์1 และเบอร์ 4
   - 2.2 ใส่น้ำคลองลงในบีกเกอร์เบอร์2 และเบอร์ 5
   - 2.3 ใส่น้ำบาดาลลงในบีกเกอร์เบอร์3 และเบอร์ 6

   โดยบีกเกอร์เบอร์1, 2 และ3 ปริมาณบีกเกอร์ละ 1000 มิลลิลิตร

   บีกเกอร์เบอร์ 4, 5 แล 6 ปริมาณบีกเกอร์ละ 600 มิลลิลิตร
3. นำบีกเกอร์เบอร์ 1 , 2 และ3 ไปวางบน Hot Plate เพื่อต้มให้น้ำเดือด
4. ใส่ชิ้นงานทดสอบ ลงไปในบีกเกอร์แต่ละอัน จำนวน 1 ชิ้น
5. ต้มทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน
6. ในแต่ละสัปดาห์ จะทำการนำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนัก เพื่อบันทึกผลเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักก่อนการทดลอง

หมายเหตุ : ในการทดสอบ Corrosion นี้ใช้เวลาในการทดลอง 6 สัปดาห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดสอบ Corrosion

หลังจากทำการทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานทดสอบ โดยการชั่งน้ำหนัก ได้ผลดังตาราง

ตารางที่ 4.1 แสดงน้ำหนักหลังการทดลองครั้งที่1

	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)
สารตัวอย่าง	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
น้ำประปาต้ม	325.23	325.23	325.23	325.230
น้ำคลองต้ม	325.77	325.76	325.77	325.767
น้ำบาดาลต้ม	326.02	326.02	326.02	326.020
น้ำประปา	324.56	324.58	324.58	324.573
น้ำคลอง	324.53	324.52	324.54	324.530
น้ำบาดาล	324.65	324.63	324.63	324.637

ตารางที่ 4.2 แสดงน้ำหนักหลังการทดลองครั้งที่2

	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)
สารตัวอย่าง	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
น้ำประปาต้ม	325.30	325.31	325.30	325.303
น้ำคลองต้ม	325.83	325.83	325.82	325.827
น้ำบาดาลต้ม	326.14	326.15	326.14	326.143
น้ำประปา	324.46	324.45	324.45	324.453
น้ำคลอง	323.98	323.98	323.98	323.980
น้ำบาดาล	324.01	324.00	324.00	324.003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงน้ำหนักหลังการทดลองครั้งที่3

	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)
สารตัวอย่าง	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
น้ำประปาต้ม	325.43	325.42	325.42	325.423
น้ำคลองต้ม	325.95	325.97	325.95	325.957
น้ำบาดาลต้ม	326.18	326.20	326.20	326.193
น้ำประปา	324.24	324.24	324.23	324.237
น้ำคลอง	323.76	323.76	323.76	323.760
น้ำบาดาล	323.89	323.89	323.90	323.893

ตารางที่ 4.4 แสดงน้ำหนักหลังการทดลองครั้งที่4

	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)
สารตัวอย่าง	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
น้ำประปาต้ม	325.50	325.48	325.48	325.487
น้ำคลองต้ม	326.10	326.11	326.12	326.110
น้ำบาดาลต้ม	326.21	326.20	326.20	326.203
น้ำประปา	323.93	323.94	323.93	323.933
น้ำคลอง	323.40	323.42	323.41	323.410
น้ำบาดาล	323.21	323.21	323.21	323.210

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงน้ำหนักหลังการทดลองครั้งที่5

	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)
สารตัวอย่าง	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
น้ำประปาต้ม	325.53	325.54	325.53	325.533
น้ำคลองต้ม	326.22	326.22	326.21	326.217
น้ำบาดาลต้ม	326.25	326.26	326.26	326.257
น้ำประปา	323.83	323.82	323.84	323.830
น้ำคลอง	323.33	323.33	323.34	323.333
น้ำบาดาล	323.18	323.18	323.18	323.180

ตารางที่ 4.6 แสดงน้ำหนักหลังการทดลองครั้งที่6

	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)
สารตัวอย่าง	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
น้ำประปาต้ม	325.76	325.76	325.77	325.763
น้ำคลองต้ม	326.26	326.27	326.26	326.263
น้ำบาดาลต้ม	326.27	326.27	326.27	326.270
น้ำประปา	323.74	323.73	323.73	323.733
น้ำคลอง	323.22	323.23	323.21	323.220
น้ำบาดาล	323.17	323.17	323.18	323.173

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

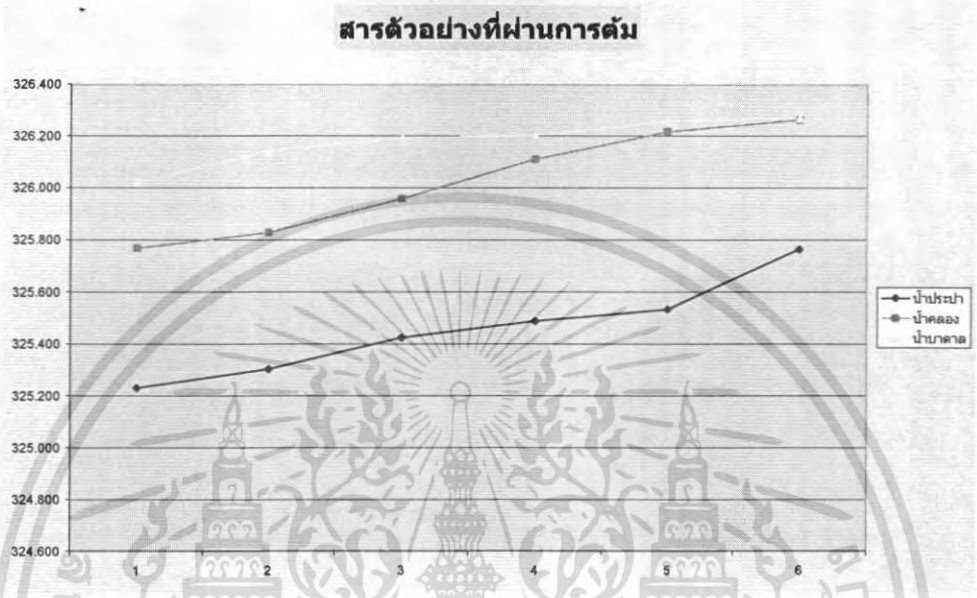
ตารางที่ 4.7 แสดงน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของชิ้นงานทดสอบก่อนและหลังการทดลอง

	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)	น้ำหนัก (g)
สารตัวอย่าง	ก่อน	หลัง	ค่าเปลี่ยนแปลง
น้ำประปาต้ม	325.000	325.763	0.763
น้ำคลองต้ม	325.000	326.263	1.263
น้ำบาดาลต้ม	325.000	326.270	1.270
น้ำประปา	325.000	323.733	-1.267
น้ำคลอง	325.000	323.220	-1.780
น้ำบาดาล	325.000	323.173	-1.827

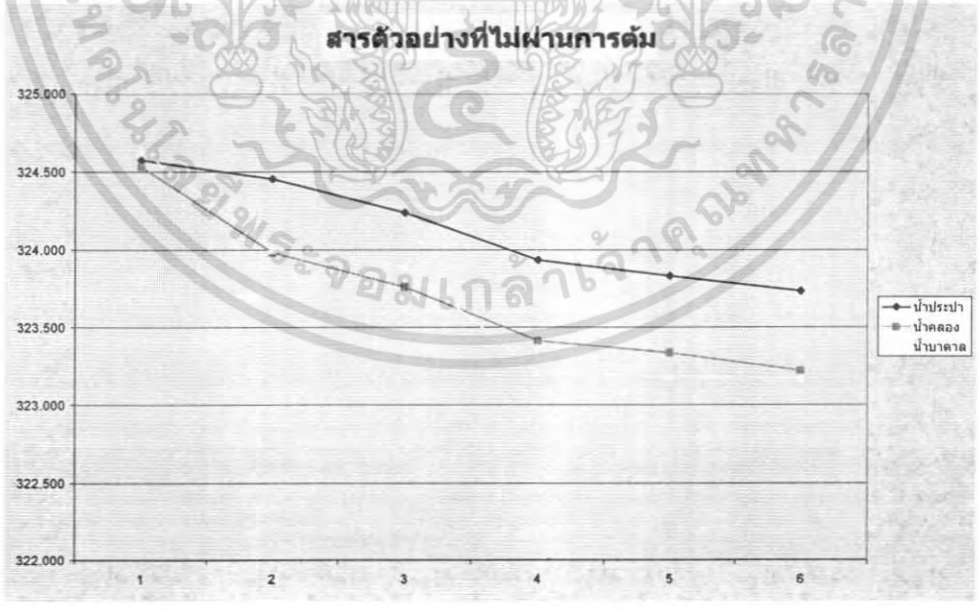
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงค่าน้ำหนักชิ้นงาน ที่เปลี่ยนไปหลังการทดสอบในแต่ละครั้ง แยกเป็นสารตัวอย่างต้มและไม่ต้ม

สารตัวอย่างที่ต้ม



สารตัวอย่างที่ไม่ต้ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลและแนวทางการพัฒนา

5.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบการกัดกร่อน

จากการทดสอบหาการกัดกร่อน ของชิ้นงานทดสอบด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก โดยนำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการเชื่อมไฟฟ้า ไปแช่ในสารตัวอย่าง 3 ชนิด โดยแช่ในสารตัวอย่างที่ต้มและไม่ต้ม เป็นเวลา 6 สัปดาห์ สามารถวิเคราะห์ผลการทดสอบได้ดังนี้

1. จากผลทดสอบในตารางที่ 5.7 จะเห็นได้ว่า ชิ้นงานที่แช่ในน้ำประปาต้มน้ำหนักเพิ่มขึ้น 0.763กรัม น้ำคลองต้มน้ำหนักเพิ่มขึ้น คือ 1.263 กรัม และ น้ำบาดาลต้ม น้ำหนักเพิ่มขึ้น 1.270 กรัม เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักก่อนการทดลอง เนื่องจากว่าชิ้นงานที่แช่ในสารตัวอย่างที่ต้ม มีอัตราการกัดกร่อนเกิดขึ้นต่ำ เมื่อเทียบกับการสะสมตัวของตะกรันซึ่งมีมากกว่าส่งผลให้น้ำหนักของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น โดยตะกรันเกิดจากน้ำเคลื่อนที่ผ่านผิวโลหะที่ร้อน จะทำให้พื้นที่ผิวส่วนที่ทำให้น้ำเคลื่อนที่ผ่านเย็นลง อุณหภูมิพื้นที่ผิวของโลหะตรงส่วนนั้นจะสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำที่อยู่ในบริเวณรอบ ๆ มาก น้ำในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงจะระเหยกลายเป็นไอทันทีทำให้พื้นที่ผิวบริเวณนั้นมีสารละลายเข้มข้นมากกว่าปกติ สารต่าง ๆ ที่เข้มข้นนั้นจะล้อมรอบเม็ดไอน้ำที่เกิดขึ้นไว้ ทำให้บริเวณนั้นมีความเข้มข้นของเกลือแร่ชนิดต่าง ๆ สูงมาก จนกระทั่งแยกตัวตกผลึกหรือตกตะกอนอยู่บนพื้นโลหะในบริเวณนั้น ในขณะที่น้ำในบริเวณอื่นยังมีสารละลายอยู่ในปริมาณปกติ จึงไม่เกิดการตกผลึกหรือตกตะกอน ผลึกหรือตะกอนที่เกิดขึ้นแล้วจะสะสมกันมากเข้า จนกลายเป็นตะกรันเกาะจับ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต มีสมการการเกิดตะกรัน ดังนี้

$$Ca^{2+} + CO_3^{2} \longrightarrow CaCO_3$$

การที่ตะกรัน หรือตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดได้ง่ายเนื่องจากในน้ำทุกประเภทจะมีความเป็นด่างอยู่เสมอ และความเป็นด่างนี้จะอยู่ในรูปไบคาร์บอเนต เมื่อได้รับความร้อนก็จะสลายตัว ให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอเนตอิออนออกมา คาร์บอเนตอิออนก็จะได้จับตัวกับแคลเซียมอิออน เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตตามสมการเบื้องต้นจนกระทั่งในน้ำนั้นมีแคลเซียมคาร์บอเนตละลายอยู่มาก จนทำให้ผลคูณของการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนต มีค่าเกินกว่าค่าที่สามารถมีอยู่ในน้ำโดยไม่ตกผลึกออกมา ก็จะทำให้เกิดการตกตะกอนหรือตกผลึกออกมาได้ และในขณะเดียวกันคาร์บอเนตอิออนบางส่วนก็จะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นอีกดังสมการ

$$H_2O + CO_3^{2-} \longrightarrow 2OH^{-} + CO_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสาเหตุที่ตะกรันมาจับชิ้นงานไม่เท่ากัน เพราะสารละลายที่ละลายอยู่ในน้ำประปา , น้ำคลอง และน้ำบาดาลมีความเข้มข้นต่างกัน สาเหตุอีกอย่างเป็นเพราะความร้อนที่ให้กับชิ้นงานไม่เท่ากัน เนื่องจากเครื่องมือทดลอง คือ Hot plate มีประสิทธิภาพไม่เท่ากัน

2. จากผลทดสอบในตารางที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่แช่ในน้ำประปาน้ำหนักลดลง 1.267 กรัม น้ำคลองน้ำหนักลดลง คือ 1.780 กรัม และ น้ำบาดาลน้ำหนักลดลง 1.827 กรัม เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักก่อนการทดลอง เนื่องจากออกซิเจนในอากาศเข้าทำปฏิกิริยากับเหล็ก ทำให้เกิดเหล็กออกไซด์ หรือสนิม โดยสนิมของเหล็กเหนียวนี้จะหลุดง่ายไม่เกาะติดผิวเหล็ก .....

5.2 แนวทางการพัฒนา

การเข้าในกลไก ทั้งการผุกร่อนและเทคโนโลยีใหม่ ๆ ของการตรวจวัดอัตราการกัดกร่อนเป็นสิ่งจำเป็นที่จะทำให้เกิดการบำรุงรักษา ที่มีประสิทธิภาพและเป็นการป้องกันส่วนประกอบทั้งหมดในระบบ วิศวกรและ ผู้ปฏิบัติการ ไม่ควรจะทำเพียงแค่คาดการณ์ แต่ควรจะหาแนวทางในการป้องกันสำหรับอุปกรณ์ใหม่ ๆ และ เทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่อาจจะจำเป็นเพื่อหาแนวทางในการปฏิบัติการอย่างเป็นเหตุเป็นผลตามหลักการทฤษฎีเหล่านี้ก่อน ซึ่งเครื่องมือวิเคราะห์การกัดกร่อนที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันราคาก็ค่อนข้างสูงมาก ดังนั้นในการเลือกใช้วัสดุในการออกแบบกระบวนการผลิตจึงควรพิจารณาหลักเกณฑ์และเงื่อนไขต่าง ๆ ในทางปฏิกิริยาเคมี ให้มีความเหมาะสมกับระบบก่อนที่จะเกิดการสูญเสียขึ้นในระบบ และค่อยสรุปผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

www.pepperl-fuchs.com

www.dayah.com

www.mtec.or.th

www.corrosion-doctors.org

ASHRAE JOURNAL , MAY 1999 , VOL. 41 , NO.

ดร.กัญจนา ตระกูลดู. เทคโนโลยีการกัดกร่อน. พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท คราฟแมนเพรส จำกัด , 2530.

ผศ.วีระพันธ์ สิทธิพงศ์. โลหะวิทยากายภาพสำหรับวิศวกร ภาค1. คณะวิศวกรรมเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล , 2532.

ณรงค์ วุทธเสถียร. การปรับสภาพน้ำในอุตสาหกรรมและหม้อไอน้ำ. โครงการสนันสนุนเทคนิค-อุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) , ตุลาคม 2529.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุกรมเคมีของตารางธาตุ						
โลหะแอลคาไล	โลหะแอลคาไลน์เอิร์ท	แลนทาไนด์	โลหะทรานซิชัน	อโลหะ	แฮโลเจน	แก๊สมีตระกูล
		แอกทิไนด์		กึ่งโลหะ		
				โลหะหลังทรานซิชัน		

สัญลักษณ์ธาตุ	ชื่อไทย	ชื่ออังกฤษหรือละติน	เลขอะตอม	น้ำหนักอะตอม	หมู่	คาบ	ที่มาของสัญลักษณ์
Ac	แอกทิเนียม	Actinium	89	[227] [1]		7	
Ag	เงิน	Silver	47	107.8682(2) [2]	11	5	ละติน *Argentum*
Al	อะลูมิเนียม	Aluminum	13	26.981538(2	13	3	
Am	อะเมริเซียม	Americium	95	[243] [1]		7	
Ar	อาร์กอน	Argon	18	39.948(1) [2] [4]	18	3	
As	อาร์ซีนิก	Arsenic	33	74.92160(2	15	4	
At	แอสทาทีน	Astatine	85	[210] [1]	17	6	
Au	ทองคำ	Gold	79	196.966 55(2	11	6	ละติน *Aurum*
B	โบรอน	Boron	5	10.811(7) [2] [3] [4]	13	2	
Ba	แบเรียม	Barium	56	137.327(7	2	6	
Be	เบริลเลียม	Beryllium	4	9.012182(3	2	2	
Bh	โบห์เรียม	Bohrium	107	[264] [1]	7	7	
Bi	บิสมัท	Bismuth	83	208.980 38(2	15	6	
Bk	เบอร์คีเลียม	Berkelium	97	[247] [1]		7	
Br	โบรมีน	Bromine	35	79.904(1	17	4	
C	คาร์บอน	Carbon	6	12.0107(8) [2] [4]	14	2	
Ca	แคลเซียม	Calcium	20	40.078(4) [2]	2	4	
Cd	แคดเมียม	Cadmium	48	112.411(8) [2]	12	5	
Ce	ซีเรียม	Cerium	58	140.116(1) [2]		6	
Cf	แคลิฟอร์เนียม	Californium	98	[251] [1]		7	
Cl	คลอรีน	Chlorine	17	35.453(2) [2] [3] [4]	17	3	
Cm	คูเรียม	Curium	96	[247] [1]		7	
Co	โคบอลต์	Cobalt	27	58.933 200(9	9	4	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ธาตุ	ชื่อไทย	ชื่ออังกฤษหรือละติน	เลขอะตอม	น้ำหนักอะตอม	หมู่	คาบ	ที่มาของสัญลักษณ์
Cr	โครเมียม	Chromium	24	51.9961(6	6	4	
Cs	ซีเซียม	Cesium	55	132.905 45(2	1	6	
Cu	ทองแดง	Copper	29	63.546(3) [4]	11	4	ละติน *Cuprum*
Db	ดุบเนียม	Dubnium	105	[262] [1]	5	7	
Ds	ดาร์มสแทดเทียม	Darmstadtium	110	[271] [1]	10	7	
Dy	ดิสโพรเซียม	Dysprosium	66	162.500(1) [2]		6	
Er	เออร์เบียม	Erbium	68	167.259(3) [2]		6	
Es	ไอน์สไตเนียม	Einsteinium	99	[252] [1]		7	
Eu	ยูโรเพียม	Europium	63	151.964(1) [2]		6	
F	ฟลูออรีน	Fluorine	9	18.9984032(5	17	2	
Fe	เหล็ก	Iron	26	55.845(2	8	4	ละติน *Ferrum*
Fm	เฟอร์เมียม	Fermium	100	[257] [1]		7	
Fr	แฟรนเซียม	Francium	87	[223] [1]	1	7	
Ga	แกลเลียม	Gallium	31	69.723(1	13	4	
Gd	แกโดลิเนียม	Gadolinium	64	157.25(3) [2]		6	
Ge	เจอร์เมเนียม	Germanium	32	72.61(1	14	4	
H	ไฮโดรเจน	Hydrogen	1	1.00794(7) [2] [3] [4]	1	1	
He	ฮีเลียม	Helium	2	4.002602(2) [2] [4]	18	1	
Hf	แฮฟเนียม	Hafnium	72	178.49(2	4	6	
Hg	ปรอท	Mercury	80	200.59(2	12	6	ละติน *Hydrargyrum*
Ho	โฮลเมียม	Holmium	67	164.930 32(2		6	
Hs	ฮาสเซียม	Hassium	108	[277] [1]	8	7	
I	ไอโอดีน	Iodine	53	126.904 47(3	17	5	
In	อินเดียม	Indium	49	114.818(3	13	5	
Ir	อิริเดียม	Iridium	77	192.217(3	9	6	
K	โพแทสเซียม	Kalium	19	39.0983(1	1	4	เยอรมัน *Kalium*
Kr	คริปทอน	Krypton	36	83.798(2) [2] [3]	18	4	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ธาตุ	ชื่อไทย	ชื่ออังกฤษหรือละติน	เลขอะตอม	น้ำหนักอะตอม	หมู่	คาบ	ที่มาของสัญลักษณ์
La	แลนทานัม	Lanthanum	57	138.9055(2) [2]		6	
Li	ลิเทียม	Lithium	3	6.941(2) [2 3 4 5]	1	2	
Lr	ลอว์เรนเซียม	Lawrencium	103	[262] [1]	3	7	
Lu	ลูทีเทียม	Lutetium	71	174.967(1) [2]	3	6	
Md	เมนเดลีเวียม	Mendelevium	101	[258] [1]		7	
Mg	แมกนีเซียม	Magnesium	12	24.3050(6	2	3	
Mn	แมงกานีส	Manganese	25	54.938049(9	7	4	
Mo	โมลิบดีนัม	Molybdenum	42	95.94(2) [2]	6	5	
Mt	ไมต์เนเรียม	Meitnerium	109	[268] [1]	9	7	
N	ไนโตรเจน	Nitrogen	7	14.00674(2) [2 4]	15	2	
Na	โซเดียม	Sodium	11	22.989770(2	1	3	ละติน *Natrium*
Nb	ไนโอเบียม	Niobium	41	92.906 38(2	5	5	
Nd	นีโอดิเมียม	Neodymium	60	144.24(3) [2]		6	
Ne	นีออน	Neon	10	20.1797(6) [2 3]	18	2	
Ni	นิกเกิล	Nickel	28	58.6934(2	10	4	
No	โนเบเลียม	Nobelium	102	[259] [1]		7	
Np	เนปทูเนียม	Neptunium	93	[237] [1]		7	
O	ออกซิเจน	Oxygen	8	15.9994(3) [2 4]	16	2	
Os	ออสเมียม	Osmium	76	190.23(3) [2]	8	6	
P	ฟอสฟอรัส	Phosphorus	15	30.973761(2	15	3	
Pa	โพรแทกทิเนียม	Protactinium	91	231.03588(2) [1]		7	
Pb	ตะกั่ว	Lead	82	207.2(1) [2 4]	14	6	ละติน *Plumbum*
Pd	แพลเลเดียม	Palladium	46	106.42(1) [2]	10	5	
Pm	โพรมีเทียม	Promethium	61	[145] [1]		6	
Po	พอโลเนียม	Polonium	84	[209] [1]	16	6	
Pr	เพรซีโอดิเมียม	Praseodymium	59	140.90765(2		6	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ธาตุ	ชื่อไทย	ชื่ออังกฤษหรือละติน	เลขอะตอม	น้ำหนักอะตอม	หมู่	คาบ	ที่มาของสัญลักษณ์
Pt	แพลตินัม	Platinum	78	195.078(2	10	6	
Pu	พลูโทเนียม	Plutonium	94	[244] [1]		7	
Ra	เรเดียม	Radium	88	[226] [1]	2	7	
Rb	รูบิเดียม	Rubidium	37	85.4678(3) [2]	1	5	
Re	รีเนียม	Rhenium	75	186.207(1	7	6	
Rf	รัทเทอร์ฟอร์เดียม	Rutherfordium	104	261 [1]	4	7	
Rg	เรินต์เกเนียม	Roentgenium	111	[272] [1]	11	7	
Rh	โรเดียม	Rhodium	45	102.905 50(2	9	5	
Rn	เรดอน	Radon	86	[222] [1]	18	6	
Ru	รูทีเนียม	Ruthenium	44	101.07(2) [2]	8	5	
S	กำมะถัน	Sulfur	16	32.066(5) [2] [4]	16	3	
Sb	พลวง	Antimony	51	121.760(1) [2]	15	5	ละติน *Stibium*
Sc	สแคนเดียม	Scandium	21	44.955910(8	3	4	
Se	ซีลีเนียม	Selenium	34	78.96(3) [4]	16	4	
Sg	ซีบอร์เกียม	Seaborgium	106	[266] [1]	6	7	
Si	ซิลิกอน	Silicon	14	28.0855(3) [4]	14	3	
Sm	ซาแมเรียม	Samarium	62	150.36(3) [2]		6	
Sn	ดีบุก	Tin	50	118.710(7) [2]	14	5	ละติน *Stannum*
Sr	สตรอนเทียม	Strontium	38	87.62(1) [2] [4]	2	5	
Ta	แทนทาลัม	Tantalum	73	180.9479(1	5	6	
Tb	เทอร์เบียม	Terbium	65	158.92534(2		6	
Tc	เทกนีเทียม	Technetium	43	[98] [1]	7	5	
Te	เทลลูเรียม	Tellurium	52	127.60(3) [2]	16	5	
Th	ทอเรียม	Thorium	90	232.0381(1) [1] [2]		7	
Ti	ไทเทเนียม	Titanium	22	47.867(1	4	4	
Tl	แทลเลียม	Thallium	81	204.3833(2	13	6	
Tm	ทูเลียม	Thulium	69	168.93421(2		6	
U	ยูเรเนียม	Uranium	92	238.0289(3) [1] [2] [3]		7	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ธาตุ	ชื่อไทย	ชื่ออังกฤษหรือละติน	เลขอะตอม	น้ำหนักอะตอม	หมู่	คาบ	ที่มาของสัญลักษณ์
Uub	อูนอูนเบียม	Ununbium	112	[285] [1]	12	7	
Uuh	อูนอูนเฮกเซียม	Ununhexium	116	[292] [1]	16	7	
Uup	อูนอูนเพนเทียม	Ununpentium	115	[288] [1]	15	7	
Uuq	อูนอูนควอเดียม	Ununquadium	114	[289] [1]	14	7	
Uut	อูนอูนเทรียม	Ununquadium	113	[284] [1]	13	7	
V	วาเนเดียม	Vanadium	23	50.9415(1	5	4	
W	ทังสเตน	Tungsten	74	183.84(1	6	6	เยอรมัน *Wolfram*
Xe	ซีนอน	Xenon	54	131.293(6) [2] [3]	18	5	
Y	อิตเทรียม	Yttrium	39	88.90585(2	3	5	
Yb	อิตเทอร์เบียม	Ytterbium	70	173.04(3) [2]		6	
Zn	สังกะสี	Zinc	30	65.39(4	12	4	
Zr	เซอร์โคเนียม	Zirconium	40	91.224(2) [2]	4	5	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chemical Compositions of Stainless Steels

Wrought Stainless Steels									
Alloy	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Others
201	0.15	6.50	0.060	0.030	1.00	17.00	4.50	-	0.25N
202	0.15	9.00	0.060	0.030	1.00	18.00	5.00	-	0.25N
301	0.15	2.00	0.045	0.030	1.00	17.00	7.00	-	-
302	0.15	2.00	0.045	0.030	1.00	18.00	9.00	-	-
303	0.15	2.00	0.20	0.15	1.00	18.00	9.00	0.60	-
303Se	0.15	2.00	0.20	0.06	1.00	18.00	9.00	0.60	0.15Se
304	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	19.00	9.25	-	-
304L	0.03	2.00	0.045	0.030	1.00	19.00	10.0	-	-
309S	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	23.00	13.5	-	-
310S	0.08	2.00	0.045	0.030	1.50	25.00	20.5	-	-
316	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	17.00	12.0	2.5	-
316L	0.03	2.00	0.045	0.030	1.00	17.00	12.0	2.5	-
317	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	19.00	13.0	3.5	-
317L	0.03	2.00	0.045	0.030	1.00	19.00	13.0	3.5	-
321	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	18.00	10.5	-	Ti 5 X C
329	0.10	2.00	0.045	0.030	1.00	27.50	4.5	1.50	-
330	0.08	2.00	0.040	0.030	1.00	18.50	35.5	-	-
347	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	18.00	11.0	-	Cb+Ta 10 X C
409	0.08	1.00	0.045	0.045	1.00	11.50	35.5	-	Ti 6 x C
410	0.15	1.00	0.040	0.030	1.00	12.50	-	-	-
416	0.15	1.25	0.040	-	1.00	13.00	-	0.60	S =0.15 min.
416Se	0.15	1.25	0.060	0.060	1.00	13.00	-	-	0.15 Se
420	0.15 min.	1.00	0.040	0.030	1.00	13.00	-	-	-
430	0.12	1.00	0.040	0.030	1.00	17.00	-	-	-
440C	1.00	1.00	0.040	0.030	1.00	17.00	-	-	-
442	0.20	1.00	0.040	0.030	1.00	20.50	-	-	-
904L	0.02	2.00	0.045	0.035	1.00	21.00	25.5	4.5	Cu 1.5
17-4 PH	0.07	1.00	0.045	0.035	1.00	16.5	5.5	-	Cu 3-5, 0.4 Al
17-7 PH	0.09	1.00	0.045	0.035	1.00	17.0	7.0	-	.75-1.5 Al
2205	0.03	2.00	0.030	0.020	1.00	22.0	5.5	3.0	0.15 N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Chemical Compositions of Stainless Steels

Cast Stainless Steels									
Alloy	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Others
CA-6NM	0.06	1.00	0.045	0.035	1.00	12.50	4.00	0.70	-
CA-15	0.15	1.00	-	-	1.50	12.50	1.00	-	-
CA-40	0.40	1.00	-	-	1.50	12.50	1.00	-	-
CF-3	0.03	1.50	0.040	0.040	2.00	19.00	10.00	-	-
CF-3M	0.03	1.50	0.040	0.040	1.50	19.00	10.00	2.5	-
CF-8	0.08	1.50	0.040	0.040	2.00	19.00	9.00	-	-
CF-8M	0.08	1.50	0.040	0.040	2.00	19.50	10.00	2.5	-
CH-20	0.20	1.50	0.040	0.040	1.50	20.00	10.00	-	-
CK-20	0.20	2.00	0.040	0.040	2.00	25.00	20.00	-	-
HF	0.30	2.00	0.040	0.040	2.00	19.00	9.00	-	-
HH	0.35	2.00	0.040	0.040	2.00	25.00	12.00	-	0.2 N
HK	0.30	2.00	0.040	0.040	2.00	25.00	20.00	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้