



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การระบุแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกและการแยกแยะ
ความรุนแรงของการกีดกร่อนด้วยสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์

โดย รศ.ดร.อาษา ประทีปเสน และคณะ

31 พฤษภาคม 2550

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การระบุแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกและการแยกแยะ
ความรุนแรงของการกักกร่อนด้วยสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์

คณะผู้วิจัย

สังกัด

รศ.ดร.อาษา ประทีปเสน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รศ.ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

**การระบุแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกและการแยกแยะความรุนแรงของการ
กักร่อนด้วยสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์**

อาษา ประทีปเสน^{1*} และกอบบุญ หล่อทองคำ²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

²ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้แสดงการนำเอาวิธีการทดสอบด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ไปใช้ตรวจจับสัญญาณอะคูสติก (คลื่นเสียง) ที่ปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการกักร่อน ทั้งจากเหล็กกล้าไร้สนิม (AISI 304) และเหล็กกล้าอะลูมิเนียม (A36) สำหรับวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 2 การทดลอง โดยใช้ความเข้มข้นของสารเคมีที่แตกต่างกันคือ ใช้กรดเข้มข้นซึ่งมีส่วนผสมของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ และใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 เปอร์เซ็นต์ พร้อมทั้งเร่งให้เกิดการกักร่อนโดยวิธีไฟฟ้าเคมี จากการทดลองพบว่าสัญญาณอะคูสติกสามารถตรวจจับได้ระหว่างเกิดการกักร่อน และได้นำสัญญาณการกักร่อนไปวิเคราะห์หาต้นกำเนิดของเสียง จากงานวิจัยพบว่าต้นกำเนิดเสียงของกรณีที่ใช้กรดเข้มข้นคือ เสียงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจากการกระแทกและระเบิดของฟองไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี ในขณะที่ในการทดลองที่เร่งด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี ต้นกำเนิดเสียงได้แก่การแตกของพาสซีฟฟิล์มและการกักร่อนแบบหลุมลึก (Pitting corrosion) หลังจากนั้นได้นำสัญญาณอะคูสติกไปแบ่งระดับความรุนแรงของการกักร่อนออกเป็น 5 ระดับ ตามความลึกของวัสดุที่ถูกกักร่อน โดยใช้วิธีเซมิพารามิเตอร์ (Seme-parametric) ผลการแบ่งระดับแสดงให้เห็นประสิทธิภาพที่ดีที่จะนำไปใช้ในการทำนายความรุนแรงของการกักร่อน นอกจากนี้ได้ทำการสร้างระบบการวิเคราะห์หาตำแหน่งของการเกิดสัญญาณอะคูสติกโดยใช้ FPGA-PC (Field Programmable Gate Array PC) ซึ่งเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ โดยได้ทดลองระบบและพบว่าระบบระบุตำแหน่งการกักร่อนได้อย่างถูกต้อง สำหรับการทดลองในเหล็กกล้าอะลูมิเนียมได้ทำให้เกิดการกักร่อนแบบยูนิฟอร์มโดยการใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกต่างๆ กัน ในผลการวิจัยได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอะคูสติกกับความเข้มข้นของปริมาณซัลเฟอร์และค่าของ PH

คำสำคัญ : การกักร่อน แหล่งกำเนิดอะคูสติกอิมพัลส์ กรดซัลฟิวริก การแยกแยะ FPGA

AE Source Identification and Classification of Corrosion Severity by AE Signal

Prateepasen, A.^{1*} and Lothongkum, G.²

¹*Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi*

126 Prachautid, Bangmod, Toongkru, Bangkok, 10140

²*College of Engineering, Chulalongkorn University, Phaya Thai Road, Bangkok 10330*

Abstract

In this research Acoustic Emission Testing (AET) was implemented to detect AE signal released from corrosion process in austenitic stainless steel (AISI 304) and mild steel (A36). For stainless steel, two tests were conducted at room temperature using an acidic 30% Chloride solution and 3% Chloride solution accelerated by electrochemical process respectively. It appeared that AE signals could be detected during corrosion process and AE source obtained from corrosion were identified. AE sources in high concentration chloride test mainly are impact and burst of hydrogen bubble whereas in electrochemical corrosive test the AE sources are passive film breakage and pitting corrosion. Subsequently the corrosion severity is graded roughly into five levels based on the depth of corrosion by using a semi-parametric scheme for learning the mixture model. The results showed good performance to predict corrosion severity. Furthermore, a novel low-cost AE location system based on a Field Programmable Gate Array PC (FPGA-PC) was established. The corrosion positions detected by the system displayed the correct positions. For mild steel, the uniform corrosion mechanism in various concentrations of Sulfuric acid (H₂SO₄) solution was studied. The relationship between AE signals and sulphur concentrations as well as pH were exhibited.

Keywords: Corrosion, Acoustic Emission Source, Sulfuric acid, Classification, FPGA

Executive Summary

การระบุแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติกและการแยกแยะความรุนแรงของการ กักกรองด้วยสัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การกักกรองเป็นบ่อเกิดของความเสียหายต่อวัสดุและเครื่องมือต่างๆ เทคโนโลยีในปัจจุบันก็ทำได้เพียงแต่ลดอัตราการกักกรอง เช่น ใช้วิธีการเลือกวัสดุที่ทนต่อการกักกรอง หรือใช้การเคลือบผิว เป็นต้น ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดเจนของความเสียหายที่เกิดในงานทางวิศวกรรม เช่น การกักกรองที่พื้นของถังพักขนาดใหญ่ (Storage tank floor) ในภาชนะรับแรงดัน (Pressure vessel) และท่อแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น ตัวอย่างการตรวจสอบการกักกรองหรือสนิมบริเวณพื้นของถังพักในประเทศไทยในปัจจุบันใช้วิธีการถ่ายของเหลว เช่น น้ำมันออกจากถังและทำความสะอาดเพื่อใช้วิธีการตรวจสอบโดยไม่ทำลายวิธีดั้งเดิม เช่น การตรวจสอบด้วยตาเปล่าและการวัดการรั่วไหลของสนามแม่เหล็ก เป็นต้น ข้อจำกัดของการใช้การตรวจสอบวิธีดั้งเดิมนี้คือ ใช้เวลาในการตรวจสอบต่อถัง 1 ใบเป็นเวลาหลายสัปดาห์ หรืออาจถึง 1 – 2 เดือน และค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบนับล้านบาท

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการนำเอาวิธีการตรวจสอบโดยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน ซึ่งประเทศไทยยังต้องพึ่งพาเทคโนโลยีนี้จากต่างประเทศ มีหลักการคือการตรวจจับคลื่นเสียงของการกักกรองโดยใช้ หัวรับสัญญาณติดไว้ที่บริเวณข้างถัง หัวรับสัญญาณจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณของการ กักกรองเป็นพารามิเตอร์ของ AE (AE – parameter) ซึ่งจะถูกนำไปวิเคราะห์แบ่งแยกระดับความรุนแรง เพื่อกำหนดสถานะของสนิมและการกักกรองว่าอยู่ในสภาวะรุนแรงเพียงใด โดยจะแบ่งออกเป็น 5 ระดับ ข้อได้เปรียบคือการตรวจสอบสามารถเสร็จสิ้นภายในระยะเวลาเพียง 1 – 2 วัน และลดค่าใช้จ่ายและลดอันตรายจากอุบัติเหตุของผู้ตรวจสอบที่มักเกิดขึ้นเสมอ

นอกจากนั้นในการวิจัยนี้จะยังวิจัยเพื่อให้ได้องค์ความรู้ใหม่ในเรื่องของแหล่งกำเนิดของการกักกรองซึ่งยังมีการนำเสนอที่ขัดแย้งกันอยู่ระหว่างนักวิจัยที่ผ่านมาว่าเป็นเนื่องจากฟองแก๊สไฮโดรเจนหรือเป็นเนื่องจากการกักกรองเอง หรือเป็นเนื่องจากแหล่งกำเนิดทั้ง 2 ชนิด ซึ่งผลของการวิจัยนี้จะทำให้การวินิจฉัยความรุนแรงของการกักกรองได้ดีแม่นยำยิ่งขึ้น และในการวิจัยนี้จะได้มีการศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคการประมวลสัญญาณ และเทคนิคการแยกแยะในแบบต่างๆ พร้อมทั้งเลือกตัวแปรที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทำนายความรุนแรงของการกักกรองได้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ในตอนท้ายจะเป็นการศึกษาผลกระทบอื่นๆที่มีผลอัตราการกักกรอง เช่น ความเข้มข้นของสารละลาย ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการกักกรอง และจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงสัญญาณอะคูสติกอิมิชชันนั่นเอง

ผลของงานวิจัยนี้จะทำให้เป็นการพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจสอบการกักกรองด้วยอะคูสติกอิมิชชันให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น และนำไปใช้ได้ในอุตสาหกรรมไทยซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าตรวจสอบได้นับพันล้านบาท

2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อวิจัยและพัฒนาวิธีการตรวจสอบด้วยวิธีอะคูสติกอิมมิชชัน เพื่อใช้ตรวจสอบการกัดกร่อน
2. เพื่ออธิบายว่าแหล่งกำเนิดเสียงหรือคลื่นอะคูสติกนั้น มาจากกลไกหรือปฏิกิริยาใดของการกัดกร่อน
3. เพื่อค้นหาวิธีและพัฒนาวิธีการประมวลผลสัญญาณเพื่อการทำนายผลแม่นยำยิ่งขึ้น
4. เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนอัตราการกัดกร่อน เช่น จากการเปลี่ยนแปลงปริมาณของซัลเฟอร์ของสารละลายว่ามีผลต่อสัญญาณอะคูสติกอย่างไร

3. ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ AE กับอัตราการกัดกร่อนโดยใช้วัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304
2. ศึกษาแหล่งกำเนิดเสียง AE จากกลไกหรือปฏิกิริยาการกัดกร่อนว่ามาจากแหล่งใด และในแต่ละแหล่งมีผลต่อความรุนแรงต่อสัญญาณ AE อย่างไร
3. ทำซ้ำข้อ 1 และ 2 โดยเปลี่ยนชนิดวัสดุเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน
4. ค้นหาเทคนิควิธีการแยกแยะข้อมูล เพื่อแบ่งกลุ่มของความรุนแรงของการกัดกร่อนอย่างถูกต้องแม่นยำ
5. ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย เป็นต้น

4. แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

กิจกรรม	ระยะเวลา (เดือน)					
	1 - 4	5 - 8	9 - 12	13 - 16	17 - 20	21 - 24
กิจกรรมที่ 1	←→					
กิจกรรมที่ 2	←→					
กิจกรรมที่ 3		←→				
กิจกรรมที่ 4		←→				
กิจกรรมที่ 5				←→		→

ตารางผลงานในแต่ละช่วงเวลา

5. ผลงาน

ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ การบรรยายในงานสัมมนาให้กับกลุ่มผู้ต้องการใช้เทคโนโลยี และการทดลองใช้เทคโนโลยีมีดังต่อไปนี้

1. Prateepasen A., Jirarungsatean C. and Tuengsook P., 2006, "Effect of Sulfuric Acid Concentration on Acoustic Emission Signals Obtained from Uniform-Corrosion", Journal of Key Engineering Materials, Vols. 321-323, pp. 553-556. (Impact factor 0.278)
2. Prateepasen A., Jirarungsatean C. and Tuengsook P., 2006, "Identification of AE Source in Corrosion Process", Journal of Key Engineering Materials, Vols. 321-323, pp. 545-548. (Impact factor 0.278)
3. Prateepasen A., Kaewtrakulpong P. and Jirarungsatean C., 2006, "Semi-Parametric Learning for Classification of Pitting Corrosion Detected by Acoustic Emission", Journal of Key Engineering Materials, Vols. 321-323, pp. 549-552. (Impact factor 0.278)
4. Jomdecha C., Prateepasen A. and Kaewtrakulpong P., 2007, "A Study on Source Location Using an Acoustic Emission System on Various Types of Corrosion " IN PRESS in NDT&E International. (Impact factor 1.047)
5. เณลิมเกียรติ จิระรุ่งเสถียร, อาษา ประทีปเสน และ เมธิณี มุกดาสิริ, 2550, "ผลของการถ่ายเทประจุทางไฟฟ้าเคมีต่อสัญญาณอะคูสติกในการตรวจจับการกัดกร่อนด้วยวิธีอะคูสติกอิมมิชชัน", วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 30 ฉบับที่ 2 เมษายน – มิถุนายน.
6. อาษา ประทีปเสน และ มนต์รี กุตัน , 2550, "การตรวจจับการกัดกร่อนแบบยูนิฟอร์มในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและรอยเชื่อมด้วยวิธีอะคูสติกอิมมิชชัน",วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, Vol. 14(1), มกราคม – เมษายน.
7. Prateepasen A., Lothongkum, G., and Jirarungsatean C, "Corrosion Detection on various Metal Micro Structures by Acoustic Emission" to be submitted to Materials science and engineering A-structural materials properties micro structure and processing. (Impact factor 1.445)
8. Jirarungsatean C, Prateepasen A and Tuengsook P, "Pitting and Uniform Corrosion Source Recognition by AE Parameters", to be submitted to Corrosion science. (Impact factor 1.714)
9. การสัมมนาหัวข้อ การใช้อะคูสติกอิมมิชชันในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ให้แก่วิศวกรกลุ่มอุตสาหกรรมปิโตรเคมีจำนวน 6 บริษัท วันที่ 6 มิ.ย. 2549 ณ. บริษัท PPTChem นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จ.ระยอง มีวิศวกรเข้ารับฟังการบรรยายประมาณ 30 คน
10. การสัมมนาหัวข้อ การใช้อะคูสติกอิมมิชชันในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ให้แก่ผู้บริหารกลุ่มอุตสาหกรรมปิโตรเคมีจำนวน 6 บริษัท วันศุกร์ที่ 11 พฤษภาคม 2007 ณ Pattaya Bella Villa Cabana จ. ชลบุรี มีผู้บริหารเข้ารับฟังการบรรยายประมาณ 30 คน

เนื้อหางานวิจัย

7. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยจะประกอบไปด้วย 4 ส่วน ซึ่งได้แก่

- การตรวจสอบด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน (Acoustic Emission)
- การกัดกร่อน (Corrosion)
- แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกในกระบวนการกัดกร่อน
- การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดอะคูสติกโดยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน

7.1. หลักการเบื้องต้น

การทดสอบโดยไม่ทำลายด้วยวิธีอะคูสติก อิมิชชัน (Acoustic Emission : AE) เป็นวิธีหนึ่งในการทดสอบหรือประเมินสภาพของวัสดุแบบไม่ทำลาย การทดสอบด้วยวิธีนี้แตกต่างจากการทดสอบโดยไม่ทำลายวิธีดั้งเดิมอื่นๆ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เช่น คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Testing, UT) ภาพถ่ายรังสี (Radiographic Testing, RT) อนุภาคแม่เหล็ก (Magnetic Particle Testing, MT) กระแสไหลวน (Eddy Current Testing, ET) และ สารละลายแทรกซึม (Liquid Penetrant Testing, PT) เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีดั้งเดิมเหล่านี้ เป็นการทดสอบหลังจากที่มีรอยความไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุแล้ว ส่วนการทดสอบด้วยวิธี AE สามารถตรวจพบรอยความไม่ต่อเนื่องในขณะที่กำลังเกิดหรือกำลังขยายตัว ได้ทั้งในระดับอนุภาค (micro structure) เช่นการที่มีอะตอมขาดหายไป (vacancy) หรือการที่มีอะตอมเกิน (interstitial) และในระดับมหภาค (macro structure) เช่นการแตกร้าว (crack) โดยรอยความไม่ต่อเนื่องจะเป็นตัวปลดปล่อยพลังงานออกมาในลักษณะคลื่นเสียง ดังนั้นข้อได้เปรียบของการทดสอบด้วยวิธีนี้เมื่อเทียบกับการทดสอบโดยไม่ทำลายวิธีดั้งเดิมอื่นๆ คือเป็นการทดสอบแบบเวลาจริง (real time) สามารถใช้เฝ้าระวังเตือนภัยล่วงหน้าก่อนที่ความเสียหายจะลุกลาม นอกจากนั้น การทดสอบด้วย AE ยังครอบคลุมผลการทดสอบเป็นบริเวณกว้างในการทดสอบในคราวเดียว

7.1.1 ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของการทดสอบ

ข้อได้เปรียบของการทดสอบ

- ทดสอบได้ในขณะที่รอยความไม่ต่อเนื่องกำลังเกิดและ/หรือกำลังขยายตัว สามารถใช้เป็นวิธีเฝ้าระวัง
- ครอบคลุมพื้นที่ในการทดสอบเป็นบริเวณกว้างของการทดสอบในคราวเดียว
- มีความต้องการ การเข้าถึงชิ้นงานเพื่อการทดสอบน้อยกว่าการทดสอบวิธีอื่น
- ทดสอบได้โดยไม่ต้องหยุดกระบวนการผลิต หรือการทำงานของอุปกรณ์

ข้อเสียเปรียบของการทดสอบ

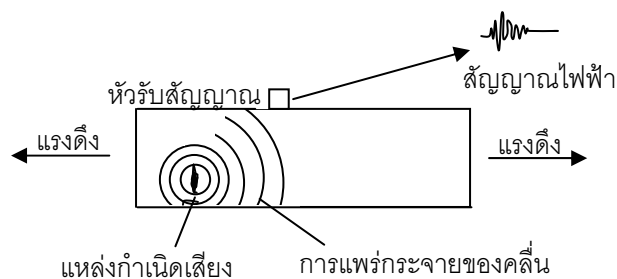
- สัญญาณรบกวนของสภาวะแวดล้อม และอุปกรณ์การทำงาน ถ้ามีความถี่ของคลื่นเสียงอยู่ในย่านเดียวกันกับคลื่นเสียงที่ปลดปล่อยจากรอยความไม่ต่อเนื่อง อาจทำให้การทดสอบทำได้ยากหรือทำไม่ได้ ถ้าไม่สามารถกรองสัญญาณรบกวนออก
- เมื่อความเสียหายนั้นเกิดขึ้นและผ่านไปแล้ว ไม่สามารถทำการทดสอบซ้ำได้อีก ข้อมูลที่ตรวจจับได้ใหม่จะเป็นข้อมูลของรอยความไม่ต่อเนื่องครั้งใหม่ หรือของความเสียหายเก่าที่กำลังขยายตัว

7.1.2 ทฤษฎีการทดสอบด้วยอะคูสติกอิมพัลส์

ระบบการทดสอบด้วยอะคูสติก อิมพัลส์

อะคูสติกอิมพัลส์ ใช้หลักการตรวจจับพลังงานซึ่งอยู่ในรูปของคลื่นยืดหยุ่นแบบชั่วคราว (Transient elastic wave) ที่ปลดปล่อยจากรอยความไม่ต่อเนื่องของวัสดุ การตรวจจับคลื่นยืดหยุ่นสามารถทำได้โดยใช้หัวตรวจสอบ (Sensor) ยึดติดที่ผิวหน้าของวัสดุ หัวตรวจสอบจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานในรูปของคลื่นเสียงให้เป็นคลื่นไฟฟ้า และสัญญาณคลื่นไฟฟ้าจะถูกขยายสัญญาณด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น (Pre-amplifier) และส่งผ่านไปยังตัวกรองความถี่ (Filter) เพื่อกรองความถี่บางช่วงความถี่ออก และส่งผ่านสัญญาณนั้นไปวิเคราะห์เทียบกับขนาดหรือความรุนแรงของรอยความไม่ต่อเนื่อง การวิเคราะห์สัญญาณอาจทำได้ทั้งในโดเมนเวลา (Time domain) และโดเมนความถี่ (Frequency domain) หรือใช้ร่วมกันทั้งโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ (Joint time frequency domain) ความถี่ที่นำไปวิเคราะห์โดยทั่วไปมักอยู่ในช่วงตั้งแต่ 25 กิโลเฮิร์ต จนถึง 3 เมกะเฮิร์ต แต่ความถี่ที่นิยมใช้วิเคราะห์ในงานต่างๆ มักอยู่ในช่วงตั้งแต่ 100 กิโลเฮิร์ตถึง 1 เมกะเฮิร์ต AE มีความไวในการตรวจสอบ (Sensitivity) สูงมาก คลื่นผิว (Surface wave) ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของวัสดุที่ทำให้เกิดระยะขจัด (Displacement) ที่มีขนาดเล็กเพียง 10^{-14} นิ้ว สามารถตรวจพบได้โดยใช้หัวตรวจสอบที่มีความไวสูง

ในรูปที่ 7.1 แสดงตัวอย่างระบบการทดสอบด้วย AE โดยเมื่อวัตถุชนิดหนึ่งถูกแรงดึงกระทำที่ปลายทั้งสองจนกระทั่งเกิดการเสียรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) หรือเกิดการแตกในเนื้อวัสดุ รอยแตกนั้นจะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดเสียงทั้งแบบคลื่นตามยาว (longitudinal wave) และคลื่นตามขวาง (transverse wave) คลื่นทั้งสองชนิดจะเคลื่อนที่ไปทุกทิศทางจนถึงที่ผิวของวัสดุและทำให้เกิดคลื่นผิวขึ้น หัวตรวจสอบที่ติดตั้งไว้ที่ผิวของวัสดุก็จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลของคลื่นเสียงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า และสัญญาณทางไฟฟ้านั้นจะถูกนำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 7.1 แสดงตัวอย่างระบบการทดสอบด้วย AE

แหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติก

แหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติก จะอยู่ในรูปแบบต่างๆ ของการเกิดการเสียรูป (Deformation) หรือ การเกิดการแตกร้าว ตัวอย่างของต้นกำเนิดคลื่นอะคูสติกที่ทำให้เกิดสัญญาณขนาดใหญ่มากได้แก่การ เกิดแผ่นดินไหว หรือการเกิดสัญญาณขนาดเล็กเช่น การบิดตัวที่ไม่เท่ากันของอะตอม (Twining) หรือ การไถลเสียรูประหว่างขอบเกรน (Grain boundary sliding) เป็นต้น การเสียรูปของวัสดุซึ่งจะเกิดขึ้น ก่อนถึงจุดล้าตัว (Yield point) หรือก่อนที่จะแตกหักนั้นไม่สามารถตรวจจับด้วยการทดสอบโดยไม่ ทำลายวิธีอื่น แต่สามารถตรวจจับด้วยวิธี AE ได้

ต้นกำเนิดเสียงอะคูสติกอีกแบบหนึ่งคือ ต้นกำเนิดเสียงที่มีได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงในเนื้อ ของวัสดุโดยตรงเช่น เสียงที่เกิดจากการรั่ว (Leak) ของก๊าซหรือของเหลว เสียงที่เกิดจากควิเตชัน (Cavitation) หรือเสียงที่เกิดจากการเสียดสี (Friction) เป็นต้น แหล่งกำเนิดเสียงประเภทนี้จัดว่าเป็น แหล่งกำเนิดเสมือน (Pseudo sources)

7.1.3 อุปกรณ์การทดสอบด้วยอะคูสติกอิมิชชัน

อุปกรณ์ชุดทดสอบ AE มีส่วนประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

หัวตรวจสอบ

ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลของคลื่นเสียงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปมีอยู่ 2 ชนิดคือ แบบ สัมผัส (Contact) และแบบไม่สัมผัส (Non contact)

1. หัวตรวจสอบ แบบสัมผัส หัวตรวจสอบชนิดนี้จะติดตั้งโดยการสัมผัสกับวัตถุที่จะทดสอบ โดยตรง ใช้สารช่วยสัมผัส (Couplant) ในการช่วยให้การส่งผ่านคลื่นเสียงได้ดียิ่งขึ้น ชนิด ของสารช่วยสัมผัสจะเป็นชนิดเดียวกันกับการทดสอบด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง การยึดติดกับ วัตถุที่จะทดสอบอาจทำได้โดยใช้แม่เหล็ก เทปกาว หรือการใช้ฮ็อทกซี ภายในหัว ตรวจสอบชนิดนี้จะมีลักษณะเหมือนกับหัวตรวจสอบคลื่นเสียงความถี่สูง ซึ่งประกอบด้วย แผ่นรองหลัง (Backing material) และฮ็อทกซีที่ทำหน้าที่ให้หัวตรวจสอบรักษารูปร่างและ ตำแหน่งอยู่ได้ ภายในหัวตรวจสอบจะมีผลึกซึ่งปัจจุบันนิยมใช้ผลึกชนิด PZT (Lead Zirconate Titanate) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานกลของคลื่นเสียง (ที่ส่งผ่านมาจากรอยความ ไม่ต่อเนื่อง) เป็นพลังงานทางไฟฟ้า และส่งต่อสัญญาณผ่านสายเคเบิลไปยังอุปกรณ์ขยาย

สัญญาณเบื้องต้น ในรูปที่ 7.2 แสดงหวัตรวสอบซึ่งต่ออยู่กับอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้นซึ่งติดตั้งอุปกรณ์กรองสัญญาณอยู่ภายใน

2. หวัตรวสอบ แบบไม่สัมผัส ใช้หลักการการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงระยะขจัดที่เกิดขึ้นที่ผิวของวัตถุที่ทดสอบ และสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ในหวัตรวสอบแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electromagnetic transducer) หรือการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุไฟฟ้าในหวัตรวสอบแบบคาปาซิแตนซ์ (Capacitance transducer)

อุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น

ทำหน้าที่ขยายสัญญาณทางไฟฟ้าให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ปกติแล้วอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้นควรอยู่ใกล้กับหวัตรวสอบมากที่สุด (ประมาณ 1 เมตร) เพื่อทำการขยายสัญญาณก่อนที่สัญญาณจะถูกลดทอนลง เมื่อถูกส่งผ่านสายเคเบิลหรืออุปกรณ์อื่น อุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้นบางครั้งจะถูกออกแบบให้บรรจุอยู่ในหวัตรวสอบ

อุปกรณ์กรองสัญญาณ

มักจะติดตั้งอยู่ภายในอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น เพื่อทำหน้าที่กรองสัญญาณเสียงในย่านความถี่ที่ไม่เกี่ยวข้อง หรือสัญญาณรบกวน (Noise) ออกไป อุปกรณ์กรองสัญญาณมี 3 ชนิดคือ

1. แบบไฮพาส (Hi – pass) จะยอมให้เฉพาะสัญญาณที่มีความถี่สูงผ่าน เช่น 100 KHz Hi – pass จะยอมให้สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่า 100 กิโลเฮิร์ตผ่าน
2. แบบแบนด์พาส (Band – pass) จะยอมให้เฉพาะสัญญาณที่มีความถี่อยู่ในช่วงที่กำหนดผ่าน เช่น 100 – 300 KHz Band – pass จะยอมให้สัญญาณที่อยู่ในช่วง 100 กิโลเฮิร์ต ถึง 300 กิโลเฮิร์ตผ่าน
3. แบบโลพาส (Low – pass) จะยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำผ่าน เช่น 100 KHz Low – pass จะยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่า 100 กิโลเฮิร์ตผ่าน

แบบแบนด์พาส จะเป็นแบบที่ใช้กันมากกว่าชนิดอื่น เนื่องจากโดยปกติในการทดสอบด้วย AE มักต้องการตัดเสียงรบกวนทั้งความถี่สูงและต่ำออก เช่น ตัดความถี่ต่ำจากการสั่นสะเทือนออก และตัดเสียงรบกวนเช่นจากสัญญาณทางไฟฟ้า หรือจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความถี่สูงออก

อุปกรณ์รับและประมวลสัญญาณ (Discriminator)

ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณจากอนาล็อก (Analog) เป็น ดิจิตอล (Digital) และ ประมวลสัญญาณนั้นให้อยู่ในรูปของอะคูสติคพารามิเตอร์ (AE parameter) อุปกรณ์รับและประมวลสัญญาณแสดงไว้ดังในรูปที่ 7.3 แต่สำหรับงานวิจัยนอกจากข้อมูลทางโดเมนเวลาแล้ว มักจำเป็นต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์บันทึกข้อมูลทางด้านโดเมนความถี่ด้วย เพื่อใช้วิเคราะห์หาคุณลักษณะของสัญญาณ เช่น ความถี่ของสัญญาณที่ปลดปล่อยจากรอยความไม่ต่อเนื่องและสัญญาณรบกวน เพื่อเลือกอุปกรณ์และอะคูสติคพารามิเตอร์ที่

เหมาะสมต่อการทดสอบ ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่สามารถบันทึกได้ทั้งทางโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ แสดงไว้ดังในรูปที่ 7.4

อุปกรณ์ชุดทดสอบ AE ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ทั้งหมดตั้งแต่ในข้อ 1-4 แสดงไว้ดังในรูปที่ 7.5 ส่วนอุปกรณ์ทดสอบสำหรับทดสอบงานในภาคสนามจะมีขนาดเล็กกว่า ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการพกพา



รูปที่ 7.2 แสดงหัวตรวจสอบและอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น
ซึ่งติดตั้งอุปกรณ์กรองสัญญาณอยู่ภายใน



รูปที่ 7.3 อุปกรณ์รับและประมวลสัญญาณ ทางโดเมนเวลารุ่น LOCAN 320



รูปที่ 7.4 อุปกรณ์รับสัญญาณทั้งโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ Spectrum Analyzer



รูปที่ 7.5 อุปกรณ์ชุดทดสอบ AE

7.1.4 ชนิดของคลื่น (Type of wave)

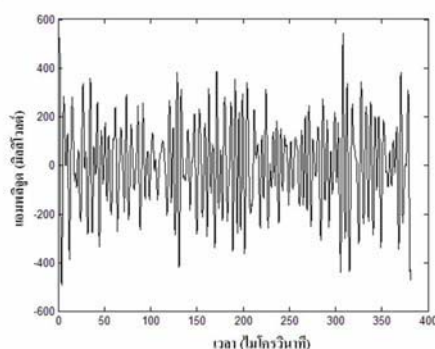
คลื่นเสียงทางกลที่ปลดปล่อยออกจากวัสดุและตรวจจับด้วยหัวตรวจสอบนั้น คลื่นเสียงชนิดคลื่นผิว (Surface wave) มักส่งผลมากกว่าคลื่นชนิดตามยาว (Longitudinal wave) และคลื่นตามขวาง (Shear wave) ทั้งนี้เนื่องจากมีแอมพลิจูดของระยะขจัดที่สูงกว่า และการลดทอนของพลังงานน้อยกว่า คลื่นชนิดอื่นเนื่องจากการเคลื่อนที่ไปบนผิวของวัสดุ เมื่อหัวตรวจสอบเปลี่ยนคลื่นเสียงทางกลเป็นคลื่นเสียงทางไฟฟ้าแล้ว สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

แบบต่อเนื่อง (Continuous)

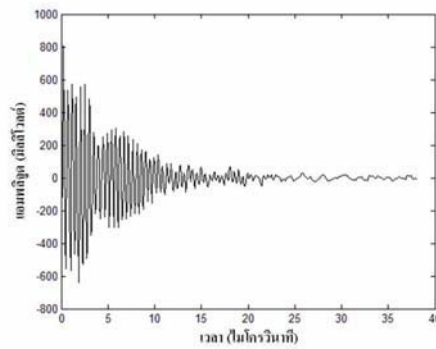
เป็นคลื่นที่เกิดต่อเนื่องกันไป ดังแสดงในรูปที่ 7.6 เช่น สัญญาณเสียงจากการรั่วของวาล์วเป็นต้น พารามิเตอร์ที่มักใช้วิเคราะห์ข้อมูลกับสัญญาณแบบต่อเนื่องคือ ค่าระดับสัญญาณเฉลี่ย (ASL) หรือ AErms เป็นต้น

แบบเป็นช่วง (Burst)

เป็นคลื่นที่มีลักษณะเกิดขึ้นเป็นช่วง ดังแสดงในรูปที่ 7.7 พารามิเตอร์ที่นิยมใช้วิเคราะห์ข้อมูลกับงานที่มีสัญญาณแบบเป็นช่วง ได้แก่ เคานท์ (Count) หรือ ฮิต (Hit) เป็นต้น



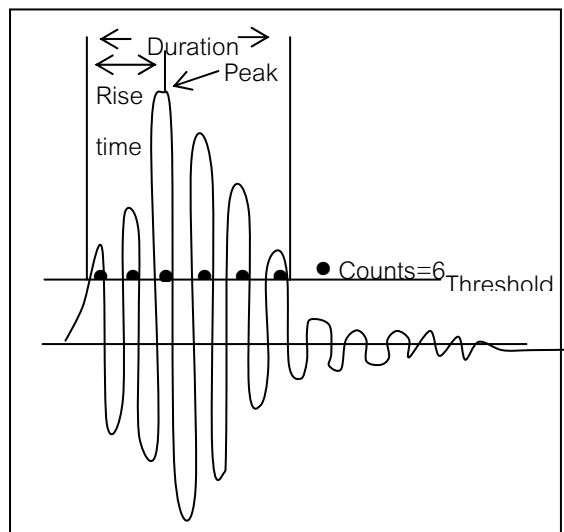
รูปที่ 7.6 แสดงคลื่นเสียงที่มีลักษณะแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 7.7 แสดงคลื่นเสียงที่มีลักษณะแบบเป็นช่วง (Burst)

7.1.5 อะคูสติคพารามิเตอร์

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าสัญญาณทางไฟฟ้าจากอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น จะถูกนำไปวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปของอะคูสติคพารามิเตอร์ โดยอุปกรณ์รับและประมวลสัญญาณอะคูสติคพารามิเตอร์ที่นิยมใช้กันอยู่ในงานสนามโดยทั่วไปคือพารามิเตอร์ที่ประมวลผลมาจากทางโดเมนเวลาและที่นิยมใช้กันมากที่สุดและยังใช้กันอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบันได้แก่ “เคาท์” (Count) อะคูสติคพารามิเตอร์ที่สำคัญในทางโดเมนเวลาแสดงไว้ดังในรูปที่ 7.8



รูปที่ 7.8 แสดงอะคูสติคพารามิเตอร์

ความหมายของพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

- เคาท์ คือจำนวนครั้งที่สัญญาณคลื่นอะคูสติคมีขนาดแอมพลิจูดสูงกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold) จากตัวอย่างในรูปที่ 7.8 จำนวน “เคาท์” มีค่าเท่ากับ 6

- แอมพลิจูดสูงสุด (peak amplitude) คือขนาดของค่าสูงสุดของแอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นอะคูสติก
- ไรส์ไทม์ (Risetime) คือระยะเวลาที่เริ่มนับตั้งแต่สัญญาณที่มีค่าสูงกว่าขีดเริ่มเปลี่ยนจนถึงเวลาที่สัญญาณมีขนาดแอมพลิจูดสูงสุด
- ดูเรชันไทม์ (Duration time) คือระยะเวลาที่เริ่มนับตั้งแต่สัญญาณที่มีค่าสูงกว่าขีดเริ่มเปลี่ยนจนถึงเวลาที่สัญญาณต่ำกว่าขีดเริ่มเปลี่ยน
- พลังงาน (Energy) คือพลังงานของคลื่นอะคูสติกที่เทียบได้จากการอินทิเกรตแรงดันไฟฟ้าที่ ยกกำลังสอง เทียบกับเวลาแล้วหารด้วยความต้านทานไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจวัด ดังแสดงในสมการ

$$U = \frac{1}{R} \int_0^t V^2(t) dt \quad (1)$$

โดยที่	U	คือ	ค่าพลังงาน
	R	คือ	ความต้านทานไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจวัด
	t	คือ	เวลา
V(t)	คือ	ค่าแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่เวลา t	

นอกจากนั้นยังมีอะคูสติกพารามิเตอร์อื่นๆ ที่นิยมใช้กันแต่ไม่ได้ให้คำจำกัดความไว้ในที่นี้ เช่น อีเวนท์ (Event) ฮิต (Hits) ค่าเฉลี่ยของระดับสัญญาณ (Average signal level (หรือ ASL)) เป็นต้น ในการทดสอบการตั้งค่าขีดเริ่มเปลี่ยนมีความสำคัญมาก เนื่องจากจะทำให้ผลของอะคูสติกพารามิเตอร์หลายตัวเปลี่ยนตามไปด้วย โดยปกติจะเลือกค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมตามสัญญาณรบกวนในสภาพแวดล้อมที่กำลังทดสอบ

7.2 การกัดกร่อน [13,14]

ในความหมายอย่างกว้าง ๆ การกัดกร่อนจะหมายถึง การที่โลหะถูกทำลายด้วยขบวนการทางเคมี ไฟฟ้าเคมี หรือการปฏิสัมพันธ์ทางโลหะวิทยา (Metallurgical Interaction) ระหว่างวัสดุ กับ สิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปแล้วจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ แต่ดำเนินต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ในบางกรณีการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นเพียงรอยด่างหรือรอยคราบบางๆ บนผิวโลหะ ซึ่งอาจเป็นตัวหน่วงการเกิดการกัดกร่อนในช่วงต่อไปด้วยซ้ำ แต่ในบางกรณีรอยแผลอันเกิดจากการกัดกร่อนมีลักษณะกว้าง และลึก บริเวณ รอบๆ รอยกัดกร่อนจะมีรูพรุนเช่นนี้ยากที่จะหาทางป้องกันหรือยับยั้งได้ต่อไป

7.2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อน

อัตราการไหล น้ำที่หยุดนิ่ง หรือไหลอย่างช้า ๆ (อัตราการไหล < 1.5 เมตรต่อวินาที) จะก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนมากกว่าน้ำที่ไหล ซึ่งอาจเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก (Pitting Corrosion), การกัดกร่อนเนื่องจากความแตกต่างของปริมาณออกซิเจน (Oxygen Concentration Cells) แลกการกัดกร่อนเนื่องจากแบคทีเรีย (MIC-Microbiologically Influenced Corrosion) แต่ถ้าอัตราการไหลสูงกว่า 2.4 เมตรต่อวินาที สนิมหรือออกไซด์ที่ผิวเหล็กซึ่งเป็นตัวช่วยชะลอให้การกัดกร่อนช้าลงจะถูกทำลาย เป็นผลให้เกิดการกัดกร่อนแบบ Erosion – Corrosion อัตราการกัดกร่อนประมาณ 30 – 50 มิลลิเมตรต่อปี

อุณหภูมิ อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่เป็นตัวเร่งให้เกิดการกัดกร่อนที่สูง แต่จะต้องมีการพิจารณาควบคู่ไปกับปริมาณคลอไรด์ในน้ำด้วย เช่น ถ้าน้ำที่มีปริมาณคลอไรด์ต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ออกซิเจนจะละลายในน้ำได้น้อยลงทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง และถ้าสำหรับน้ำที่มีปริมาณคลอไรด์สูงที่อุณหภูมิเดียวกัน อัตราการกัดกร่อนจะไม่ลดลงแม้ว่าออกซิเจนในน้ำนั้นจะลดลงก็ตาม

ค่า pH คือค่าความเป็นกรด – ด่าง สารละลายคลอไรด์ที่มี $\text{pH} < 4$ หรือมีความเป็นกรดมากขึ้น หรือมี pH ยิ่งต่ำ อัตราการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ $\text{pH} > 4$ ปฏิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นคือ Reduction of Oxygen ความเร็วของปฏิริยาจะขึ้นอยู่กับความเร็วของการแพร่ของออกซิเจนซึ่งเป็นไปอย่างช้า ๆ

โดยที่ $\text{pH} < 4$ ปฏิริยารีดักชันที่เกิดขึ้น คือ Reduction of Hydrogen Ion ผลของปฏิริยาจะได้ก๊าซออกซิเจน ไฮโดรเจนอออนจะมีอยู่มาก เนื่องจากเป็นกรด ดังนั้นปฏิริยาการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และ ที่ $\text{pH} > 9$ ปฏิริยาการกัดกร่อนจะช้าลงมากเนื่องจากมีฟิล์มไฮดรอกไซด์ที่ผิวเหล็ก

สารเคมีอื่นๆ หากในน้ำมีคลอไรด์อยู่อย่างเดียว การเกิดการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นอย่างไม่ซับซ้อนนัก แต่ถ้ามีสารเคมีอื่นๆ อยู่ด้วยการกัดกร่อนจะซับซ้อนมากขึ้น เช่น ภาชนะความดันที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม 316 บนเหล็กกล้าภายในบรรจุเอสเทอร์ที่มีคลอไรด์ $\text{pH} \approx 4.5$ มีการเติม NaCl ลงในระบบด้วย ภาชนะใบนี้มีอายุการใช้งาน 16 ปี โดยไม่เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากความเค็ม มีเพียงหลุมตื้นๆ ไม่กี่หลุม ทั้งนี้เนื่องจากในภาชนะนี้มีแอมมีน (amine) และ โซเดียมอะซิเตต (sodium acetate) ซึ่งเป็นสารยับยั้งปนอยู่ด้วย

7.2.2 หลักการของไฟฟ้าเคมีสำหรับการกัดกร่อน

การกัดกร่อนโดยแท้จริงแล้วเป็นขบวนการทางไฟฟ้าเคมีที่สำคัญยิ่ง ซึ่งอาจเกิดขึ้นกับส่วนใดส่วนหนึ่งหรือทั้งแท่งโลหะ จะมีการเปลี่ยนสภาพจากโลหะ (Metallic State) ซึ่งมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าไปเป็นโลหะที่มีประจุไฟฟ้า (Ionic State) ในกระบวนการกัดกร่อนจะมีการไหลของกระแสไฟฟ้าจากบริเวณใดบริเวณหนึ่งของผิวโลหะผ่านสารละลายที่เป็นตัวนำไฟฟ้าไปสู่บริเวณอื่น หรือโลหะอื่น สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) คือ สารละลายที่มีอนุภาคไฟฟ้า อออน (Ions) คือ อะตอมหรือกลุ่มอะตอมที่เสียสมดุลทางไฟฟ้า ดังเช่น น้ำบริสุทธิ์จะประกอบด้วยกลุ่มอะตอมที่มีประจุ

บวกคือ H^+ และหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งมีประจุลบ OH^- ที่ปริมาณเท่าๆ กัน ดังนั้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่อาจจะเป็นน้ำธรรมดา น้ำเกลือ กรด ด่าง ที่มีความเข้มข้นต่างๆ กัน ในการที่วงจรไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้ครบสมบูรณ์จะเป็นจะต้องมีขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้วบวก (Anode) และ ขั้วลบ (Cathode) และขั้วทั้งสองจะต้องเชื่อมต่อถึงกัน ขั้วไฟฟ้าอาจเป็นโลหะต่างชนิดกัน หรือเป็นส่วนต่างๆ บนโลหะแท่งเดียวกันก็ได้ การต่อเชื่อมระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองอาจมีเนื้อโลหะเป็นสะพาน แต่ในการกัดกร่อนโดยทั่วไปแล้วเกิดจากการที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมาสัมผัสกันโดยตรง การที่กระแสไฟฟ้าจะไหลถ่ายเทระหว่างขั้วไฟฟ้า จำเป็นจะต้องมีค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสอง ซึ่งปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้ในโลหะจะเป็นดังนี้

- โลหะทำปฏิกิริยากับน้ำ

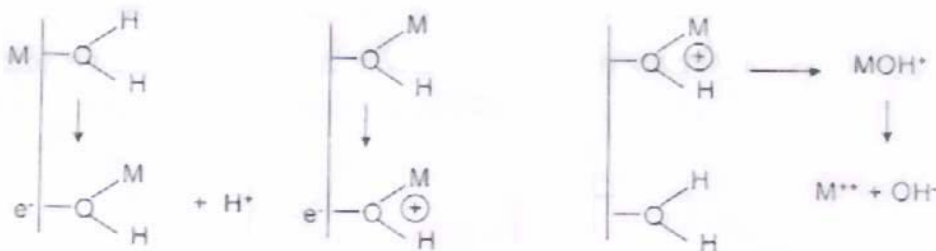
น้ำเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว ดังนั้นจะถูกดูดซับที่ผิวโลหะ จากนั้นน้ำที่ถูกดูดไว้นี้จะเกิดปฏิกิริยากับอิเล็กตรอน ของโลหะที่ละลายออกมาได้ $MOH + H^+$ ดังรูปที่ 7.9



รูปที่ 7.9 การละลายของโลหะในน้ำ [14]

- โลหะเกิดการกัดกร่อน (Water Corrosion)

เมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วโลหะจะละลายออกมาอยู่ในรูป M^{2+} ในสารละลาย (น้ำ) โดยกลไกดังรูปที่ 7.10 คือ MOH จะสูญเสีย e^- อีกตัวกลายเป็น MOH^+ ซึ่งกลุ่มอะตอมนี้จะละลายในน้ำแล้ว แตกตัวเป็น $M^{2+} + OH^-$



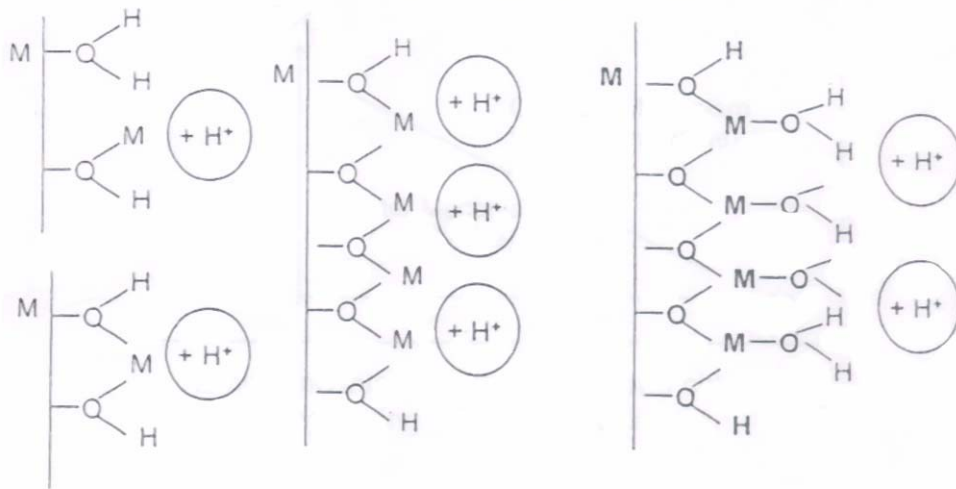
รูปที่ 7.10 การเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนของโลหะ [14]

หากเขียนปฏิกิริยา การกัดกร่อนของเหล็กได้ดังนี้



- โลหะเกิดพาสซีสฟิล์ม (Water Passivation)

จากปฏิกิริยาที่กล่าวมาแล้ว เมื่อน้ำถูกดูดซับไว้ที่ผิวโลหะแล้ว อีออนของโลหะจะละลายออกมาจะถูกจับโดยโมเลกุลของน้ำที่อยู่ผิวโลหะ แล้วเกิดเป็นออกไซด์ของโลหะที่ผิว จากนั้นน้ำจะถูกดูดซับไว้ที่ผิวของออกไซด์ (แทนที่จะถูกดูดซับที่ผิวของโลหะโดยตรง) ดังรูปที่ 7.11



รูปที่ 7.11 การเกิดฟิล์มที่ผิวโลหะโดยน้ำ [14]

- โลหะเกิดการกัดกร่อนเมื่ออยู่ในสารละลายที่มีคุณสมบัติเป็นกรด

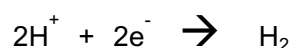
การกัดกร่อนของโลหะที่อยู่ในน้ำที่มีคุณสมบัติเป็นกรดนั้นมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงซึ่งประกอบด้วยปฏิกิริยา Oxidation และ Reduction

โดยปฏิกิริยา Oxidation ของโลหะจะเกิดขึ้นเป็นขั้วอะโนด ;

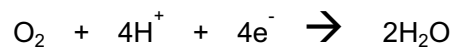


และปฏิกิริยา Reduction จะเกิดที่ขั้วแคโทด โดยทั่วไปจะเป็นดังนี้

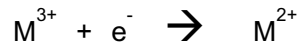
1. มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น



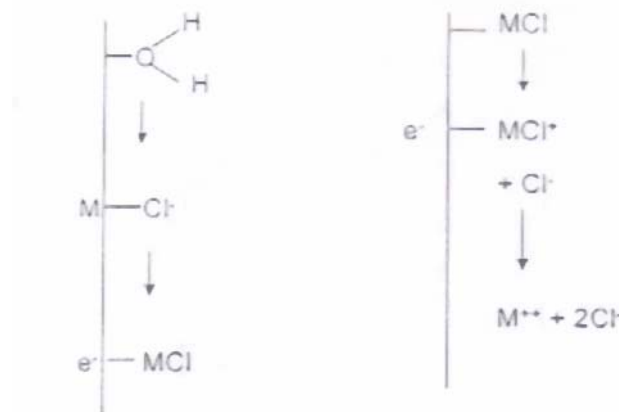
2. เกิด Reduction ของออกซิเจน



3. เกิด Reduction ของไอออนของโลหะ



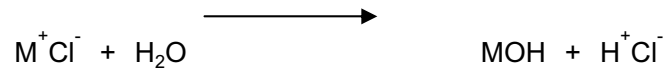
สำหรับการกัดกร่อนเมื่อมีคลอไรด์ร่วมด้วย (Chloride Assisted Corrosion Process) ในกรณีที่น้ำที่มี Cl^- ผสมอยู่เมื่อโลหะสัมผัสกับน้ำ โมเลกุลของ Cl^- จะถูกดูดซับไว้ที่ผิวโลหะแทนที่จะเป็นโมเลกุลน้ำ จากนั้นจะเกิด MCl และทำปฏิกิริยาต่อไปในที่สุดจะได้ $\text{M}^{2+} + 2\text{e}^-$ ดังรูปที่ 7.12 จากนั้นจะเกิดปฏิกิริยา Reduction แล้วเกิดก๊าซไฮโดรเจนเหมือนกันกับกรณีการกัดกร่อนในน้ำที่มี คุณสมบัติเป็นกรดทั่วไปซึ่งกรณีที่มีคลอไรด์นี้โลหะจะไม่สามารถสร้างฟิล์มได้อีก สามารถเปรียบเทียบ Cl^- เป็นเหมือนกับปั๊มที่ปั๊ม M^{2+} จากโลหะ เพราะกลไกนี้จะเกิดซ้ำ ๆ กัน และก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานี้จะเกาะอยู่ตามผิวของวัสดุซึ่งจะนำไปสู่การกัดกร่อนต่อไป



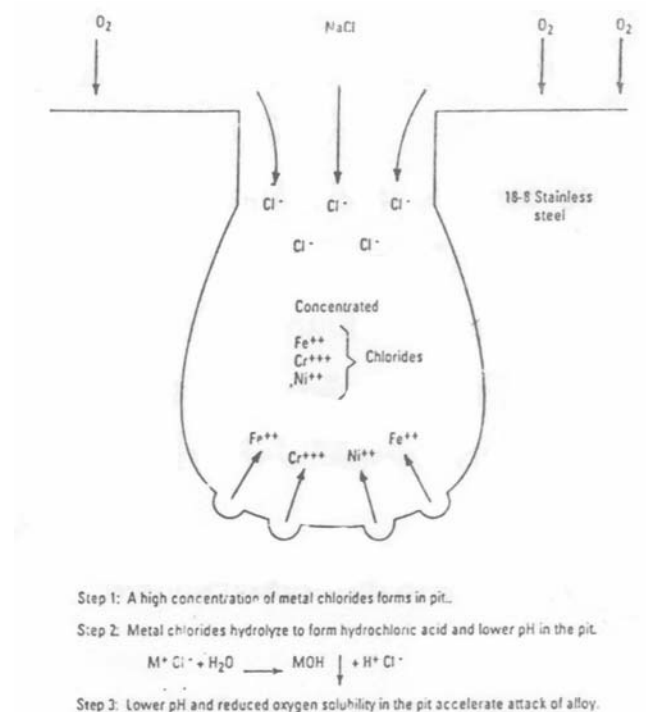
รูปที่ 7.12 คลอไรด์ไอออนในน้ำมีผลต่อการกัดกร่อนของโลหะ [14]

เหล็กกล้าไร้สนิมมักเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก (Pitting Corrosion) เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม 304 และ 316 เมื่อจุ่มในน้ำทะเลซึ่งมี $\text{pH} = 8$ และมีอัตราการไหลต่ำ จะเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก แม้ว่า 316 จะมีโมลิบดีนัม (Mo) 2 % ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ป้องกันการกัดกร่อนก็ตาม เนื่องจากคลอไรด์จะไปทำลายฟิล์มออกไซด์ที่ปกป้องเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นบริเวณเล็ก ๆ บริเวณนี้จะเป็น อาโนดซึ่งมีพื้นที่เล็กเมื่อเทียบกับพื้นที่คาโทด ซึ่งเป็นบริเวณที่ผิวออกไซด์ยังดีอยู่มีบริเวณกว้างกว่ามาก ดังนั้นปฏิกิริยาการกัดกร่อนจะเกิดที่อาโนดอย่างรุนแรงเป็นหลุมลึกลงไป อาจจะตลอดความหนาก็ได้ ซึ่งทิศทางของหลุมมักไปตามทิศทางของแรงโน้มถ่วงของโลก นอกจากนี้ยังเป็นที่น่าทึ่งที่ว่าการกัดกร่อนแบบหลุมลึกนี้ จะมีการเร่งปฏิกิริยาโดยอัตโนมัติ (Autocatalytic Process) คือเมื่อเกิดเป็นหลุมแล้วภายในหลุมจะเป็นกรดมากขึ้น หรือ pH มีค่าต่ำลง ซึ่งมีขั้นตอนการเกิดดังนี้

ในตอนแรก เมื่อเกิดเป็นหลุมจะมีออกซิเจนของคลอไรด์ในหลุมอยู่มากและออกซิเจนต่ำ ต่อมาคลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้กรด



ส่งผลให้ pH ในหลุมต่ำลง การละลายของออกซิเจนต่ำลงด้วย ทำให้เกิดการกัดกร่อนรุนแรงมากขึ้น เหล็กกล้าไร้สนิมจะมีปัญหาการกัดกร่อนแบบครีวิส ซึ่งจะเกิดบริเวณซอกมุมอับ หรือ บริเวณที่มีสารละลายตกค้างอยู่ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีออกซิเจนต่ำ บริเวณนี้จะเป็นแอโนด เมื่อเทียบกับบริเวณอื่นๆ ลักษณะการเกิดคล้ายกับการกัดกร่อนแบบหลุมลึก รูปที่ 7.13 แสดงถึงการกัดกร่อนแบบหลุมลึก



รูปที่ 7.13 การกัดกร่อนแบบหลุมลึกเนื่องจากคลอไรด์ [14]

7.2.3 ลักษณะเฉพาะของการกัดกร่อนแต่ละชนิด

เมื่อผิวหน้าของโลหะประสบกับการสึกกร่อนผุพังลงด้วยอัตราสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวหน้า จะถูกกล่าวว่าวัตถุเกิดการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform Corrosion) การกัดกร่อนลักษณะนี้มักไม่ค่อยมีปรากฏกับพวกโลหะ ทั้งนี้เพราะยากที่จะหาโลหะที่มีเนื้อเดียวกันตลอดผิวหน้าจึงเป็นผลให้จุดต่างๆ บนผิวหน้าโลหะเกิดการกัดกร่อนไม่เท่ากัน สำหรับตัวอย่างของการกัดกร่อนที่พบบ่อยในโลหะจะเป็นดังนี้

- การกัดกร่อนเนื่องจากความเค้น (SCC)

ความเค้นเป็นตัวเร่งการกัดกร่อนในบรรยากาศบางแบบ โดยเฉพาะเมื่อโลหะกำลังรับความเค้นจากภายนอกหรือกำลังรับความเค้นแรงดึงภายในหรือภายหลังผ่านงานรีดเย็น การแตกหักอาจเกิดแบบผ่าเกรน หรือแตกตามขอบรอยต่อเกรน หรือเกิดทั้ง 2 แบบพร้อมกัน ขนาดของความเค้นที่จำเป็น และเพียงพอที่จะก่อให้เกิดการแตกหัก ขึ้นกับตัวกลางที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนและโครงสร้างของโลหะพื้น การกัดกร่อนจากความเค้นเป็นรูปแบบของการกัดกร่อนที่มีความสำคัญสูงเพราะสามารถเกิดขึ้นได้ในโลหะหลายชนิด ซึ่งการคงทนต่อการกัดกร่อนจะขึ้นอยู่กับปริมาณของนิเกิลในโลหะนั้นๆ

ปริมาณนิเกิลต่ำสุดที่เหล็กกล้าไร้สนิมยังทนต่อ SCC ได้อยู่ระหว่าง 8 – 12 % ซึ่งเท่ากับปริมาณนิเกิลใน 304 และ 316 ได้มีผลจากการใช้งานของโรงงาน 2 แห่ง ที่ใช้ 304 และ 316 ที่ต้องสัมผัสกับน้ำที่มีคลอไรด์ 40 ppm ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จะเกิด SCC เมื่อใช้ไปได้เป็นระยะเวลาปีครึ่งถึงสองปี

จากการสำรวจในโรงงานอุตสาหกรรมที่เกิดความเสียหายแบบ SCC ทั้งหมดพบว่า [13]

46% ของความเสียหายแบบ SCC จะเกิดที่ pH = 2-6

42% ของความเสียหายแบบ SCC จะเกิดที่ pH = 6-9

11% ของความเสียหายแบบ SCC จะเกิดที่ pH > 9

โดยที่ pH สูง ๆ จะเกิดความเสียหายแบบ SCC ได้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งโดยทั่วไปสารละลายที่มีคลอไรด์จะก่อให้เกิดความเสียหายแบบ SCC ได้บ้างที่อุณหภูมิห้อง แต่จะเกิดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

เหล็กโดยปกติจะมีโครงสร้างผลึกเป็น bcc หรือเฟอร์ไรต์ แต่เนื่องจากเป็น bcc จะเปราะที่อุณหภูมิต่ำ (แต่จะต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากความเค้นเมื่อมีคลอไรด์ได้ดี) เมื่อเติมโครเมียมลงไป โครงสร้างผลึกไม่เปลี่ยนแปลง แต่ความต้านทานการกัดกร่อนดีขึ้น แต่เมื่อเติมนิเกิล (นิเกิลมีโครงสร้างเป็น fcc) ลงไปมากพอจะทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมีโครงสร้างผลึกเป็น fcc หรือ ออสเทนไนต์ซึ่งจะไม่เปราะ มีอุณหภูมิต่ำ คุณสมบัติทางกลดี เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม 304 และ 316 เป็นต้น

- การกัดกร่อนบริเวณรอยแยก (Crevice Corrosion)

ในความหมายทั่วไปการกัดกร่อนชนิดนี้จะรวมถึงการกัดกร่อนผุพังบริเวณรอยต่อของโลหะซึ่งสัมผัสอยู่กับสิ่งแวดล้อมที่ช่วยเสริมการกัดกร่อน เราทราบจากประสบการณ์ว่าการกัดกร่อนมีแนวโน้มจะเกิดบริเวณรอยแยก ซึ่งมีสารละลายตกค้างเป็นเวลานานกว่าจะแห้ง การกัดกร่อนยังสามารถเกิดขึ้นได้ในบริเวณรอยแยกที่จมมิดในสารละลาย ปฏิกิริยาการกัดกร่อนเกิดขึ้นได้จากความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของกลุ่มออกซิเจนที่สัมผัสชั้นงานบริเวณรอยต่อ ออกซิเจนสามารถเข้าถึงบริเวณด้านนอกของรอยต่อได้ง่าย จึงเกิดขั้วลบ (Cathode) บริเวณนี้บริเวณด้านในของรอยต่อสัมผัสออกซิเจนเบาบาง มีสภาพเป็นขั้วบวก (Anode) ผลผลิตชุดแรกของการกัดกร่อนจะปกปิดบริเวณศูนย์กลางขั้วบวก จนกระทั่งการกัดกร่อนขั้นต่อไปไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ ออกซิเจนจะไม่สามารถ

ทะลุเข้าไปถึงเนื้อโลหะ เกิดบริเวณออกซิเจนเบาบาง ที่นี้ศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นแต่ถ้าปฏิกิริยาเกิดต่อไป การกัดกร่อนแบบหลุมลึกจะเกิดขึ้นที่ขั้วบวก การกัดกร่อนมักเกิดบริเวณที่ออกซิเจนเข้าไม่ถึงเสมอ รอยแยกยังมีผลทำให้เกิดความแตกต่างของปริมาณออกซิเจนของโลหะ ณ จุดต่างๆ ระหว่างรอยเชื่อมต่อ เป็นต้นว่า บริเวณผิวในของรอยประกบจะเกิดออกซิเจนของโลหะความเข้มข้นสูงมากกว่าบริเวณรอบนอก การกัดกร่อนมีแนวโน้มจะเกิดบริเวณออกซิเจนต่ำประสิทธิภาพ คือที่ขอบรอยต่อของจุดเชื่อมทางกล วิธีการที่ดีที่สุดที่จะหลีกเลี่ยงการเกิดการกัดกร่อนประเภทนี้ คือพยายามอย่าให้มีรอยแยก รอยเชื่อมต่อ โดยการออกแบบชิ้นงานใหม่ หรือ อุดรอยต่อให้พ้นจากการสัมผัสความชื้นหรือบรรยากาศการกัดกร่อน

- การกัดกร่อนเป็นหลุมลึก (Pitting Corrosion)

จากรูปที่ 7.14 เป็นตัวอย่างหนึ่งของการกัดกร่อนแบบไม่สม่ำเสมออันเป็นผลมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของโลหะ บางบริเวณเกิดแกนแข็ง บางบริเวณรูปผลึกโครงสร้างภายในบิดเบี้ยว ผลจากการที่โลหะมีเนื้อไม่สม่ำเสมอ ทำให้แต่ละจุดมีศักย์ไฟฟ้าไม่เท่ากัน เกิดการกัดกร่อนเป็นหลุมลึก เฉพาะจุด หลุมของการกัดกร่อนเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยที่ปฏิกิริยาจะเริ่มต้นในบริเวณแคบๆ แล้วค่อยๆ เจาะลึกลงไปข้างในจนเกิดการผุพังเป็นหลุมใหญ่ และ ในที่สุดปากหลุมก็จะเกิดการกัดกร่อนเป็นวงกว้างขึ้น การกัดกร่อนประเภทหลุมลึกบนโลหะพื้นอาจเกิดขึ้นเมื่อผิวเคลือบ (Coating) หรือฟิล์มป้องกัน (Passive Film) เกิดการฉีกขาด หรือ เกิดความเสียหาย

ในทางด้านอุตสาหกรรม การกัดกร่อนประเภทนี้จะทำให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงมากกว่าประเภทอื่นเนื่องจากการเกิดหลุมลึกจะทำให้เนื้อวัสดุมีลักษณะเป็นรูพรุนและเกิดอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งวัสดุทะลุได้ซึ่งการที่โลหะทำปฏิกิริยากับตัวกลางต่างชนิดกันก็ให้ผลที่แตกต่างกันซึ่งรายละเอียดจะถูกกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

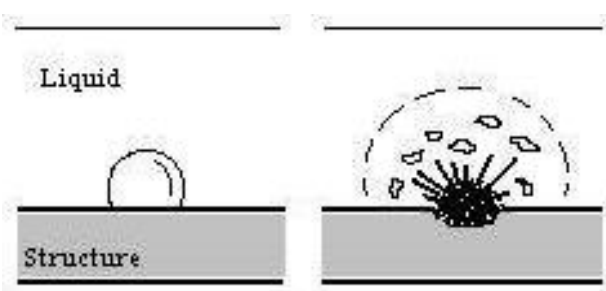


รูปที่ 7.14 การกัดกร่อนแบบหลุมลึก (Pitting Corrosion)

จากการศึกษาจะพบว่า การกัดกร่อนนั้นมีหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบนั้นก็จะมีเงื่อนไขของกระบวนการเกิดการกัดกร่อนที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเข้าใจถึงปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี หรือกระบวนการพื้นฐานของการเกิดการกัดกร่อนนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อใช้ในการอธิบายกระบวนการ และการเกิดการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในงานวิจัยอย่างมีเหตุผล และมีประสิทธิภาพ

7.3 แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกในกระบวนการกัดกร่อน

แหล่งกำเนิดของสัญญาณ AE ของโลหะภายใต้สภาวะการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น การชนจากการไหลของสารละลายที่ผิวหน้าวัสดุ หรือ สัญญาณทางไฟฟ้าที่เป็นตัวเร่งให้เกิดการกัดกร่อน แต่โดยทั่วไปมีการยอมรับว่าแหล่งกำเนิดจะเกิดจากปรากฏการณ์การแตกของพาสซีฟฟิล์มและการแตกของฟองก๊าซไฮโดรเจน[3] ที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีที่สารละลายกระทำกับผิววัสดุ ซึ่งการแตกของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นใต้ของเหลวบริเวณสัมผัสเนื้อโลหะจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนไหวจากการสั่นสะเทือนบนผิวหน้าระหว่างของเหลวและโลหะ ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนการได้รับแรงกระทำซ้ำ ๆ ก่อให้เกิดความเค้นสูงอันเนื่องมาจากฟองอากาศเกิดขึ้นและระเบิดยุบตัว ผลจากการระเบิดของฟองอากาศก่อให้เกิดความเค้นกระแทกผิวหน้าโลหะ ทำให้อนุภาคโลหะค่อย ๆ เขี่ยหลุดจากบริเวณผิว ซึ่งเป็นการทำให้เกิดการทำลายพาสซีฟฟิล์มของโลหะนั้น ๆ จนเป็นการนำไปสู่การเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก ซึ่งเป็นการกัดกร่อนที่รุนแรงได้



รูปที่ 7.15 การกัดกร่อนจากการสั่นสะเทือนจากการระเบิดของฟอง

ในการศึกษาถึงกระบวนการการถูกทำลายของพาสซีฟฟิล์มเนื่องจากการแตกของฟองอากาศได้อธิบายถึงการเกิดอะคูสติกอิมพัลส์ขึ้นได้ โดยสมมุติให้สัมประสิทธิ์ความตึงของพื้นผิวของสารละลายที่เป็นตัวกลางในการกัดกร่อน(γ) รัศมีของฟองอากาศคือ(R) ดังนั้นความดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงตึงผิวของฟองอากาศ(P) แสดงได้ดังสมการที่ 2 [15]

$$P = 2\gamma/R \quad (2)$$

และแรงกระทำเฉื่อย(F)ที่เกิดขึ้นที่ผิวพาสซีฟฟิล์มของโลหะเนื่องจากฟองอากาศเมื่อพิจารณาส่วนครึ่งบนของฟองอากาศที่เกาะที่ผิววัสดุ คือ[4]

$$F = 2\pi R^2 \quad (3)$$

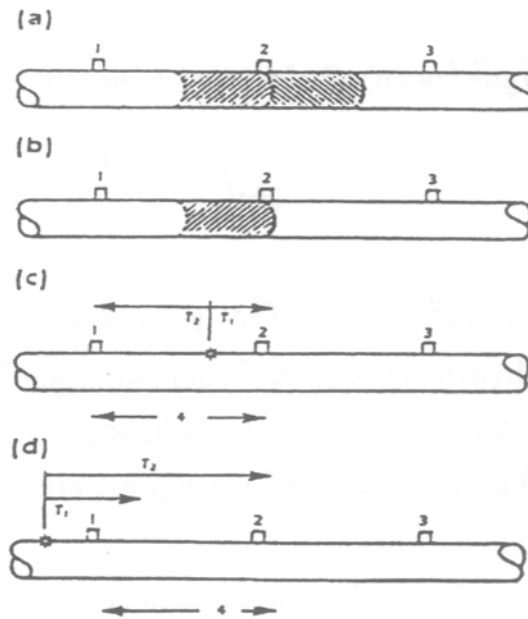
ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นนี้จะผ่านไปสู่วิถีของพาสซีฟฟิล์มและเนื้อวัสดุ เมื่อฟิล์มเกิดการแตก ผิวหน้าของวัสดุจะเกิดการเคลื่อนไหวที่ซับซ้อนมากจากแรงที่กระทำและจะส่งสัญญาณอะคูสติกออกมาทำให้ตรวจจับได้ จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้มาทำการวิเคราะห์ต่อไป ซึ่งจากการวิเคราะห์นั้นสามารถบอกได้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างเกิดการกักตร้อน กับ ค่าตัวแปรทางอะคูสติกที่เกี่ยวข้องได้ รวมถึงยังสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งของการเกิดการกักตร้อนได้อีกด้วย โดยการวิเคราะห์หาตำแหน่งการกักตร้อนนั้นจะขอกว่าในลำดับต่อไป

7.4 การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดอะคูสติกโดยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน [8,11]

วิธีอะคูสติกอิมิชชันสามารถนำมาใช้ในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดอะคูสติกได้ โดยอาศัยหลักการเบื้องต้นของการบันทึกช่วงเวลาที่แตกต่างกันของการรับสัญญาณของหัวรับสัญญาณ ในการติดตั้งหัวรับสัญญาณหลายตัว แล้วกำหนดค่าความเร็วของเสียงในตัวกลางที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการคำนวณหาตำแหน่ง ซึ่งปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดจำนวนหัวรับสัญญาณที่ใช้ในการตรวจสอบขึ้นอยู่กับระยะหรือขนาดของพื้นที่ที่ต้องการตรวจสอบ รวมทั้งการลดลงของแอมพลิจูด(Attenuation) เมื่อเสียงเดินทางผ่านตัวกลาง จำนวนหัวรับสัญญาณจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะหรือพื้นที่ที่ต้องการตรวจสอบและตามอัตรา การลดลงของสัญญาณเสียงของวัสดุแต่ละชนิด โดยการหาตำแหน่งโดยวิธีอะคูสติกอิมิชชันนี้แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ

7.4.1 วิธีการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดแบบเส้นตรง (Linear Source Location)

พิจารณาถึงสถานะที่มีหัวตรวจสอบ 3 หัว ติดอยู่บนโครงสร้างที่เป็นเส้นตรง เช่น กรณีของท่อตรงยาว (ดังรูปที่ 7.16) สมมติให้เกิดสัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนท่อ ซึ่งส่งผลให้คลื่นความเค้นเดินทางในสองทิศทางโดยที่มีค่าความเร็วคงที่และเท่ากัน หากพิจารณาหัวรับสัญญาณที่มีการรับคลื่นความเค้นอันดับแรก (เรียกว่า first hit) จากรูปที่ 7.16(a) ถ้า first hit เกิดขึ้นที่หัวรับสัญญาณที่ 2 จะได้ว่าแหล่งกำเนิดนั้นอยู่บริเวณตั้งแต่จุดกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างหัวตรวจสอบที่ 1 และ 2 จนถึงจุดกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างหัวตรวจสอบที่ 2 และ 3 โดยพื้นที่นี้จะลดลงถ้ามีการจับสัญญาณลำดับที่ 2 (second hit) เพิ่มขึ้นอีก เช่น ถ้าสัญญาณลำดับที่ 2 นี้อยู่ที่หัวตรวจสอบที่ 1 จะทำให้รู้ว่าแหล่งกำเนิดนั้นอยู่บริเวณตั้งแต่จุดกึ่งกลางของหัวตรวจสอบของหัวตรวจสอบที่ 1 และ 2 จนถึงหัวตรวจสอบที่ 2 ดังแสดงได้ในรูปที่ 7.16 (b)



รูปที่ 7.16 วิธีการหาตำแหน่งแบบเส้นตรง

- (a) บริเวณที่เกิดขึ้นเมื่อหัวตรวจสอบที่ 2 ได้รับสัญญาณลำดับที่ 1
- (b) บริเวณที่เกิดขึ้นเมื่อหัวตรวจสอบที่ 2 ได้รับสัญญาณลำดับที่ 1 และหัวตรวจสอบที่ 1 ได้รับสัญญาณลำดับที่ 1
- (c) ความแตกต่างของเวลา $\Delta t = T_2 - T_1$
- (d) แหล่งกำเนิดอยู่นอกแนวของหัวตรวจสอบ $\Delta t = T_2 - T_1 = \text{ค่าคงที่} \equiv D$

วิธีการนี้เรียกว่าวิธี Zone Source Location โดยสัญญาณที่ได้รับนั้นจะเป็นเพียงแต่แสดงบริเวณ (zone) แทนที่จะเป็นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคลื่น แต่ถ้าสามารถวัดค่าเวลาที่แตกต่างของการวัดได้ (ตามที่แสดงในรูปที่ 7.16(c)) ก็จะทำให้สามารถหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคลื่นที่ถูกต้องได้ ถ้าค่าความแตกต่างทางเวลาของสัญญาณที่ตรวจจับได้จาก หัวตรวจสอบที่ 1 และ 2 เป็นศูนย์ จะสามารถบอกได้ว่าตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคลื่นนั้นอยู่ที่จุดกึ่งกลางของระยะห่างของหัวรับตรวจสอบทั้งสอง หรือ ถ้ากรณีที่ลำดับการรับสัญญาณคือ หัวตรวจสอบที่ 1 จากนั้นเป็นหัวตรวจสอบที่ 2 ค่าความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการเดินทางระหว่างสองหัวตรวจสอบจะเป็น

$$\Delta t = \frac{D}{V} \quad (4)$$

ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณ (d) จะเป็น

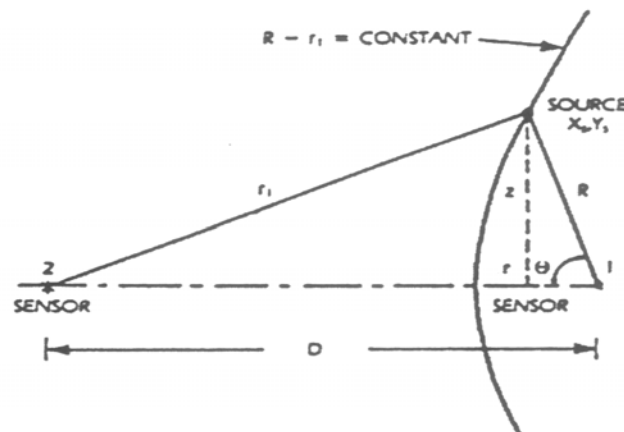
$$d = \frac{(D - v\Delta t)}{2} \quad (5)$$

โดยที่ D = ระยะทางระหว่างหัวรับสัญญาณ
 d = ระยะจากรอยบกพร่องถึงหัวรับสัญญาณอ้างอิง
 v = ความเร็วเสียงในชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบ
 Δt = ช่วงเวลาที่แตกต่างกันของการรับสัญญาณของหัวรับสัญญาณ

เมื่อระยะ d จะวัดจากหัวตรวจสอบที่ได้รับสัญญาณลำดับที่ 1 ก่อนและถ้าแหล่งกำเนิดของสัญญาณอะคูสติกอยู่นอกแนวของหัวตรวจสอบ ตามรูปที่ 7.16(d) ความแตกต่างทางเวลาของสัญญาณระหว่างหัวตรวจสอบทั้งสองจะคงที่ ซึ่งเป็นการระบุได้ว่าแหล่งกำเนิดคลื่นสัญญาณอยู่นอกบริเวณระหว่างหัวตรวจสอบทั้งสอง วิธีการของการหาตำแหน่งแบบเส้นตรง (Linear Location) นั้นเหมาะสมกับกรณีที่ระยะห่างของหัวตรวจสอบมีค่ามากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบ ซึ่งหากไม่เป็นไปตามเงื่อนไขนี้การระบุตำแหน่งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้

7.4.2 วิธีการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแบบระนาบ 2 มิติ (Location of Source in Two Dimensions)

พิจารณาให้หัวตรวจสอบ 2 หัว วางอยู่บนระนาบขอบเขตอนันต์ โดยจะสมมติให้เป็นไปตามทฤษฎี คือ คลื่นที่เกิดจากความเค้นจะเดินทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นอะคูสติก ด้วยความเร็วที่คงที่ในทุกทิศทางดังรูปที่ 7.17



รูปที่ 7.17 การหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดบนระนาบ 2 มิติ

จากรูปที่ 17 จะได้

$$V\Delta t = r_1 - R$$

และ

$$Z = R \sin \theta$$

$$Z^2 = r_1^2 - (D - R \cos \theta)^2$$

ดังนั้น

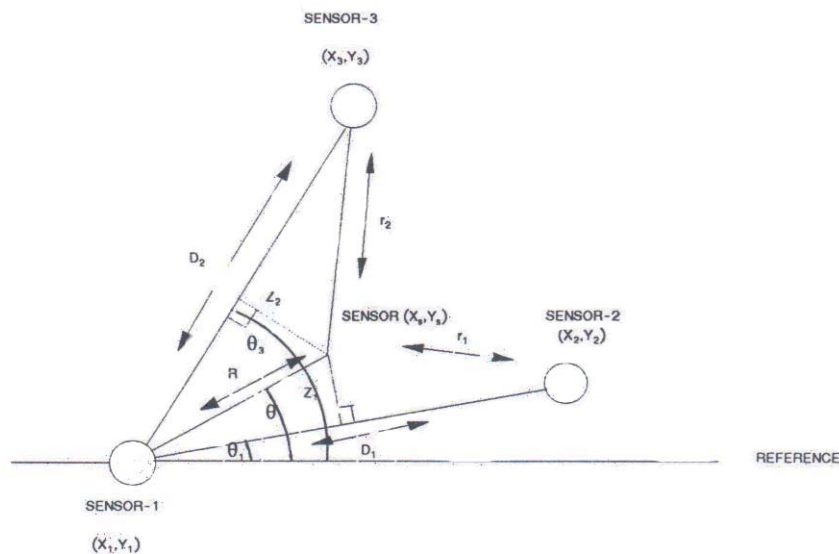
$$R^2 \sin^2 \theta = r_1^2 - (D - R \cos \theta)^2$$

$$R^2 = r_1^2 - D^2 + 2DR \cos \theta$$

ซึ่งจะได้

$$R = \frac{1}{2} \frac{D^2 - V^2 \Delta t_1^2}{V \Delta t + D \cos(\theta - \theta_1)} \quad (6)$$

สมการที่ (6) เป็นสมการของเส้นไฮเพอร์โบลาที่ผ่านแหล่งกำเนิดคลื่นจุด (x,y) โดยทุกๆ จุดบนเส้นไฮเพอร์โบลานี้จะให้ข้อมูลที่ตรงต่อข้อมูลเริ่มต้น (ซึ่งได้แก่ลำดับของสัญญาณและค่าความแตกต่างของเวลา) ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 7.17 จะมีประสิทธิภาพที่ไม่เพียงพอสำหรับที่จะนำมาทำการหาตำแหน่งแหล่งกำเนิดคลื่นในระบบ 2 มิติได้ ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลที่ดีขึ้น จึงได้มีการเพิ่มจำนวน หัวตรวจสอบอีก 1 หัว ตามรูปที่ 7.18 โดยทำให้สัญญาณที่ตรวจจับได้มีลำดับของสัญญาณ 3 ลำดับ และค่าความแตกต่างทางเวลาอีก 2 ค่า (ค่าความแตกต่างระหว่างสัญญาณลำดับที่ 1 กับ 2 และค่าความแตกต่างทางเวลาระหว่างสัญญาณลำดับที่ 1 กับ 3)



รูปที่ 7.18 การวางหัวตรวจสอบ 3 หัว และมีลำดับของสัญญาณ คือ 1,2 และ 3

ซึ่งจะได้เป็น

$$R = \frac{1}{2} \frac{D_1^2 - v^2 \Delta t_1^2}{v \Delta t_1 + D_1 \cos(\theta - \theta_1)} \quad (7)$$

และ

$$R = \frac{1}{2} \frac{D_2^2 - v^2 \Delta t_2^2}{v \Delta t_2 + D_2 \cos(\theta_3 - \theta)} \quad (8)$$

โดยที่ R = ระยะจากแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงถึงหัวรับสัญญาณที่ 1 (หัวรับสัญญาณอ้างอิง)

θ = มุมของเส้นที่ลากจากหัวรับสัญญาณที่ 1 ไปยังแหล่งกำเนิดอะคูสติก ทำกับแกนอ้างอิง

θ_1 = มุมของเส้นที่ลากจากหัวรับสัญญาณที่ 1 ไปยังหัวรับสัญญาณที่ 2 ทำกับแกนอ้างอิง

θ_2 = มุมของเส้นที่ลากจากหัวรับสัญญาณที่ 1 ไปยังหัวรับสัญญาณที่ 3 ทำกับแกนอ้างอิง

Δt_1 = ช่วงเวลาที่แตกต่างกันของการรับสัญญาณของหัวรับสัญญาณที่ 1 และ 2 (วินาที)

Δt_2 = ช่วงเวลาที่แตกต่างกันของการรับสัญญาณของหัวรับสัญญาณที่ 1 และ 3 (วินาที)

D_1 = ระยะทางระหว่างหัวรับสัญญาณที่ 1 และ 2 (มม.)

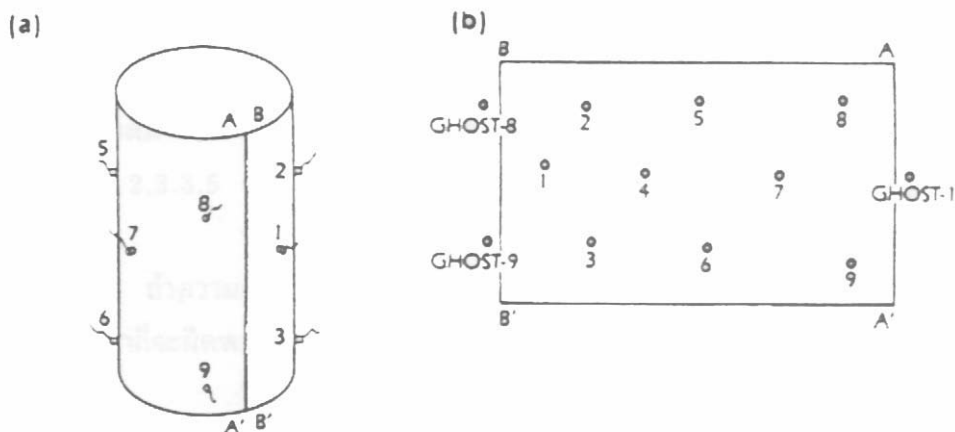
D_2 = ระยะทางระหว่างหัวรับสัญญาณที่ 1 และ 3 (มม.)

V = ความเร็วของเสียงในชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบ (มม. / วินาที)

ซึ่งเมื่อทำการแก้สมการที่ (7) และ (8) จะทำให้ได้ตำแหน่งแหล่งกำเนิดคลื่นในระบบ 2 มิติ ตามภาพที่แสดงในรูปที่ 14 ซึ่งเป็นการแสดงการวางตำแหน่งของ หัวตรวจสอบเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า แต่ในสมการที่ (7) และ (8) ยังสามารถใช้กับกรณีอื่นๆ ได้อีกด้วย

7.4.3 แบบระนาบของผิวทรงกระบอก

คือการหาตำแหน่งที่อยู่ในระนาบของผิวทรงกระบอก เหมาะสมกับงานที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีความหนาไม่มากนักดังรูปที่ 7.19 เช่น ภาชนะรับแรงดัน หรืออาจจะประยุกต์ใช้กับงานที่มีลักษณะเป็นทรงกลมได้ การติดตั้งหัวตรวจสอบสัญญาณและการคำนวณหาตำแหน่งเหมือนกันกับแบบระนาบจะต่างกันเพียงต้องกำหนดคำว่า Wrap ลงในโปรแกรมด้วย



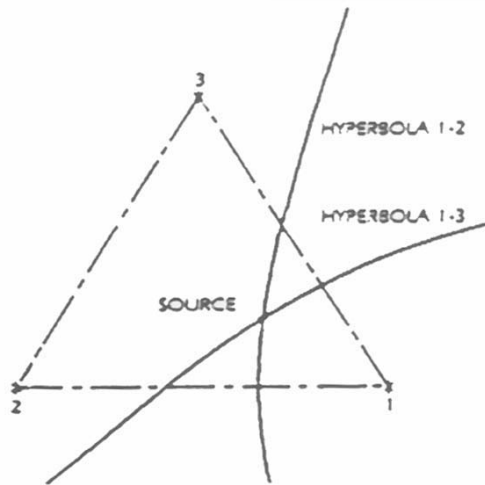
รูปที่ 7.19 การหาตำแหน่งแบบระนาบของผิวทรงกระบอก

• การกำหนดบริเวณที่มีประสิทธิภาพ

โดยทั่วไปแล้ววิธีการแก้ปัญหาในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคลื่นโดยใช้สมการที่ 7 และรูป ซึ่งจะใช้ได้เฉพาะกับพื้นที่ผิวซึ่งมีหัวตรวจสอบติดตั้ง 3 หัว ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการใช้งาน โดยปกติแล้วพื้นที่ที่สนใจในการตรวจสอบจริงจะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับพื้นที่ทั้งหมด เช่น รอยเชื่อม หรือลักษณะของผิวที่หยาบหรือละเอียด

การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคลื่นเป็นกระบวนการการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องได้แก่ โครงสร้างการเรียงตัวของหัวตรวจสอบ ซึ่งมีผลอย่างมากในการคำนวณหา

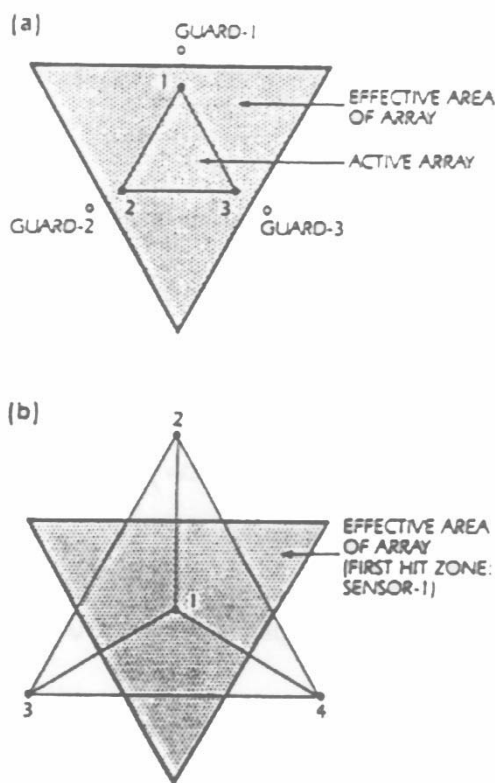
แหล่งกำเนิด ข้อผิดพลาดดังกล่าวสามารถหลีกเลี่ยงได้ โดยการกำหนดบริเวณพื้นที่ประสิทธิภาพให้กับหัวตรวจสอบดังรูปที่ 7.20



รูปที่ 7.20 การหาแหล่งกำเนิดโดยใช้จุดตัดของเส้นไฮเพอร์โบลา

ในรูปที่ 7.20 เป็นเทคนิคของการใช้สัญญาณลำดับที่ 1 ร่วมกับหัวตรวจสอบแบบการ์ด (Guard) โดยจะมีหัวตรวจสอบที่เรียกว่า แอคทีฟ (Active) วางคู่กับหัวตรวจสอบอีกตัวหนึ่งที่เรียกว่า การ์ด (Guard) ถ้าสัญญาณอะคูสติกถูกตรวจจับได้ หัวตรวจสอบที่สามารถรับสัญญาณเป็นหัวแรกจะทำหน้าที่เป็นหัวรับสัญญาณแบบการ์ด จากนั้นสัญญาณนั้นก็จะถูกตีกลับโดยไม่นำไปคำนวณในขั้นตอนการคำนวณ โดยที่สัญญาณลำดับที่ 1 ของหัวรับสัญญาณแบบแอคทีฟ จะได้รับการคำนวณแทน ทั้งนี้ให้ถือว่า หัวตรวจสอบแบบการ์ดจะทำหน้าที่เพียงปฏิเสธข้อมูล โดยจะไม่มีส่วนร่วมในการทำหน้าที่วัด หรือคำนวณแต่อย่างใด ซึ่งพื้นที่ที่เป็นพื้นที่ทำงานจะถูกจำกัดให้อยู่ในบริเวณที่แรงเท่ากัน

ในรูปที่ 7.21 เป็นเทคนิคของการใช้งานร่วมกันระหว่าง บริเวณ (zone) กับค่าความแตกต่างทางเวลา (Δt) โดยพื้นที่ที่ประสิทธิภาพจะถูกจำกัดให้ตีกลับสัญญาณอะคูสติกทั้งหมดจะกว่าหัวรับสัญญาณตรงกลางจะได้รับสัญญาณลำดับที่ 1 เมื่อพื้นที่ที่เป็นบริเวณการทำงานจะแสดงด้วยพื้นที่แรงในภาพ ในกรณีนี้จะไม่มีการแบ่งหัวตรวจสอบเป็นแบบแอคทีฟหรือแบบการ์ด แต่หัวตรวจสอบจะทำงานร่วมกันตามแต่ความเหมาะสมในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติก



รูปที่ 7.21 วิธีการจำกัดพื้นที่เพื่อหาตำแหน่งอย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีที่ใช้การตรวจจับสัญญาณลำดับที่ 1 กับหัวตรวจสอบแบบกอร์ดจะให้ประสิทธิภาพสูงการทำงานด้านการทดสอบไม่ทำลาย ซึ่งจะต้องอาศัยหัวตรวจสอบที่มีความไว (Sensitivity) ที่เหมาะสมกับหัวตรวจสอบแอดทิฟ ซึ่งในการสร้างสัญญาณเพื่อทดสอบประสิทธิภาพอาจทำได้โดยใช้วิธีการหักไส้ดินสอ (Lead Break)

8. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (literature review)

แม้ว่าในปัจจุบันนี้จะมีวิธีการตรวจสอบการเกิดการกัดกร่อน และความเสียหายจากการกัดกร่อนในหลายรูปแบบก็ตาม แต่วิธีการตรวจสอบดังกล่าวจำเป็นที่จะต้องมีการหยุดกระบวนการผลิตเพื่อเตรียมการก่อนการตรวจสอบ หรือ ปัญหาในการเข้าถึงตำแหน่ง หรือบริเวณที่ต้องการตรวจสอบ เช่น การตรวจสอบการกัดกร่อนที่บริเวณภายในกันถังบรรจุ จำเป็นที่จะต้องมีการถ่ายสารบรรจุออกเสียก่อนเพื่อให้สามารถตรวจสอบได้ ณ บริเวณที่เกิดการกัดกร่อนนั้น วิธีอะคูสติกอิมิชั่นเป็นวิธีการตรวจจับคลื่นเสียงอัลตราซาวด์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง ไม่ว่าจะเป็น การตรวจสอบโครงสร้างรับแรงในอุตสาหกรรมการบิน การวิเคราะห์ทางวัสดุ (การวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ กระบวนการเกิดการแตกหัก และลักษณะของการพังทลาย) [1] การตรวจสอบและการประกันคุณภาพโดยการเฝ้าระวังขณะทำการผลิต การตรวจสอบการรั่วของท่อ [2] หรือถึงพิกขนาดใหญ่แบบระบบเวลาจริง [2,3,4,5,6,7] เป็นต้น ซึ่งข้อได้เปรียบของวิธีการนี้คือ ไม่จำเป็นที่จะต้องมีการหยุดระบบการผลิตทั้งหมด การตรวจสอบสามารถกระทำได้แม้ว่าระบบการผลิตยังดำเนินการอยู่ หรือ อาจจะมีการหยุดระบบการผลิตเพียงบางส่วนเท่านั้น

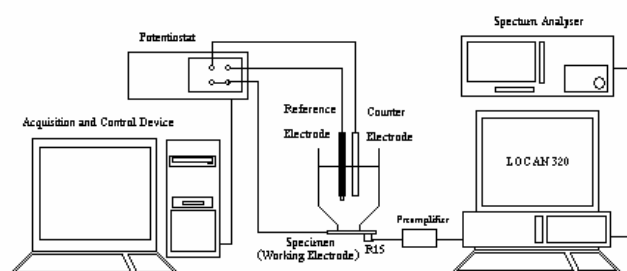
เนื่องจากเป็นระบบการตรวจสอบแบบเวลาจริง (Real-time) ดังนั้นจึงเป็นการลดค่าใช้จ่ายสำหรับการเตรียมการเพื่อการตรวจสอบสำหรับวิธีการตรวจสอบแบบอื่นๆ

การตรวจจับการกัดกร่อนด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ชันก็เป็นการประยุกต์อีกรูปแบบหนึ่ง ที่มีการศึกษาและวิจัยเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก [8,9] เนื่องจากการกัดกร่อนเป็นปัญหาที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในทางอุตสาหกรรม และนำไปสู่การสูญเสียค่าใช้จ่ายจากผลของการกัดกร่อนดังกล่าว ซึ่งการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นนั้นมีหลายรูปแบบที่ก่อให้เกิดความเสียหายทางอุตสาหกรรม โดยที่ได้มีการศึกษาและวิจัยคือ การกัดกร่อนแบบยูนิฟอร์ม และการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ (localized corrosion) ในรูปแบบต่างๆ โดยรูปแบบของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมการกัดกร่อน และชนิดของวัสดุที่เกิดการกัดกร่อน รวมถึงปัจจัยประกอบอื่นๆ ซึ่งในแต่ละงานวิจัยที่ผ่านมาจะมีวิธีการศึกษาการกัดกร่อนในรูปแบบต่างกันโดยเป็นทั้งการวิจัยการกัดกร่อนแบบ passive [10-14] และ active [15-31] หรือทั้งสองรูปแบบ [32-34] โดยมีการนำพารามิเตอร์ต่างๆ ทางอะคูสติก (Count, Amplitude, Rise time, Duration time, Hits, Energy) สำหรับการวิเคราะห์แสดงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทางอะคูสติกกับกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่างๆ โดยการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกกับการกัดกร่อนโดยการแช่ในสารกัดกร่อนและการศึกษาด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีในแต่ละงานวิจัยจะมีความเห็นที่แตกต่างกันไป ซึ่งมีประเด็นของแหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกเป็นประเด็นที่สำคัญ เนื่องจากว่าในกระบวนการกัดกร่อนที่แตกต่างกัน แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกจึงมีความแตกต่างกันไป จึงมีกลุ่มของความคิดเห็นแบ่งออกเป็นสามกลุ่มนั้นคือ 1. มาจากกระบวนการของการกัดกร่อนโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิด pitting และการแตกของ passive film บนผิววัสดุทดสอบ [18-21] หรือ ความเสียหายจากกระบวนการกัดกร่อน [22-30] 2. มาจากแรงที่เกิดจากฟองก๊าซที่เป็น product ในขั้นตอนของการเกิดการกัดกร่อนมีการแตกตัวที่บริเวณผิวหรือใกล้กับผิววัสดุ หรือการสั่นสะเทือนจากการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซในสารกัดกร่อน [12,17,34] และ 3. อาจจะมาจากการทั้งสองกระบวนการ กล่าวคือสัญญาณอะคูสติกที่ตรวจจับได้นั้นมีแหล่งกำเนิดมาจากทั้งจากฟองก๊าซ และการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเนื่องจากการกัดกร่อน [10,13,14,15,16,32,33]

จากข้อความที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะพบว่าในต่างประเทศได้มีการนำเอา AE มาใช้ตรวจจับการกัดกร่อนแล้ว แต่ยังไม่มีการศึกษาอย่างชัดเจนว่าแหล่งกำเนิดเสียงมาจากกลไกหรือปฏิกิริยาใด เป็นผลทำให้การแบ่งระดับความรุนแรงออกเป็นระดับต่างๆ มีความถูกต้องอยู่ในระดับหนึ่งเท่านั้น โดยความคลาดเคลื่อนจะมีอยู่สูงในระดับการกัดกร่อนระดับปานกลาง และมีความถูกต้องในกรณีที่มีการกัดกร่อนน้อยและในระดับสูงมาก ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาแหล่งกำเนิดเสียงที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อนแบบหลุมลึก (Pitting) และแบบยูนิฟอร์ม (Uniform) โดยวัสดุที่จะทำการศึกษาได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม และเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำถังพักและวัสดุโครงสร้าง นอกจากนั้นจะทำการศึกษาและพัฒนาเทคนิคในการแบ่งแยกข้อมูลซึ่งเป็นงานวิจัยที่ไม่ค่อยมีผู้ตีพิมพ์ผลงานมากนัก ให้มีความแม่นยำมากขึ้นและมีข้อจำกัดน้อยลง หลังจากนั้นจะทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราการกัดกร่อนเช่นการเปลี่ยนแปลงปริมาณซัลเฟต หรือความเป็นกรดของสารละลายเพื่อพิจารณาผลกระทบต่อสัญญาณ AE ว่าถ้านำไปใช้กับอุตสาหกรรมซึ่งใช้ถังบรรจุน้ำมันหลายชนิด จะมีผลกระทบต่อสัญญาณ AE หรือไม่อย่างไร

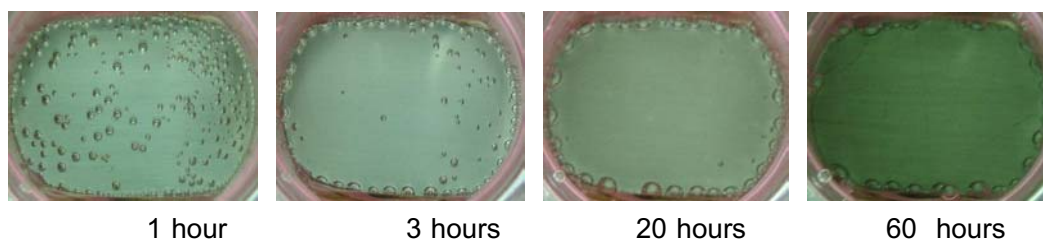
9. สรุปผลการดำเนินงานของโครงการ

9.1 ศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ AE กับอัตราการกัดกร่อนในวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม ได้ใช้วัสดุชนิดเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ขนาดความหนา 1 มม. มาออกแบบการทดลองเร่งให้เกิดการกัดกร่อนชนิดแบบหลุมลึก (pitting corrosion) ในระยะเวลาอันรวดเร็ว ทั้งแบบที่ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ (NaCl 30 %) และใช้โซเดียมคลอไรด์อย่างอ่อน (NaCl 3 %) พร้อมทั้งเร่งด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี หลังจากนั้นเก็บข้อมูลสัญญาณ AE เพื่อหาความสัมพันธ์กับการเกิดการกัดกร่อน จากผลการทดลองในเบื้องต้นพบว่า AE parameter เช่น Hit , Energy และ Amplitude มีความสัมพันธ์กับอัตราการกัดกร่อน



รูปที่ 9.1 แสดงระบบการทดลองการเร่งการกัดกร่อนในวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม

รูปของฟองแก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการใช้ NaCl 30% ณ. เวลาต่าง ๆ กันดังแสดงในรูปที่ 9.2 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติคพารามิเตอร์ ซึ่งได้แก่แอมพลิจูดกับความถี่ที่เกิดในโดเมนความถี่ในรูปที่ 9.3 a และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติคพารามิเตอร์ซึ่งได้แก่ฮิทกับความถี่ที่เกิดในโดเมนเวลา ในรูปที่ 9.3 b



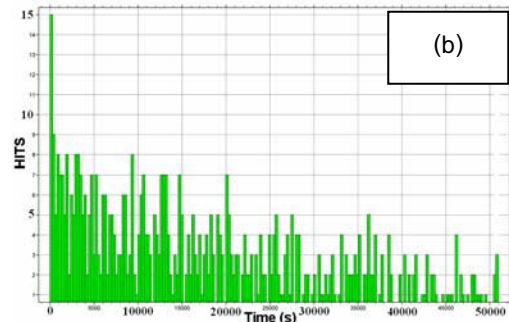
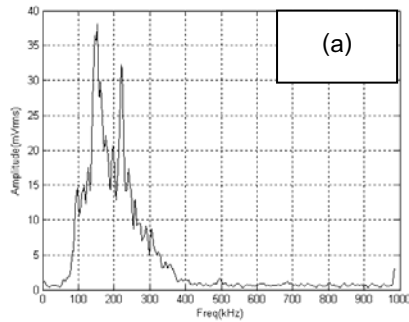
1 hour

3 hours

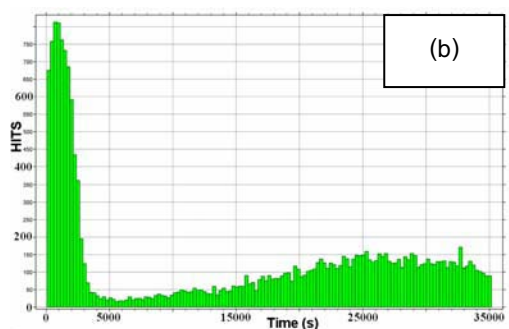
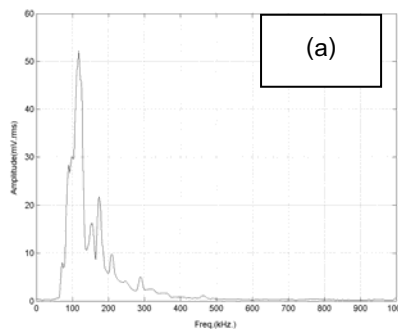
20 hours

60 hours

รูปที่ 9.2 ฟองแก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการใช้ NaCl 30% pH=1



(a) ความสัมพันธ์ในโดเมนความถี่ (b) ความสัมพันธ์ในโดเมนเวลา
รูปที่ 9.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์ในโดเมนความถี่และโดเมนเวลา
เมื่อใช้ 30%NaCl



(a) ความสัมพันธ์ในโดเมนความถี่ (b) ความสัมพันธ์ในโดเมนเวลา
รูปที่ 9.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอะคูสติกพารามิเตอร์ในโดเมนความถี่และโดเมนเวลา
เมื่อใช้ 3%NaCl

รายละเอียดของผลการทดลอง ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก. และ ภาคผนวก ข. บทความเรื่อง “Identification of AE Source in Corrosion Process” และ “ผลของการถ่ายเทประจุทางไฟฟ้าเคมีต่อสัญญาณอะคูสติกในการตรวจจับการกัดกร่อนด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์” ตามลำดับ

9.2 ศึกษาแหล่งกำเนิดเสียง AE จากปฏิกิริยาการกัดกร่อน

ในส่วนของการหาแหล่งกำเนิดคลื่นเสียง ได้ใช้การผลทดลองในหัวข้อที่ 9.1 มาวิเคราะห์หาสัญญาณ เพื่อหาต้นกำเนิดของเสียง โดยวิเคราะห์ห่อะคูสติกพารามิเตอร์เทียบกับกลไกการเกิดกระบวนการกัดกร่อนรวมถึงการสังเกตจากการทดลอง จากผลการวิจัยสรุปได้ว่า การทดลองที่ใช้ NaCl เข้มข้นเป็นตัวเร่งการกัดกร่อน แหล่งกำเนิดเสียง ได้แก่ ฟองอากาศ และการแตกของ Passive film ส่วนที่ใช้แบบเร่งด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีแหล่งกำเนิดเสียงมาจากการแตกของ Passive film และจาก pitting corrosion เอง

รายละเอียดของผลการทดลอง ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก. และ ภาคผนวก ข. บทความเรื่อง “Identification of AE Source in Corrosion Process” และ “ผลของการถ่ายเทประจุทางไฟฟ้าเคมีต่อสัญญาณอะคูสติกในการตรวจจับการกัดกร่อนด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน” ตามลำดับ

9.3 การแยกแยะข้อมูล เพื่อแบ่งกลุ่มของความรุนแรงของการกัดกร่อน

ได้ใช้ข้อมูลในชุดของการทดลองใช้โซเดียมคลอไรด์อย่างอ่อน (NaCl 3 %) พร้อมทั้งเร่งด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี มาวิเคราะห์หาเทคนิคการแบ่งแยกความรุนแรงของการกัดกร่อน โดยแบ่งตามความลึกของการกัดกร่อนของวัสดุทดลองออกเป็น 5 ระดับ ได้ใช้วิธีการแบ่งแยกโดยใช้หลักการ Semi-parametric ซึ่งได้แก่ Maximum A Posteriori (MAP) และ Maximum Likelihood (ML) classifiers เทียบกับวิธีที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไปคือ Feed-Forward Neural Network (FFNN) และ Probabilistic Neural Network (PNN) จากนั้นนำวิธีการต่าง ๆ ไปทำนายอัตราการกัดกร่อน ซึ่งผลของความถูกต้องในการทำนายดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงผลของความถูกต้องในการทำนายความรุนแรงของการกัดกร่อน

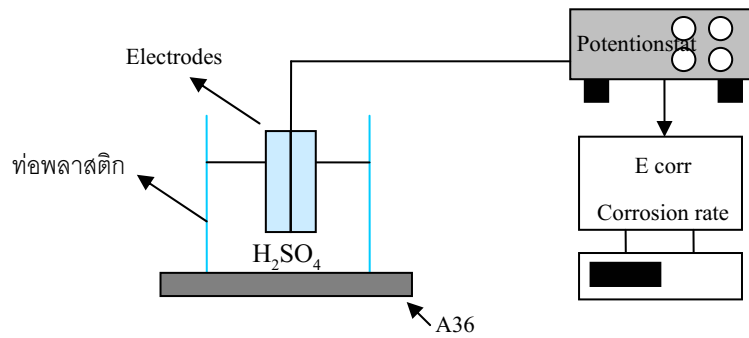
Classifier	Correctly Classified Result [%]			
	Min	Max	Avg	Var
MAP	98.97	99.74	99.26	0.010
ML	98.68	99.52	99.03	0.014
FFNN [6]	84.73	98.85	90.65	3.115
PNN [7]	89.62	99.13	97.33	1.418

จากงานวิจัยพบว่าวิธีการวิเคราะห์โดยใช้หลักการ Semi-parametric สามารถแบ่งแยกความรุนแรงของการกัดกร่อน ออกเป็น 5 ระดับ ได้แม่นยำกว่าวิธีอื่น

รายละเอียดของผลการทดลอง ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ค. บทความเรื่อง “Semi-Parametric Learning for Classification of Pitting Corrosion Detected by Acoustic Emission”

9.4 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ AE กับอัตราการกัดกร่อนและกับความเข้มข้น (pH) ของสารละลายในวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอน

ทดลองใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด A 36 เพื่อให้ทำให้เกิดอัตราการกัดกร่อนต่างๆ เริ่มการทดลองโดยการหาค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อนดังการทดลองแสดงในรูปที่ 9.5 ค่าของศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมดังแสดงตารางที่ 2

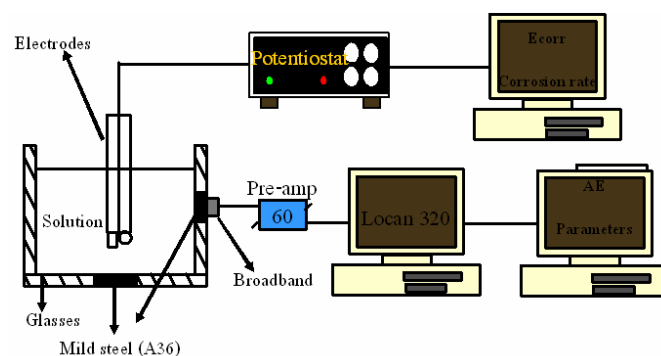


รูปที่ 9.5 การทดลองหาค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อน

ตารางที่ 2. ผลการทดลองหาค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน จากการกัดกร่อนบนวัสดุทดสอบ

ผลการทดลองหาค่า E corr I corr และ Corrosion rate ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกับกรด H ₂ SO ₄			
pH	E corr(Volts)	I corr(amp/cm ²)	Corrsion rate(mm / year)
pH 4.5	-0.47577	3.64E-05	0.0625
pH 5	-0.5613	1.15E-05	0.0504
pH 5.5	-0.43673	8.66 E-06	0.0432
pH 6	-0.48579	1.27E-06	0.0292
Weldment pH 5	-0.47319	5.17E-05	0.06

จากนั้นทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอะคูสติกอิมิชชันกับการกัดกร่อนในระดับอัตราการกัดกร่อนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 9.6



รูปที่ 9.6 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอะคูสติกอิมิชชันกับการกัดกร่อนในระดับต่าง ๆ

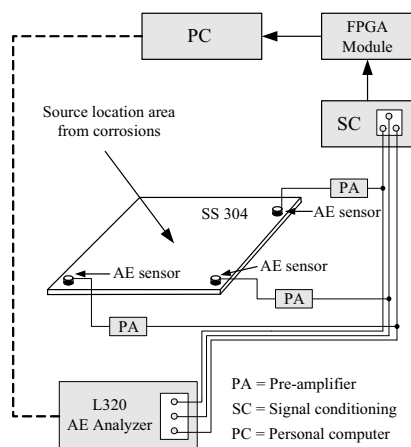
จากผลการทดลองสามารถสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ได้ในระดับความเชื่อมั่นมากกว่า 90% ได้ดังนี้

$$\text{จำนวนสัญญาณอะคูสติก"อิตรวม"} = 6.0 (\text{อัตราการกัดกร่อน})^2 - 38.5(\text{อัตราการกัดกร่อน}) + 62.5$$

รายละเอียดของผลการทดลอง ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ง. และ ภาคผนวก จ. บทความเรื่อง “Effect of Sulfuric Acid Concentration on Acoustic Emission Signals Obtained from Uniform-Corrosion” และบทความเรื่อง “การตรวจจับการกัดกร่อนแบบยูนิฟอร์มในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและรอยเชื่อมด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์”

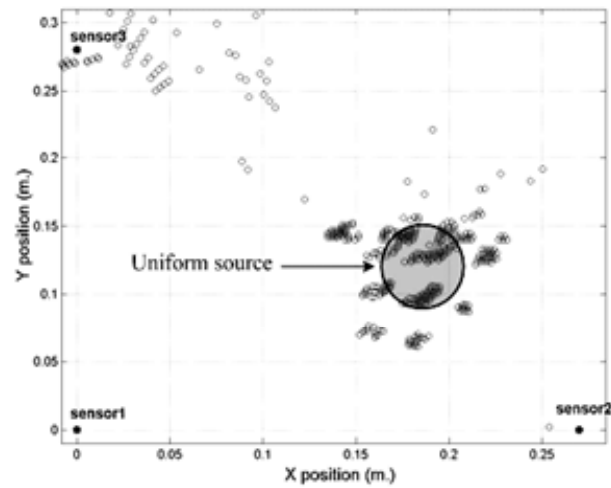
9.5 การสร้างระบบการหาตำแหน่งการกัดกร่อน

ได้สร้างระบบการวิเคราะห์หาตำแหน่งการกัดกร่อนโดยอาศัย Field Programmable Gate Array (FPGA) และออกแบบการทดลองทดสอบระบบกับการกัดกร่อน 4 ชนิดคือ crevice, pitting uniform และ stress corrosion cracking การทดลองดังแสดงในรูปที่ 9.7

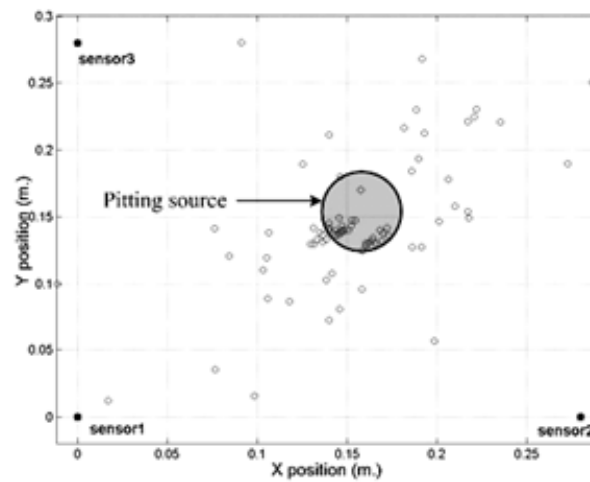


รูปที่ 9.7 การใช้ระบบ FPGA ในการทดลองวิเคราะห์ความถูกต้องของการคำนวณหาตำแหน่ง

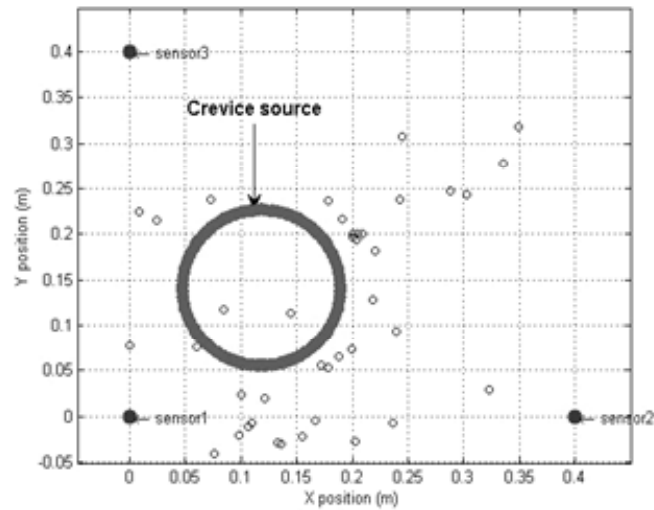
ผลแสดงเปรียบเทียบตำแหน่งการกัดกร่อนจริงกับตำแหน่งการกัดกร่อนที่หาได้ดังแสดงในรูปที่ 9.8 ถึง 9.11



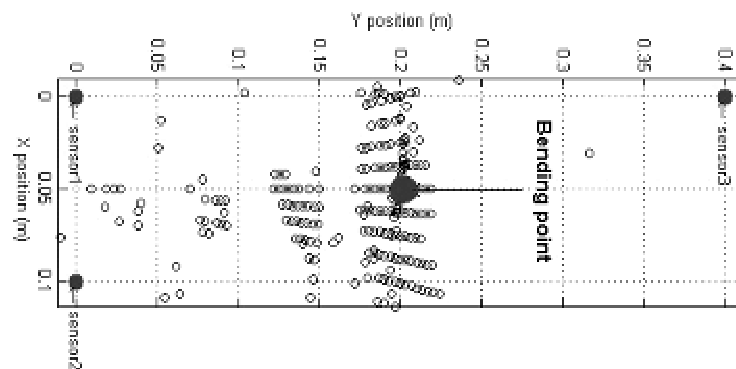
รูปที่ 9.8 เปรียบเทียบตำแหน่งการก่อก้อนแบบ uniform ที่เกิดขึ้นจริง (ในวงกลม) กับตำแหน่งที่คำนวณได้



รูปที่ 9.9 เปรียบเทียบตำแหน่งการก่อก้อนแบบ pitting ที่เกิดขึ้นจริง (ในวงกลม) กับตำแหน่งที่คำนวณได้



รูปที่ 9.10 เปรียบเทียบตำแหน่งการกัดกร่อนแบบ crevice ที่เกิดขึ้นจริง (ในวงกลม)
กับตำแหน่งที่คำนวณได้



รูปที่ 9.11 เปรียบเทียบตำแหน่งการกัดกร่อนแบบ SCC ที่เกิดขึ้นจริง (ในแนวเส้นตรง)
กับตำแหน่งที่คำนวณได้

รายละเอียดของผลการทดลองดังแสดงไว้ในภาคผนวก จ.บทความเรื่อง “A Study on Source Location Using an Acoustic Emission System for Various Corrosion Types”

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] Miinshiou Huang, Liang Jiang, Peter K. Liaw, Charlie R. Brooks, Rodger Seeley, and Dwaine L. Klarstrom, "Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research", Nondestructive Evaluation, November 1998 (vol. 50, no. 11)
- [2] R. Javaherdashti and P. Vimpani, 2003, "Corrosion of Steel Piles in Soils Containing SRB: A Review", Corrosion Control and NDT 2003, paper 034, pp.1-9
- [3] T. Sakoda, T. Arita, H. Nieda, M. Otsubo, C. Honda and K. Ando, "Acoustic emissions caused by the corona discharge in an oil – tank", High Voltage Engineering Symposium 1999
- [4] S. J. Ternowchek, T.J. Gandy, M.V. Calva, and T.S. Patterson, "Acoustic Emission and Ultrasonic Testing for Mechanical Integrity", Acoustic Emission: Standards and Technology Update, ASTM STP 1353, S.J. Vahaviolos, Ed., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1999
- [5] P.J. van de Loo - Shell, and B. Herrmann - Dow, How Reliable is Acoustic Emission (AE) Tank Testing? The Quantified Results of an AE Usergroup Correlation Study!", NDT.net - February 1999, Vol.4 No.2, <http://www.ndt.net/article/ecndt98/chemical/095/095.htm>
- [6] J. Dimopoulos, D. Foo, D. Olsen, and A. Lim, "CASE STUDY : APPLICATIONS AND LIMITATIONS OF ACOUSTIC EMISSION (AE) TESTING OF TANK BOTTOMS OF ABOVEGROUND STORAGE TANKS (ASTs)", Corrosion Control & NDT, Melbourne, Australia, November, 2003.
- [7] PHILLIP T. COLE, STEPHEN N. GAUTREY, "Development History of the Tankpac AE Tank Floor Corrosion Test", NDT.net , September 2002, Vol. 7 No.09, <http://www.ndt.net/article/v07n09/15/15.htm>
- [8] J. Dimopoulos ATTAR, "Acoustic Emission as a Corrosion Monitoring Tool for Above Ground Storage Tanks", Corrosion Control & NDT, Melbourne, Australia, November, 2003.
- [9] A. Mirakowski, "APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION IN EVALUATION OF PITTING CORROSION IN STEEL", http://www.korozja.pl/1_01_02.pdf.
- [10] S.G. Rong, "Corrosion-related Acoustic Emission and Its Identification", 10Th APCNDT BRISBANE, 2001, <http://www.ndt.net/article/apcndt01/papers/1143/1143.htm>
- [11] J.W.R. Boyd and J. Varley, "The uses of passive measurement of acoustic emissions from chemical engineering processes", Chemical Engineering Science, Volume 56, Issue 5, March 2001, Pages 1749-1767

- [12] F. Bellenger, H. Mazille and H. Idrissi, "Use of acoustic emission technique for the early detection of aluminum alloys exfoliation corrosion", NDT & E International, Volume 35, Issue 6, September 2002, pp.385-392
- [13] C. Jirarungsatean, A. Prateepasen and P. Thungsuk, "The corrosion locating using Acoustic Emission Technique", IE network Conference 2002, October, Thailand, pp. 376-387, 2002
- [14] C. Jirarungsatean, A. Prateepasen and P. Thungsuk, "Corrosion monitoring using Acoustic Emission", Science & Material Technology, Thailand, Vol.2, pp.152-154, 2002
- [15] N. Saenkhum, A. Prateepasen and P. Kaewtrakulpong, "Classification of Corrosion Detected by AE signal", IMECE'2003, Washington, D.C., November, 2003.
- [16] C. Jirarungsatean, A. Prateepasen and P. Kaewtrakulpong, "Pitting Corrosion Monitoring of Stainless Steels by Acoustic Emission", Corrosion Control & NDT, Melbourn, Australia, November, 2003.
- [17] K. Darowicki, A. Mirakowski and S. Krakowiak, "Investigation of pitting corrosion of stainless steel by means of acoustic emission and potentiodynamic methods", Corrosion Science, Volume 45, Issue 8, August 2003, Pages 1747-1756
- [18] R.G. Liptal, H.L. Dunegan and C.A. Tatro, Acoustic Emission Generated During Phase Transformation in Metals and Alloys, Physic & NDT, pp.183-191, 1971
- [19] H. Idrissi, H. Mazille, L. Renaud and Y. Cetre, "Initiation and propagation steps in pitting corrosion of austenitic stainless steels : monitoring by AE", Corrosion Science, 43, 627-641, 2001
- [20] H. Mazille, R. Rothea and C. Tronel, "An acoustic emission technique for monitoring pitting corrosion of austenitic stainless steels", Corrosion Science, Vol.37, No.9, pp.1365-1375, 1995
- [21] B. Assouli, A. Srhiri and H. Idrissi, "Characterization and control of selective corrosion of α , β -brass by acoustic emission", NDT & E International, Volume 36, Issue 2, 1 March 2003, Pages 117-126
- [22] G. T. Burstein and K. Sasaki, "Effect of impact angle on the slurry erosion–corrosion of 304L stainless steel", Wear, Volume 240, Issues 1-2, May 2000, Pages 80-94
- [23] R. Oltra, B. Chapey and L. Renaud, "Abrasion-corrosion studies of passive stainless steels in acidic media: combination of acoustic emission and electrochemical techniques", Wear, Volumes 186-187, Part 2, August 1995, Pages 533-541
- [24] F. Ferrer, H. Idrissi, H. Mazille, P. Fleischmann and P. Labeeuw, A study of abrasion–corrosion of AISI 304L austenitic stainless steel in saline solution using acoustic emission technique", NDT & E International, Volume 33, Issue 6, September 2000, Pages 363-371

- [25] F. Ferrer, H. Idrissi, H. Mazille, P. Fleischmann and P. Labeeuw, "On the potential of acoustic emission for the characterization and understanding of mechanical damaging during abrasion–corrosion processes", *Wear*, Volume 231, Issue 1, June 1999, Pages 108-115
- [26] Ahmet Cakir, Sabri Tuncell and Alptekin Aydin, "Ae response of 316L SS during SSR test under potentiostatic control", *Corrosion Science*, Volume 41, Issue 6, 1 June 1999, Pages 1175-1183
- [27] Liang Xidong, Fan Ju and Chen Lin, "Research on the brittle fracture of FRP rods and its acoustic emission detection", *Power Engineering Society Winter Meeting*, 2000. IEEE , Volume: 4 , 23-27 Jan. 2000, Pages:2812 - 2816 vol.4
- [28] Yoon, D. J., Weiss, W. J., and Shah, S. P., (2000) "Detecting the Extent of Corrosion with Acoustic Emission," *Transportation Research Record* 1698, pp. 54-60
- [29] E Santos-Leal and R J Lopez , "Simultaneous measurement of acoustic emission and electrical resistance variation in stress-corrosion cracking", 1995, *Meas. Sci. Technol.*, pp. 188-195
- [30] R.V. Nieuwenhove and R.W. Bosch, "Acoustic emission detection during stress corrosion cracking at elevated pressure and temperature", 24 th European Conference on Acoustic Emission Testing EWGAE 2000, Senlis France, May 2000
- [31] Ki-Woo Nam, Robert P. Wei and Ajit K. Mal, 1999, *Characteristics of Acoustic Emission Waveforms Generated by Fatigue Crack Extension from Corrosion Sites in Aluminum Alloys*, Third FAA/DOE NASA, September 20 – 23, 1999
- [32] C. Jomdecha, A. Prateepasen, P. Kaewtrakulpong and P. Thungsuk, "Corrosion-Source Location by an FPGA-PC Based Acoustic-Emission System", *IEEE*
- [33] F. Mansfield and P.J. Stocker, "Acoustic Emission from Corroding Electrodes", *Corrosion Engineers*, Vol. 35, No. 12, pp. 541-544, 1979
- [34] Frédéric Ferrer, Thierry Faure, Jean Goudiakas and Eric Andrès, "Acoustic emission study of active–passive transitions during carbon steel erosion–corrosion in concentrated sulfuric acid", *Corrosion Science*, Volume 44, Issue 7, July 2002, Pages 1529-1540

ภาคผนวก ก

Identification of AE Source in Corrosion Process

Asa Prateepasen^a, Chalermkiat Jirarungsatean^b, and Pongsak Tuengsook^c

Department of Production Engineering

King Mongkut's University of Technology Thonburi.

Bangmod, Toong-kru, Bangkok, 10140, Thailand

^aiasaasen@kmutt.ac.th, ^bochatean@kmutt.ac.th, ^cptuengsook@yahoo.com

Keywords: Corrosion, Acoustic Emission source

Abstract. In this paper acoustic emission (AE) was implemented to detect and study the corrosion on austenitic stainless steel grade AISI 304. Two tests were conducted at room temperature using an acidic 30% Chloride solution in passive tests procedure and 3% NaCl solution in electrochemical process. From the experimental works, it appeared that AE signals could be detected during corrosion. Data were studied in time and frequency domain to characterize and to find out the relation between AE parameter and corrosion. In addition the source of generated acoustic signals and corrosive mechanism in the different corrosive environment condition were discussed.

Introduction and AE source in corrosion monitoring

AE is the stress waves produced by the sudden internal stress redistribution of the materials caused by the changes in the internal structure. Previous works showed the similar conclusion that AE technique was efficient for corrosion monitoring. However, the main argument is the source identification of acoustic wave. Mansfield and Stocker [1] found that AE count number related to corrosion rate in various corrosive conditions and showed that the AE sources from the metal were from corrosion activity and the hydrogen bubble occurrences on electrode. The frequency analysis of AE signals in abrasion corrosion process was studied and the results showed that the sources of AE were from the impact of glass bead and gas bubbles [2].

The AE source in pitting and crevice corrosion monitoring were studied by a number of researchers. A. Mirakowski concluded that passive film breakage, the bubble formation and the other actions in corrosion process were considered as sources of AE signal [3]. The AE of gas bubble formation or bubble activity in corrosion process can be set as noise and then eliminated by experimental set up to ensure that it can not interfere AE system analysis. Then, only AE signal was analyzed for pitting corrosion via AE counts in electrochemical method [4, 5]. The experiment used to study the acoustic emission, generated by heating the metals and alloys, confirmed that AE signal was released during the phase transformation of specimens and could be explained in term of an AE parameter which was "count" [6]. In controlled potential of crevice corrosion monitoring, researchers commented that AE signal in the monitoring was detected from all activity sources in corrosion process including gas bubble activities [7]. The gas bubble activity also releases the acoustic wave. Therefore the researches in corrosion process which generated the gas bubble presented the identical discussion that AE source was from bubble activity by comparison of AE counts with and without bubbles [8, 9]. AE event in investigation of pitting corrosion in potentiodynamic methods expressed the relationship of corrosion process and AE source such as bubble [10]. As mentioned above, numerous researchers tried to investigate sources of AE in corrosion process. However, the AE sources are not clear. Consequently, the identification of AE source is the main aim in this work.

Experimental setup

Corrosive environment used in this work consisted of two different corrosive conditions: high chloride ion condition by acidic adjustment and potential control for accelerating the electro-

chemical reaction to produce pitting corrosion. Stainless steel specimens of grade 304 were used on both corrosive conditions. The specimens of size 100 x 100 mm and 1 mm thick were prepared from a stainless steel plate.

As shown in Fig1, the preliminary test was performed using broad band transducer (WD) mounted to down side of the test surface. The result showed that the frequency response of AE from corrosion process was between 100 and 190 kHz. To increase sensitivity of the tests, the transducer of type R15 (PAC) with resonant frequency at 150 kHz was then applied. AE signal was passed to a preamplifier of 60dB gain, and AE parameters were extracted and stored in LOCAN 320. The frequency waveform was recorded by a spectrum analyzer (HP 89410A). For the corrosion study in high chloride concentration tests, 30% NaCl

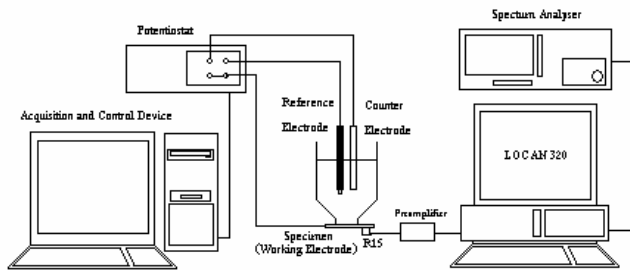


Fig. 1. A schematic of AE system

solution with initial pH adjusted to 2 by adding HCl was performed for 20 hours. For the polarization tests, the electrochemical environment was 3%NaCl solution added with HCL to control its pH at the level of two and a Solartron 1284 was used to control the electrochemically applied potential.

The pitting corrosion rate was controlled by the potentiostat that applied a constant potential (Epit) on specimen for 20 hours. Data received from the sample of SS304 was analyzed. The average frequency and time waveforms were collected every ten minutes.

Results and discussions

AE in high concentration chloride tests. In the high concentration corrosive test condition, the uniform corrosion can be observed on the material surface for 60 hours. The chloride ion in solution disrupted the mechanism of passive film produce, so in high chloride condition the material could not reproduce the passive film. Material surface with a passive film had lower corrosion resistance and caused the localized corrosion such as pitting corrosion. It should be noted that crevice corrosion can occur in the smaller amount oxygen location. To avoid the crevice corrosion, the solution container must be carefully mounted to the specimen to leave no gap between them.

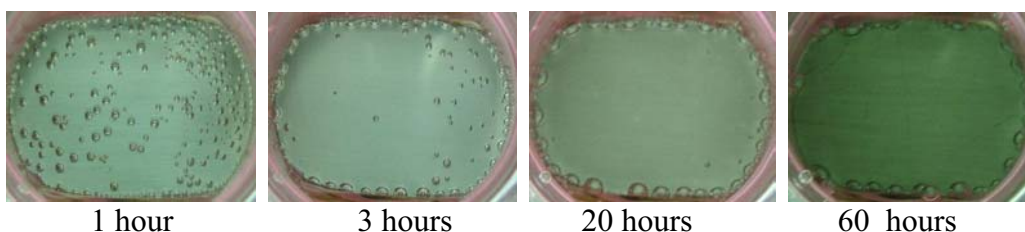


Fig. 2. Hydrogen bubble formation on surface of SS304 in 30% NaCl pH=1.

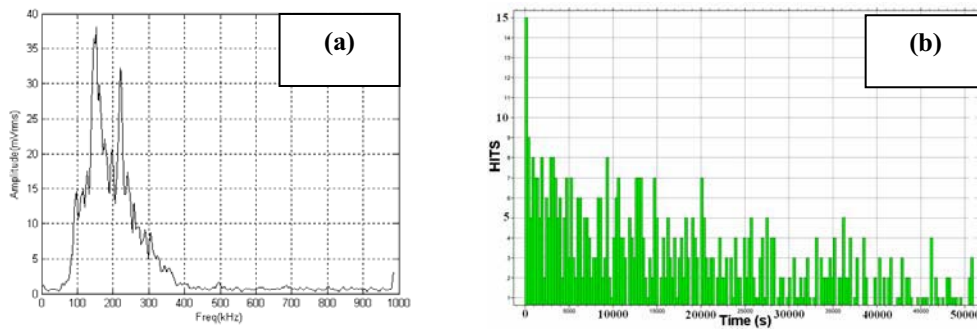
The observation of corrosion process during 60 hours showed occurrences of uniform corrosion and products of corrosion such as hydrogen bubbles on the material surface as shown in Fig 2. The amount of hydrogen bubble continuously decreased with time. It showed a high number of hits in the initial stage of corrosion then significantly decreased. The bubble sizes occurred during the tests were inconsistent. It exhibited that the AE signals received were due to the burst of the gas bubble activity as evident from the amounts of hydrogen bubbles. Pressure (P) and force (F) from the burst of bubble can be shown as $P=2\alpha/R$ [N/m²] and $F=2\pi R^2P$, where α [N/m] is a tension coefficient of the bubble in the corrosive medium and the radius of bubble is R[m]. The burst of gas bubble on the material surface caused the corrosion occur [11].

For the reason that hydrogen bubble was released from material surface, the oscillation frequency of gas bubble (f [Hz]) generated by the movement of gas bubble in the corrosive medium has a relationship with the radius of gas inside the bubble surface [12]:

$$f = \frac{1}{2\pi r} \sqrt{\frac{3\gamma p}{\rho}} \quad (1)$$

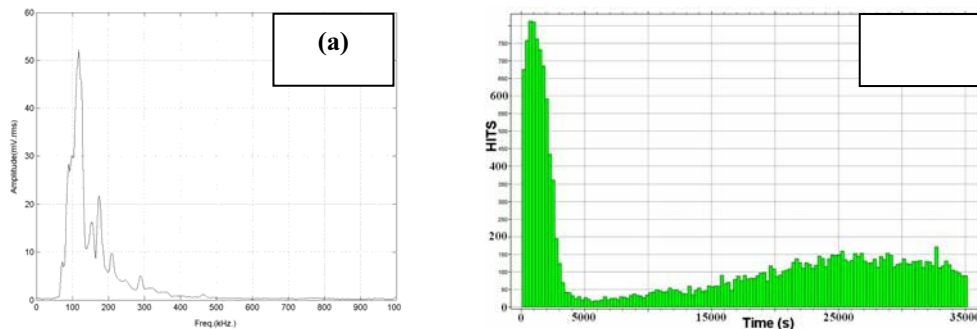
where r [m] is the radial coordinate in the spherical frame (with origin at center of a bubble), γ [J/(kg·K)] is the specific heat of a gas, and ρ [kg/m³] is density of the surrounding fluid.

The Eq. (1) shows that size of bubble and frequency has invert relationship. In this experiment, the diameter of the gas bubbles was captured and their diameters were measured. Median value from the set was selected as the representative of the bubble stage. It appeared that the bubble size approximately 0.03-0.05 mm was found in the initial stage of corrosion. The signal in frequency domain showed that the detected frequency of AE signal was in the range of 125-225 kHz (see Fig. 3a). It exhibited good relation to the size of the gas bubble according to the Eq. (1). The classification of AE source by the frequency analysis has applied for identification of AE source in chemical reaction process [13, 14].



(a) Sample average AE waveform in frequency domain (b) AE parameters in time domain
Fig. 3. AE signal obtained from 30%NaCl pH=1 corrosive condition test

It can be concluded that AE source of corrosion process in high concentration chloride is the hydrogen bubble action since the hit number of detected AE signal changes simultaneously to the amount of gas bubbles (see Fig 2 and 3b.). In addition, the frequency response of AE signal was related to the bubble size along the course of the experiment. Although the corrosion process consists of various AE sources such as the corrosion activity and the passive film breakage, AE signal of the hydrogen bubble action displayed higher amplitude and hit number than the other sources.



(a) Sample average AE waveform in frequency domain (b) Hit parameters in time domain
Fig. 4. AE signal obtained from controlled potential corrosion test

AE in Electrochemical Corrosive Tests. In the electrochemical corrosive experiment, there is no bubble appearance on material surface; however, there were some gas bubbles generated around the counter electrode. Nevertheless the AE signal received from the hydrogen bubble action in this process could be eliminated by extending the distance between the AE sensor and the cathode electrode in which the bubble was generated. Consequently the AE signal detected in the potential

control of the corrosion process was received from only corrosion mechanism signal. The potentiostatic tests were controlled at the constant potential, $E_{pit} = 0.266$ Volts, as it caused an onset of pitting corrosion in this material and environment. The E_{pit} value was carried out from the polarization curve of potentiodynamic tests. This corrosion test condition was controlled by accelerating the pit occurrences until the specimen was broken through. The frequency response of AE in this experiment was illustrated in Fig 4a where the average frequency of AE in frequency domain obtained from the corrosion signals was around 110 kHz. The range of frequency response of AE signal is unlike AE signal received from the bubble formation mentioned in the previous results and other researches [15]. The peak amplitude of frequency spectrum illustrated in Fig 4b is higher than that shown in Fig 3a because the corrosion rate in electrochemical corrosive tests are much more severe than in high concentration chloride tests.

In addition, the results of this part can be explained that the corrosion mechanism contained two stages: passive film breakage and pitting corrosion stages. Time domain analyzes showed that AE hit and amplitude were related to the changing of material in corrosive solution. Fig. 4b showed that the breakage of passive film caused a high number of hits in the initial corrosion period. Then the number of hit decreased in next stage but rose again when the pit occurred at another side of the material due to the corrosion of passive film layer.

Conclusions

Two experimental tests were performed to clarify AE sources. It can be concluded that different corrosive environment condition causes different dominant AE sources. In high concentration chloride test, impact and burst of hydrogen bubble is dominated whereas in electrochemical corrosive test, the AE sources are passive film breakage and pitting corrosion. AE parameters exhibit good correlation with corrosion activities. In high corrosion chloride test, AE signal in frequency domain displays high relationship with size of the bubbles. For electrochemical corrosive tests, the number of AE hit arises at the initial stage and significantly decreases in the pitting corrosion stage.

Acknowledgments

The authors wish to acknowledge support from “Commission on Higher Education” and “The Thailand Research Fund”, and would like to thank Dr. G. Lothongkum, Dr. P. Kaewtrakulpong and Mr. C. Jomdecha for their comments.

References

- [1] F. Mansfield and P.J. Stocker: Corrosion Engineers, Vol. 35, No. 12, pp. 541-544, 1979
- [2] F. Ferrer, H. Idrissi and P. Labeeuw: Wear, Vol. 231, Issue 1, June 1999, pp. 108-115
- [3] Information on http://www.korozja.pl/1_01_02.pdf.
- [4] H. Mazille and C. Tronel: Corrosion Science, Vol. 37, No.9, pp.1365-1375, 1995
- [5] H. Mazille, L. Renaud and Y. Cetre: Corrosion Science, Vol. 43, pp. 627-641, 2001
- [6] R.G. Liptal, H.L. Dunegan and C.A. Tatro: Physic & NDT, pp.183-191, 1971
- [7] Y. P. Kim and G. Santarini: NDT & E International, Vol. 36, December 2003, pp. 553-562
- [8] T. W. Rettig and M. J. Felsen: Corrosion-NACE, Vol. 32, No. 4, 1976
- [9] F. Ferrer and E. Andr  s: Corrosion Science, Vol. 44, Issue 7, July 2002, pp. 1529-1540
- [10] K. Darowicki and S. Krakowiak: Corrosion Science, Vol. 45, August 2003, pp. 1747-1756
- [11] C. Jirarungsatean, A. Prateepasen and P. Tuengsook: Science & Material Technology, Thailand, Vol.2, pp.152-154, 2002
- [12] T.G. Leighton: The Acoustic Bubble (San Diego)
- [13] J. Boyd and J. Varley: Chemical Engineering Science, Vol. 56, March 2001, pp. 1749-1767
- [14] R. M. Lec: The IEEE International Frequency Control Symposium, pp. 978-982
- [15] B. Assouli and H. Idrissi: NDT & E International, Vol. 36, Issue 2, 2003, pp. 117-126

ภาคผนวก ข

ผลของการถ่ายเทประจุทางไฟฟ้าเคมีต่อสัญญาณอะคูสติกใน การตรวจจับการกัดกร่อนด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน

เฉลิมเกียรติ จิระรุ่งเสถียร, อาษา ประทีปเสน และ เมธิณี มุกดาสิริ

ภาควิชาอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีภายใต้สภาวะควบคุมในการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในสารกัดกร่อนโซเดียมคลอไรด์เจือจางและปรับความเป็นกรดให้เท่ากับ 2 ได้ถูกนำมาศึกษาความสัมพันธ์ในการเกิดสัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน กับการถ่ายเทประจุไฟฟ้าทั้งในสภาวะที่ต้านการกัดกร่อนและขณะเกิดการกัดกร่อน โดยการวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าเคมีแบบพลวัตน์ (Potentiodynamic Test) ซึ่งการวิเคราะห์โดยใช้ค่าตัวแปรทางอะคูสติกแสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของสัญญาณอะคูสติกที่มีความสัมพันธ์กับกลไกของการกัดกร่อนที่มีความแตกต่างกันของแต่ละขั้นของการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก (Pitting Corrosion) ซึ่งสอดคล้องกันกับกลไกที่เกิดขึ้นจริงจากการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมี และ ผลการทดลองสามารถอธิบายถึงผลจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าในกระบวนการกัดกร่อนที่มีต่อการเกิดสัญญาณอะคูสติกโดยการวิเคราะห์การตรวจจับสัญญาณในช่วงเวลาการทดลอง นอกจากนี้ ผลการทดลองยังเป็นการยืนยันว่าการกัดกร่อนแบบหลุมลึกสามารถตรวจจับได้ด้วยการตรวจสอบแบบอะคูสติกอิมิชชัน

คำสำคัญ : การกัดกร่อน, การวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมี, อะคูสติกอิมิชชัน

The Effect of Electrochemical Charge Transfer on Acoustic Signal in Corrosion Monitoring by Acoustic Emission Technique

C. Jirarungsatian, A. Prateepasen and M. Mukdasiri

**Department of Production Engineering
Faculty of Engineering
King Mongkut's University of Technology Thonburi
126 Pracha-Utit Rd., Thungkru, Bangkok, 10140 Thailand**

Abstract

The pitting corrosion of AISI 304 in diluted sodium chloride solution acidified to pH 2 and controlled by electrochemical process controller was studied. The relation between acoustic wave generation and the electrical charge transfer during corrosion process was carried out. The potentiodynamic method was used. The acoustic emission analysis via acoustic parameter showed good relation between the acoustic signal characteristic and pitting corrosion mechanism based on electrochemical analysis. The explanation of the effect of charge transfer to acoustic signal was discussed in this paper. In addition, it was confirmed that pitting corrosion can be detected by Acoustic Emission technique.

Keyword: Corrosion, Electrochemical Analysis, Acoustic Emission

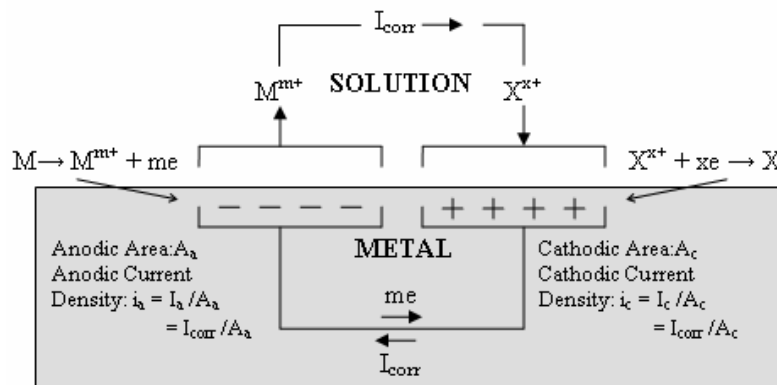
1. บทนำ

การวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุหรือโครงสร้างที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกัดกร่อนโดยอาศัยการปลดปล่อยของคลื่นความเค้น (Stress Wave) ที่เรียกว่าการตรวจสอบแบบไม่ทำลายวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ชัน ได้มีการพัฒนาให้เกิดความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อได้เปรียบบางประการที่ดีกว่าการตรวจสอบการกัดกร่อนแบบวิธีอื่น เช่น ความรวดเร็วในการตรวจสอบ ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในการตรวจสอบที่น้อยกว่า เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยจากกลุ่มผู้วิจัยจำนวนมาก ได้พยายามวิจัยเพื่อเพิ่มความสามารถและความแม่นยำให้มากยิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการวิจัยอะคูสติกจากการกัดกร่อนของวัสดุที่เป็นเหล็กคาร์บอน [1], อลูมิเนียมอัลลอย [2,3] หรือเหล็กกล้าไร้สนิม [4,5] ในสภาวะกัดกร่อนแบบต่าง ๆ ซึ่งการวิเคราะห์การกัดกร่อนโดยการควบคุมปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Technique) ได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยเพื่อกำหนดสภาวะศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนให้เป็นไปตามต้องการเพื่ออธิบายถึงปรากฏการณ์ และความเกี่ยวข้องกันของสัญญาณอะคูสติกที่ตรวจวิเคราะห์ผ่านค่าตัวแปรอะคูสติกรูปแบบต่าง ๆ [6-10] ซึ่งผลการวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการบอกว่ามีการกัดกร่อนเกิดขึ้นหรือไม่ หรือกระบวนการ กัดกร่อนมีความสอดคล้องกับสัญญาณอะคูสติกที่ตรวจจับได้ [11] ซึ่งการวิเคราะห์ต่าง ๆ เหล่านี้ยังมีข้อโต้แย้งกันอยู่ในเรื่องของแหล่งกำเนิดของอะคูสติกที่นำมาวิเคราะห์ [12] และจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาถึงแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ในระบบการกัดกร่อนเพื่อแสดงลักษณะเฉพาะของแต่ละแหล่งกำเนิดออกมาผ่านพารามิเตอร์ทางอะคูสติกในสภาวะกัดกร่อนที่ต่างกันได้อย่างชัดเจน [13] อย่างไรก็ตามการเกิดการกัดกร่อนภายใต้สภาวะที่กำจัดสัญญาณรบกวนทางกลอันเนื่องมาจากฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยากัดกร่อน และสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าออกไป ให้คงเหลือเพียงสัญญาณจากการกัดกร่อนเท่านั้น ผลของการถ่ายเทของประจุอย่างต่อเนื่องระหว่างการกัดกร่อนอาจส่งผลต่อการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกได้เช่นกัน ซึ่งจะนำไปสู่การแปลผลที่มีความผิดพลาด

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลจากการถ่ายเทประจุของการกัดกร่อนที่อาจส่งผลต่อการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกในกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้สำหรับประกอบเป็นถังพักวัตถุดิบในทางอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมอาหาร โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก โดยการควบคุมศักย์ไฟฟ้า และการวิเคราะห์โดยเทคนิคไฟฟ้าเคมี ลักษณะการได้รับของสัญญาณอะคูสติก และการวิเคราะห์ผ่านค่าตัวแปรอะคูสติกสามารถบอกได้ถึงผลของการถ่ายเทประจุไฟฟ้า และสิ่งที่ตรวจจับได้ว่ามีความสอดคล้องกับการกัดกร่อนอย่างไร

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1. การถ่ายเทประจุไฟฟ้าในกระบวนการกัดกร่อน



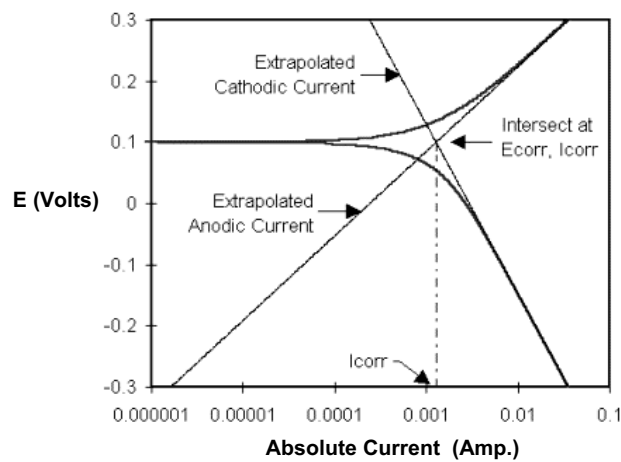
รูปที่ 1 วงจรไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อน และการถ่ายเทของประจุไฟฟ้า

การกัดกร่อนเกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาการถ่ายเทของอะตอมที่ขั้วอะโนดจากโลหะไปยังสารกัดกร่อน ($M \rightarrow M^{m+} + me$) ซึ่งจะมีการสูญเสียอิเล็กตรอนไปด้วยระหว่างการถ่ายเทอะตอมนี้ อิเล็กตรอนดังกล่าวจะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่เป็นขั้วแคโทดเพื่อไปเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ($X + xe \rightarrow X^{x+}$) ดังนั้นจึงเกิดลักษณะการถ่ายเทอิเล็กตรอนเป็นวงจรขึ้น ซึ่งคือวงจรไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนที่มีกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ในวงจร โดยค่าของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนนี้จะเป็นค่าเฉพาะที่มีความสัมพันธ์กันกับอัตราของการกัดกร่อนสำหรับวัสดุภายใต้สภาวะกัดกร่อนนั้นๆ ซึ่งทำให้สามารถทำนายได้ถึงอัตราการกัดกร่อนที่จะเกิดขึ้นได้สำหรับการกัดกร่อนแบบทั้งผิวหน้า (Uniform Corrosion) แต่สำหรับการกัดกร่อนแบบหลุมลึก (Pitting Corrosion) ที่เป็นการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ (Localized corrosion) จะสามารถทราบอัตราการกัดกร่อนได้จากจำนวนของหลุมลึกที่เกิดขึ้นต่อพื้นที่ และความลึกของหลุม

2.2. ความหมาย และที่มาของการวิเคราะห์ Polarization Curve

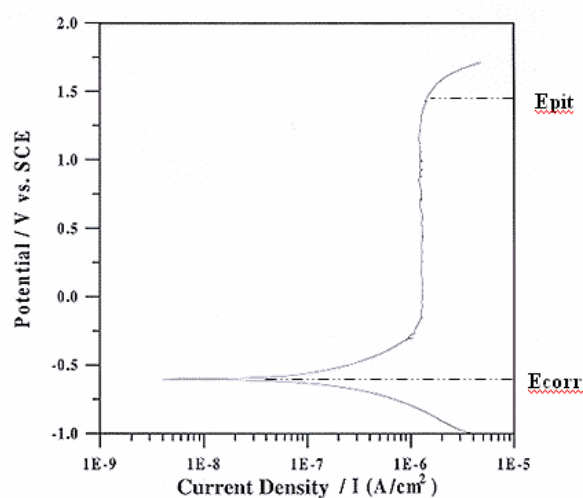
การวัดค่าของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) เพื่อไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนไม่สามารถที่จะวัดได้โดยตรงจากการที่ประจุถ่ายเทระหว่างบริเวณอะโนด และแคโทดบนผิววัสดุที่เกิดการกัดกร่อน อย่างไรก็ตามในบางกรณีที่เป็นกรกัดกร่อนบนวัสดุโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด เป็นไปได้ที่จะวัดค่ากระแสดังกล่าวได้โดยวิธีทางอ้อม (Indirect) โดยการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมี อาศัยการวัดผ่านขั้วเคาเตอร์อิเล็กโทรด (Counter Electrode) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นแพลตตินัม (Platinum) และเครื่องมือทาง อิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า Potentiostat โดยต่อกับอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode) โดย Potentiostat จะเป็นเครื่องมือที่ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วงานทดสอบ เพื่อที่จะควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้เป็นไปตามที่ต้องการในการทดลอง ซึ่งการวัดค่า I_{corr} ด้วยวิธีการสร้างโค้งความสัมพันธ์ระหว่าง ศักย์ไฟฟ้าที่ควบคุมกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน

โดยประกอบด้วยโค้งอะโนดิก(Anodic Curve) และโค้งแคโทดิก(Cathodic Curve) และการวิเคราะห์แบบ Tafel จะทำให้ได้จุดตัดที่เป็นค่าของ E_{corr} และ I_{corr} ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การวัดค่า I_{corr} ด้วยวิธี Classic Tafel Analysis

ความหมายของค่า E_{corr} คือ ศักย์ไฟฟ้าที่มีอัตราการรวมของปฏิกิริยาทั้งหมดทางอะโนดิกเท่ากับอัตราการรวมของปฏิกิริยาทั้งหมดทางแคโทดิกซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการสมดุลสำหรับกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น โดยจะมีค่ากระแสกัดกร่อนคงที่เท่ากับ I_{corr} สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของการกัดกร่อนของวัสดุสามารถทำได้จากการวิเคราะห์โดยการสร้างกราฟโพลาไรเซชัน (Polarization Curve) ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้จะแสดงความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าในการกัดกร่อน กับการถ่ายเทประจุไฟฟ้าที่บ่งบอกช่วงของการต้านทานการกัดกร่อนโดยการสร้างฟิล์มป้องกัน (Passive Film) การทำลายฟิล์มป้องกันการกัดกร่อน และการเกิดการกัดกร่อนที่เนื้อวัสดุได้



รูปที่ 3 กราฟโพลาไรเซชัน แสดงค่าลักษณะเฉพาะ E_{corr} และ E_{pit} สำหรับการกัดกร่อนบนโลหะที่มีสมบัติสร้างฟิล์มต้านการกัดกร่อน

สำหรับกราฟโพลาไรเซชันของโลหะที่มีสมบัติสามารถสร้างฟิล์มด้านการกัดกร่อน ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม (ดังรูปที่ 3) โดยการกัดกร่อนบนเหล็กกล้าไร้สนิมอาจเกิดได้ทั้งการกัดกร่อนแบบหลุมลึก และการกัดกร่อนแบบยูนิฟอร์มได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงของศักย์ไฟฟ้าในปฏิกิริยากัดกร่อน การเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก (Pitting Corrosion) เกิดขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ E_{pit} และการกัดกร่อนแบบทั้งผิวหน้า สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนอยู่ระหว่างช่วง E_{corr} และ E_{pit} โดยรูปร่างของกราฟโพลาไรเซชันสำหรับแต่ละคู่ปฏิกิริยากัดกร่อน (โลหะ-สารกัดกร่อน) ก็จะแตกต่างกันไป หากโลหะมีการต้านทานการกัดกร่อนต่ำ หรือไม่สามารสร้างฟิล์มต้านทานการกัดกร่อนได้ เช่น ในกรณีเหล็กคาร์บอน ซึ่งการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึกจะไม่เกิดขึ้น แต่จะเกิดเป็นการกัดกร่อนแบบทั่วทั้งผิวหน้า ดังนั้นค่าของ E_{pit} จึงไม่เกิดขึ้นบนกราฟโพลาไรเซชันของโลหะคาร์บอน รวมถึงช่วงการต้านทานการกัดกร่อนก็จะแคบลงด้วย

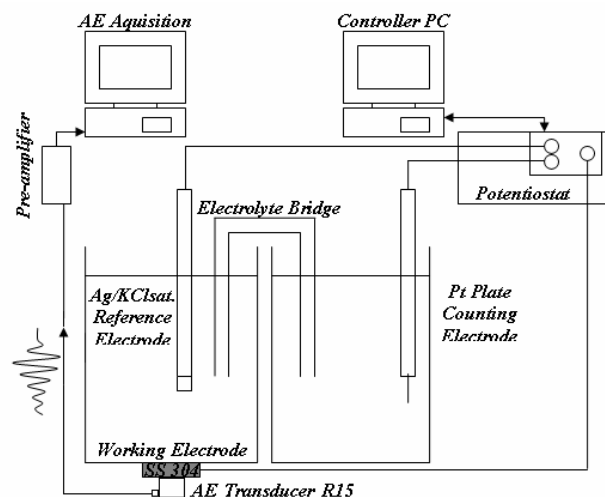
2.3. อะคูสติกอีมีชันสำหรับการวิเคราะห์การกัดกร่อน

การปลดปล่อยสัญญาณอะคูสติกในกระบวนการกัดกร่อนมีแหล่งกำเนิดของสัญญาณมาจากหลายแหล่งกำเนิด ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเป็นไปได้ที่จะมาจากการเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนที่ผิววัสดุ การแตกของพาสซีฟฟิล์ม ผลของผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน (Corrosion product) เช่น การเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจน การก่อตัวของออกไซด์โลหะหรือที่เรียกว่าการเกิดสนิม เป็นต้น และสัญญาณรบกวนทั้งทางกล และทางไฟฟ้า ซึ่งแต่ละแหล่งกำเนิดของสัญญาณอะคูสติกจะมีลักษณะเฉพาะ โดยสามารถวิเคราะห์เพื่อการจำแนกแต่ละแหล่งกำเนิดของสัญญาณที่ตรวจจับได้ จากการวิเคราะห์ผ่านค่าตัวแปรอะคูสติกที่กำหนดมาจากสัญญาณอะคูสติกในโดเมนเวลาจากการพิจารณาสัญญาณที่เกินระดับขีดจำกัดเริ่มต้น (Threshold Level) ที่กำหนดไว้ ได้แก่ จำนวนครั้งของแอมพลิจูดที่มีรอบการแกว่งของสัญญาณเกินระดับขีดจำกัดเริ่มต้น (Count), ระดับของสัญญาณที่มีค่าสูงที่สุด (Peak Amplitude), ค่าเวลาของระดับสัญญาณเกินกว่าระดับขีดจำกัดเริ่มต้นจนถึงระดับของสัญญาณสูงสุด (Rise Time), ค่าเวลาของสัญญาณตั้งแต่ระดับของสัญญาณสูงสุดจนลดลงเหลือเท่ากับระดับขีดจำกัดเริ่มต้น (Duration Time), และจำนวนครั้งของการตรวจจับสัญญาณที่ตรวจจับได้ตลอดช่วงเวลาที่สนใจ (Hit) และค่าของพลังงานอะคูสติก (AE Energy) ที่ไม่เกี่ยวข้องกับระดับการกำหนดค่าขีดจำกัดเริ่มต้น โดยพารามิเตอร์อะคูสติกแต่ละตัวจะมีความสัมพันธ์กับการกัดกร่อนที่ศึกษาอยู่หรือไม่สามารถรู้ได้จากการพิจารณาพารามิเตอร์แต่ละตัวเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดกร่อน ตามช่วงเวลา (History Plot) หรือการวิเคราะห์ค่าของคู่พารามิเตอร์ (Correlation Plot) เป็นต้น [13]

3. การดำเนินการวิจัย

เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ความหนา 0.5 มิลลิเมตร และ ขนาดพื้นที่ทดสอบ 6.25 ตารางเซนติเมตร ซึ่งผ่านการเตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 1200 จากนั้นเป่าให้แห้งด้วยอากาศอุ่น และทิ้งข้ามคืนในภาชนะที่มีการป้องกันความชื้นด้วยสารดูดความชื้นซิลิกา โดยชิ้นงานทดสอบได้ถูกนำมา

ทดสอบ ภายใต้สภาวะการกัดกร่อนสารละลาย 3% NaCl ปรับความเป็นกรด pH ให้เท่ากับ 2 ด้วยสารละลาย HCl เข้มข้น และควบคุมปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีด้วยแบบพลวัตน์ (Potentiodynamic Test) ด้วยเครื่อง Potentiostat โดยควบคุมความต่างศักย์ตั้งแต่ช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ (อิเล็กโทรดอ้างอิง Ag/KCl_{sat}) ซึ่งอัตราการสแกนเป็น 0.2 mV/sec และบันทึกค่าความหนาแน่นของประจุในการกัดกร่อนผ่าน Counter Electrode แบบแผ่นแพลตทินัม เข้าสู่คอมพิวเตอร์บันทึกและแสดงผลกราฟโพลาริเซชัน



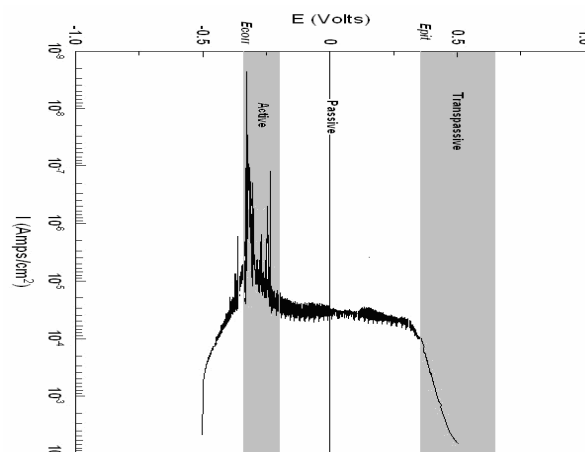
รูปที่ 4 ระบบการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกอิมมิชชัน และการควบคุมระบบไฟฟ้าเคมีการกัดกร่อน

สัญญาณอะคูสติกจากการกัดกร่อนของวัสดุทดสอบถูกบันทึกตลอดช่วงการทดสอบทางไฟฟ้าเคมีโดยหัวตรวจสอบอะคูสติกแบบเพียโซอิเล็กทริก รุ่น R15 โดยมีความถี่เรโซแนนซ์ที่ 150 kHz ซึ่งสอดคล้องกับย่านความถี่ของสัญญาณอะคูสติกจากการกัดกร่อนที่ช่วงประมาณ 100-200 kHz และการทดลองใช้ Pre-amplifier รุ่น 1240 จาก PAC โดยใช้อัตราการขยายสัญญาณที่ 60 dB พร้อมทั้งกรองความถี่แบบแถบความถี่ (Band-Pass) ในช่วงความถี่ 100-300 kHz และบันทึกผลทางอะคูสติกทางเวลาด้วย LOCAN320 จาก PAC โดยการออกแบบทดลองได้ใช้สะพานอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Bridge) เพื่อป้องกันสัญญาณทางอะคูสติกจากฟองก๊าซที่เกิดขึ้นที่ขั้ว Counter Electrode และป้องกันสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าเข้าสู่หัวตรวจสอบอะคูสติกจากการจ่ายกระแสในระบบการกัดกร่อนไปยังวัสดุทดสอบที่ขั้ว Working Electrode ด้วยระบบการกราวด์สัญญาณ

4. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

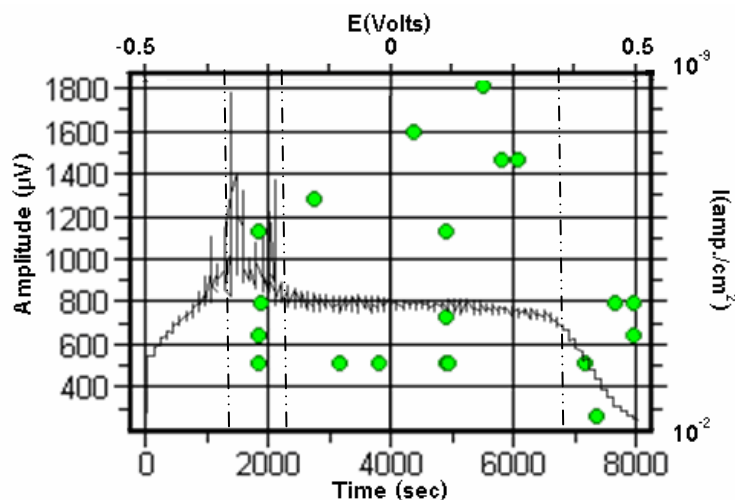
ผลในการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีการ Potentiodynamic Test ทำให้ได้รูปแบบของ Polarization Curve และค่าเฉพาะตัวของวัสดุทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ในงานวิจัย เพื่ออ้างอิงถึงกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อน และอธิบายปรากฏการณ์การของสัญญาณอะคูสติกที่ตรวจจับได้ตลอดช่วงเวลาทดสอบ ค่า E_{corr} และ E_{pit} ที่ได้จากการวิเคราะห์เป็น -0.36346 และ 0.37109 โวลต์ ตามลำดับ ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉพาะตัวทั้งสองค่าจะเป็นค่าที่กำหนดขอบเขตของช่วง Active, Passive และ Trans-passive ดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นลำดับขั้นของการเกิดการกัดกร่อนในสภาวะแท้จริงของ

เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีสมบัติที่สามารถต้านการกัดกร่อน ได้แก่ การเสียหายหรือแตกของออกไซด์ฟิล์ม หรือพาสซีฟฟิล์มที่ปกป้องผิวในขณะเริ่มต้นการกัดกร่อน จากนั้นฟิล์มดังกล่าวก็จะถูกสร้างขึ้นมาอีกครั้ง เพื่อต้านทานการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในช่วง Passive ซึ่งในช่วงนี้โลหะจะพยายามสร้างฟิล์มขึ้นมา และในทางกลับกันก็มีบางส่วนของฟิล์มได้ถูกทำลายไปด้วยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะเห็นได้จากการที่ค่าของความหนาแน่นของกระแสมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก และเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าที่ควบคุมเข้าใกล้ค่า E_{pit} การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นกระแสจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งหมายถึงผิวโลหะไม่สามารถต้านทานทางการกัดกร่อนได้อีกต่อไป ฟิล์มที่สร้างขึ้นถูกทำลายและไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้อีก และการกัดกร่อนแบบหลุมลึก (Pitting) จึงเริ่มต้นขึ้นได้ช่วง Trans-passive นี้

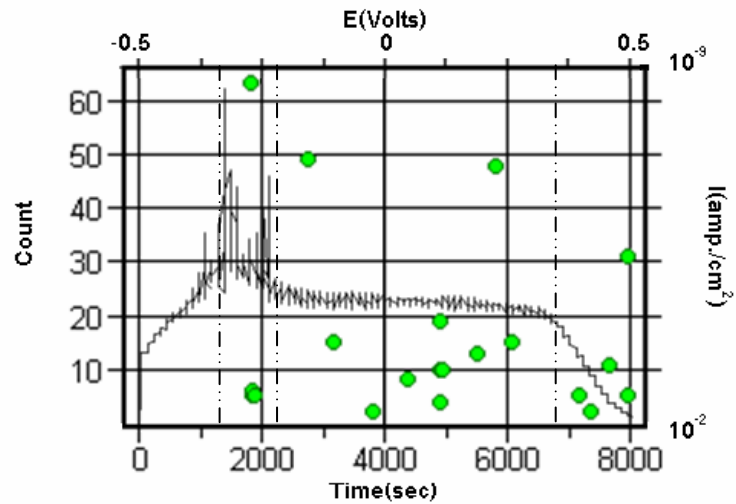


รูปที่ 5 Polarization Curve ของ ตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304 ในงานวิจัย

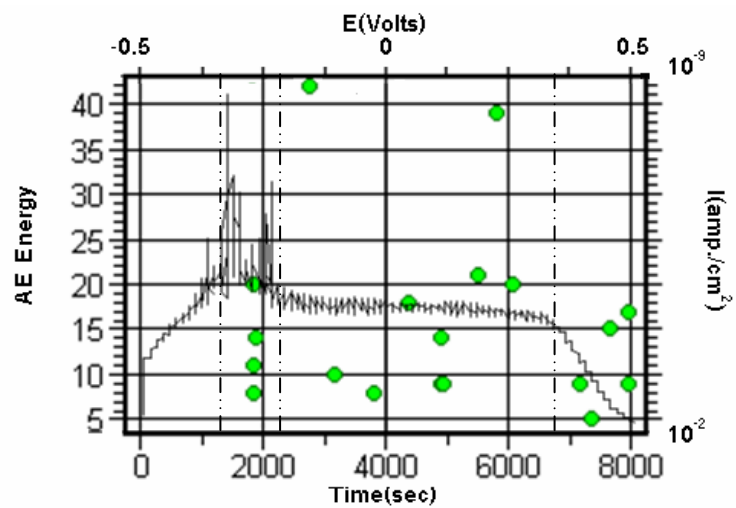
สัญญาณอะคูสติกที่ตรวจจับถูกนำมาวิเคราะห์ผ่านพารามิเตอร์อะคูสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเวลา และประกอบกับการอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นทางไฟฟ้าเคมีของการควบคุมศักย์ไฟฟ้าเคมีที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ค่า $E = -0.50$ โวลต์ ไปจนเสร็จสิ้นที่ $E = 0.50$ โวลต์ ด้วยอัตราการแสกน 0.2 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ซึ่งเป็นเวลาในการวิเคราะห์ทั้งสิ้น $8,000$ วินาที โดยพารามิเตอร์อะคูสติกที่วิเคราะห์ร่วมกับกลไกของการกัดกร่อนคือ Amplitude, Counts, Energy, และ Hit ดังรูปที่ 6 ถึง 9



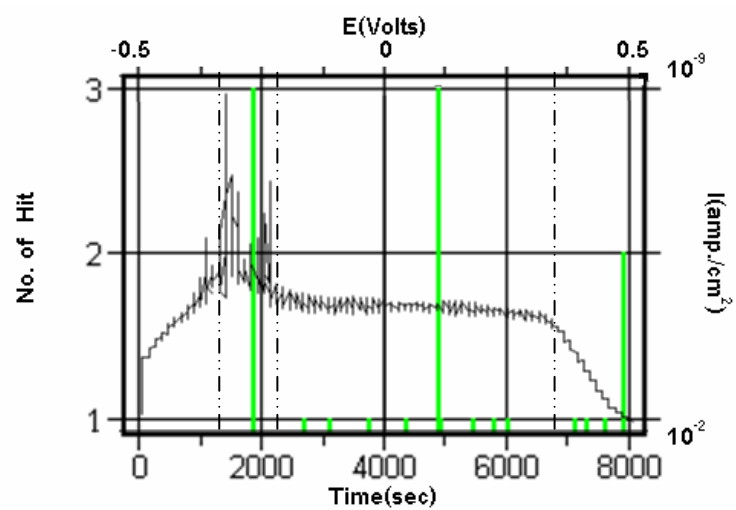
รูปที่ 6 ตัวแปรอะคูสติกแอมพลิจูดต่อเวลา เปรียบเทียบกับกราฟโพลาไรเซชันของการเกิดการกัดกร่อน



รูปที่ 7 ตัวแปรอะคูสติก Count ต่อเวลาเปรียบเทียบกับกราฟโพลาไรเซชันของการเกิดการกัดกร่อน



รูปที่ 8 ตัวแปรอะคูสติก Energy ต่อเวลา เปรียบเทียบกับกราฟโพลาไรเซชันของการเกิดการกัดกร่อน



รูปที่ 9 ตัวแปรอะคูสติก Hit ต่อเวลา เปรียบเทียบกับกราฟโพลาไรเซชันของการเกิดการกัดกร่อน

ซึ่งพบว่าการแสดงผลของสัญญาณจะเห็นว่าแบ่งกลุ่มของสัญญาณออกเป็นสามช่วงเช่นกัน (Active, Passive และ Trans-passive) โดยสัญญาณอะคูสติกที่เกิดขึ้นจะมีการตรวจจับได้ของสัญญาณอย่างไม่ต่อเนื่อง (Discrete Signal) และมีลักษณะเป็นสัญญาณแบบเบิร์สต์ (Burst) ซึ่งในการควบคุมกระบวนการกัดกร่อนจากงานวิจัยนี้จะเห็นว่าการถ่ายเทของประจุในการกัดกร่อนอย่างต่อเนื่องจากกราฟโพลาริเซชัน แต่ผลของการถ่ายเทแปลงประจุกลับไม่ส่งผลต่อสัญญาณอะคูสติก หรือก่อให้เกิดสัญญาณอะคูสติกที่มีความต่อเนื่องแต่อย่างใด และสัญญาณอะคูสติกที่ได้นั้นยังมีความสอดคล้องกันกับการเกิดการกัดกร่อนด้วย ซึ่งในการวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณจะแบ่งเป็นการวิเคราะห์ในส่วนของสัญญาณจากการเสียหาย หรือแตกของฟิล์มพาสซีฟ จะเกิดขึ้นทั้งในช่วง Active รวมกับ ช่วง Passive เพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่เกิดจากการกัดกร่อนแบบหลุมลึกที่เนื้อวัสดุทดสอบ (ช่วง Trans-passive) ซึ่งผลการวิจัยได้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของค่าพารามิเตอร์อะคูสติกในแต่ละช่วงการกัดกร่อน

		Active Region + Passive Region (Passive Film Breakage)	Transpassive Region (Pitting Corrosion)
Average	Amplitude (μV)	911.545	603.2
	Count no.	18.77	10.80
	AE Energy (V)	15.70	11.00
	Hit/min.	0.215	0.27

ค่าเฉลี่ยของแต่ละพารามิเตอร์อะคูสติกแสดงถึงความแตกต่างกันของในแต่ละช่วงของการกัดกร่อนโดยค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดสามารถอธิบายถึงความแตกต่างได้ดีที่สุด โดยที่จะมีค่าในช่วงพาสซีฟฟิล์มแตกสูงกว่าช่วงของการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก สำหรับพารามิเตอร์ Count และ Energy ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 7 และ 8 และการพิจารณาผ่านค่าเฉลี่ยพบว่ามีความแตกต่างเพียงเล็กน้อยจากสองแหล่งกำเนิดสัญญาณ ขณะที่อัตราเฉลี่ยของค่า Hit พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก

5. สรุปการวิจัย

1. ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบระบบในการทำการทดลองและวิจัยให้เกิดสัญญาณรบกวนทางกลในระบบการกัดกร่อนให้น้อยที่สุด อันได้แก่ การกำจัดฟองก๊าซที่เกิดขึ้นที่ขั้วของ Counter Electrode และการกำจัดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าด้วยระบบการกราวด์ จึงทำให้สัญญาณที่ตรวจจับได้นั้นเป็นสัญญาณที่มาจากการกัดกร่อนเพียงอย่างเดียวเท่านั้น และได้ศึกษาถึงผลจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าในกระบวนการกัดกร่อนว่ามีผลต่อสัญญาณอะคูสติกหรือไม่ โดยสามารถสรุปได้ว่าการถ่ายเทประจุไม่ได้ส่งผลต่อสัญญาณอะคูสติกในการตรวจจับการกัดกร่อนแต่อย่างใด ด้วยเหตุผลจากการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกได้เป็นลักษณะไม่ต่อเนื่องตลอดการทดสอบทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีการถ่ายเทประจุอย่างต่อเนื่องโดยการพิจารณาจากค่าความหนาแน่นของ

กระแสที่เกิดขึ้นในระบบ หากผลของการถ่ายเทประจุมีผลต่อสัญญาณอะคูสติก ซึ่งสัญญาณอะคูสติกก็ควรจะตรวจจับได้อย่างต่อเนื่องเช่นกัน

2. เนื่องจากผลของการถ่ายเทประจุทางไฟฟ้าเคมีไม่มีผลต่อการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกในระบบ ดังนั้นผลการวิเคราะห์ผ่านพารามิเตอร์อะคูสติกจากการทดลองจึงเป็นการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกจากการกัดกร่อนเท่านั้น ซึ่งค่าเฉลี่ยของ Amplitude สามารถอธิบายได้ถึงความแตกต่างระหว่างแต่ละกลไกการกัดกร่อนได้ดีที่สุด ซึ่งสามารถแสดงผลจากแหล่งกำเนิดของสัญญาณออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงที่ฟิล์มแตก (Active และ Passive Region) และช่วงของการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก (Pitting) ในขณะที่พารามิเตอร์ Count และ Energy สามารถแสดงถึงความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างแต่ละกลไกในการเกิดการกัดกร่อนได้ชัดเจนน้อยกว่า ซึ่งในช่วง Active และ Passive นี้มีค่าเฉลี่ย Amplitude, Count และ Energy ที่สูงกว่าสัญญาณจากช่วง Trans-passive และการวิเคราะห์ผ่านพารามิเตอร์ Hit พบว่าค่าเฉลี่ยของทั้งสองแหล่งกำเนิดมีค่าใกล้เคียงกันมาก
3. สัญญาณอะคูสติกที่ตรวจจับได้นั้นสามารถจำแนกออกเป็นสองแหล่งกำเนิดเมื่ออธิบายด้วยเหตุผลจากการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนควบคู่กัน ซึ่งพบว่ามีแหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกมาจาก การแตกของพาสซีฟฟิล์ม และการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึกที่เนื้อวัสดุ ซึ่งผลการวิจัยนี้สนับสนุนงานวิจัยก่อนหน้านี้ [13]
4. การตรวจจับและวิเคราะห์การกัดกร่อนด้วยวิธีอะคูสติกมีข้อดีในการใช้งานจริง จะไม่มีผลอันเนื่องมาจากศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของระบบ แต่จะขึ้นอยู่กับกลไกของการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน โดยสามารถพิจารณาได้จากพารามิเตอร์ทางอะคูสติกดังกล่าวในข้างต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข และคุณเชิดพงษ์ จอมเดช สำหรับคำแนะนำที่เป็นประโยชน์

เอกสารอ้างอิง

1. Ferrer, F, Faure, T, Goudiakas, J., and Andrès, E., 2002, "Acoustic emission study of active-passive transitions during carbon steel erosion-corrosion in concentrated sulfuric acid", *Corrosion Science*, Vol. 44, Issue 7, July 2002, pp. 1529-1540.
2. Bellenger, F., Mazille, H., and Idrissi, H., 2002, "Use of acoustic emission technique for the early detection of aluminum alloys exfoliation corrosion", *NDT & E International*, Vol. 35, Issue 6, September 2002, pp.385-392

3. Nam, K. W., Wei, R. P., and Mal, A.K., 1999, "Characteristics of Acoustic Emission Waveforms Generated by Fatigue Crack Extension from Corrosion Sites in Aluminum Alloys", *Third FAA/DOE NASA*, September 20 – 23.
4. Kim, Y. P., Fregonese, M., Mazille, H., Féron, D., and Santarini, G., 2003, "Ability of acoustic emission technique for detection and monitoring of crevice corrosion on 304L austenitic stainless steel", *NDT & E International*, Vol. 36, Issue 8, December 2003, pp. 553-562.
5. Mazille, H., Rothea, R., and Tronel, C., 1995, "An acoustic emission technique for monitoring pitting corrosion of austenitic stainless steels", *Corrosion Science*, Vol.37, No.9, pp.1365-1375.
6. Idrissi, H., Mazille, H., Renaud, L., and Cetre, Y., 2001, "Initiation and propagation steps in pitting corrosion of austenitic stainless steels : monitoring by AE", *Corrosion Science*, Vol.43, pp. 627-641.
7. Assouli, B., Srhiri, A., and Idrissi, H., 2003, "Characterization and control of selective corrosion of α/β -brass by acoustic emission", *NDT & E International*, Volume 36, Issue 2, 1 March 2003, Pages 117-126.
8. Darowicki, K., Mirakowski, A., and Krakowiak, S., 2003, "Investigation of pitting corrosion of stainless steel by means of acoustic emission and potentiodynamic methods", *Corrosion Science*, Volume 45, Issue 8, August 2003, pp. 1747-1756.
9. Oltra, R., Chapey, B., and Renaud, L., 1995, "Abrasion-corrosion studies of passive stainless steels in acidic media: combination of acoustic emission and electrochemical techniques", *Wear*, Vol. 186-187, Part 2, August 1995, pp. 533-541.
10. Cakir, A., and Aydin, A., 1999, "AE response of 316L SS during SSR test under potentiostatic control", *Corrosion Science*, Vol. 41, Issue 6, 1 June 1999, pp. 1175-1183.
11. Yoon, D. J., Weiss, W. J., and Shah, S. P., 2000, "Detecting the Extent of Corrosion with Acoustic Emission," *Transportation Research Record 1698*, No. 00-1425, pp. 54-60.
12. Mirakowski, A., "Application of Acoustic Emission Evaluation of Pitting Corrosion in Steel", http://www.korozja.pl/1_01_02.pdf.
13. Prateepasen, A., Jirarungsatean, C., and Thungsook, P., 2006, "Identification of AE Source in Corrosion Process", *Journal of Key Engineering of Material*, (in press).
14. Stansbury, E. E., and Buchanan, R. A., 2000, *Fundamentals of Electrochemical Corrosion*, ASM International, Ohio.
15. Sedriks, A.J., 1996, *Corrosion of Stainless Steels*, John Wiley & Sons, Inc, New York.

ภาคผนวก ค

Semi-Parametric Learning for Classification of Pitting Corrosion Detected by Acoustic Emission

Asa Prateepasen^a, Pakorn Kaewtrakulpong^b and Chalermkiat Jirarungsatean^c

Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

91 Prachautid, Bangmod, Toongkru, Bangkok, 10140, Thailand.

^aiasaasen@kmutt.ac.th, ^bpakorn.kae@kmutt.ac.th, ^cochatean@kmutt.ac.th

Keyword: Acoustic Emission, Pitting Corrosion, Mixture of Gaussians, Semi-Parametric Learning

Abstract. This paper presents a Non-Destructive Testing (NDT) technique, Acoustic Emission (AE) to classify pitting corrosion severity in austenitic stainless steel 304 (SS304). The corrosion severity is graded roughly into five levels based on the depth of corrosion. A number of time-domain AE parameters were extracted and used as features in our classification methods. In this work, we present practical classification techniques based on Bayesian Statistical Decision Theory, namely Maximum A Posteriori (MAP) and Maximum Likelihood (ML) classifiers. Mixture of Gaussian distributions is used as the class-conditional probability density function for the classifiers. The mixture model has several appealing attributes such as the ability to model any probability density function (pdf) with any precision and the efficiency of parameter-estimation algorithm. However, the model still suffers from model-order-selection and initialization problems which greatly limit its applications. In this work, we introduced a semi-parametric scheme for learning the mixture model which can solve the mentioned difficulties. The method was compared with conventional Feed-Forward Neural Network (FFNN) and Probabilistic Neural Network (PNN) to evaluate its performance. We found that our proposed methods gave much lower classification-error rate and also far smaller variance of the classifiers.

Introduction

Pitting corrosion is one of the most important problems of storage tanks in several industries. The process was often found in storage tanks especially in the area with different electrical potentials in the liquid environment. In such environment, the liquid works as an electrolyte in electro-chemical process of the corrosion. It can lead to catastrophes when it occurs in materials, equipments, or machines. Corrosion monitoring by Acoustic Emission (AE) has become more active recently [1-5] because it does not require any process interruption. Although the implementation of AE for corrosion monitoring was frequently studied, only few of them [6, 7] focused on classification of corrosion severity.

The purposes of this paper are to confirm the ability of pitting corrosion detection in stainless steel, to analyze the relationship between the obtained AE signal and the corrosion, and to apply practical classification techniques based on Bayesian Statistical Decision Theory [8], namely Maximum A Posteriori (MAP) and Maximum Likelihood (MLE) classifiers for grading the severity level of the corrosion. The result was compared with other classification methods [6, 7] to compare its performance. The ultimate goal of this work is to develop a novel corrosion monitoring technique that can be used in maintenance planning works.

Pattern Classification Based on MAP and ML Classifiers Using Semi-Parametric Learning

In this section, the outline of *Maximum A Posteriori* (MAP) and *Maximum Likelihood* (ML) classifiers which are special cases of the Bayesian Statistical Decision Theory is described. The MAP classifier gives an optimal rate of classification errors where there is no difference in the cost of misclassification while the ML is optimal when the costs and *a priori* probabilities are unknown.

Suppose we have to decide between M classes $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M$. A given sample $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ belongs to category ω_i with the conditional probability density function $p(\mathbf{x}|\omega_i) \in [0,1]$, where $\mathbf{X}$ is a feature space. In the parametric case, $p(\mathbf{x}|\omega_i)$ is completely known, including its parameters. Each category is also characterized by its *priori probability*, $p(\omega_i) \in [0,1]$ of observing the category ω_i .

From Bayes' formula, the *posterior probability* $p(\omega_i|\mathbf{x}) \in [0,1]$ is defined as

$$p(\omega_i | \mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x} | \omega_i)p(\omega_i)}{p(\mathbf{x})}; i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

The method assigns to the sample $\mathbf{x}$ the category that has the highest posterior probability. Since there is no favor on any particular values of $\mathbf{x}$, the $p(\mathbf{x})$ is all-equal. It is known that this rule is optimum in the sense that no other rules can yield a lower error probability.

The effectiveness of the framework is dependent on accuracies of the class-conditional probability distribution $p(\mathbf{x}|\omega_i)$ and the prior probability $p(\omega_i)$ in equation (1). The prior probability is normally obtained from belief or experience of human experts or even set equal in a non-informative (ML) case; however, obtaining an accurate model of the class-conditional probability distributions is not straightforward. In our case, a mixture of Gaussian distributions is used due to its appealing attributes including its ability to model any probability density function (pdf) with any precision (compared to other parametric pdf's) and its efficiency of the parameter-estimation algorithm (compared to non-parametric pdf's).

Mixture of Gaussian Distributions. The mixture of K Gaussian distributions [9] is defined as

$$p(\mathbf{x}; \theta) = \sum_{k=1}^K w_k \eta(\mathbf{x}; \boldsymbol{\mu}_k, \boldsymbol{\Sigma}_k) \text{ subject to a stochastic constraint } \sum_{i=1}^K w_i = 1. \quad (2)$$

The set of mixture parameters can be collectively represented as $\theta = \{w_1, \dots, w_K, \boldsymbol{\mu}_1, \dots, \boldsymbol{\mu}_K, \boldsymbol{\Sigma}_1, \dots, \boldsymbol{\Sigma}_K\}$. $\eta(\mathbf{x}; \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$ is a Gaussian kernel with $\boldsymbol{\mu}$ and $\boldsymbol{\Sigma}$ representing mean vector and covariance matrix, respectively. The most popular method for estimating the parameters of the mixture is the Maximum Likelihood Estimation (MLE). Given a set train data $D = \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N\}$, the likelihood of the Gaussian mixture model is defined as

$$\ell(D; \theta) = \prod_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \omega_k \eta(\mathbf{x}_i; \boldsymbol{\mu}_k, \boldsymbol{\Sigma}_k) \quad (3)$$

The MLE of a Gaussian mixture model is normally achieved by Expectation Maximization (EM) algorithm [9]. It is an iterative algorithm which is not only simple but also efficient. It also handles the stochastic constraint naturally. However, its likelihood landscape also contains singularities and local maxima which impose on numerical instability and accuracy of the solution. These greatly limit its applications. In this work, we introduced a semi-parametric approach for learning the mixture model which could overcome the mentioned difficulties as described in the next section

Semi-Parametric Learning of Gaussian Mixture Model. The semi-parametric learning of Gaussian mixture model in our work is based on a sequentially increasing the number of Gaussian components and choosing the model order according to Minimum Description Length (MDL) criterion [10]. Flowchart of our approach is shown in Fig 1(a).

The MDL support for each mixture order is computed by

$$MDL(K) = -\gamma(D; \theta(K)) + \frac{1}{2} N_p(K) \ln N \quad (4)$$

where $\gamma(D; \theta(K))$ is the likelihood of the training data given the mixture of K Gaussians. $N_p(K)$ is the number of independent parameters in the mixture model.

To eliminate singularities and local maxima in the likelihood landscape of the mixture, the parameter estimation by EM algorithm is run repeatedly for a number of times (20 times in our case) for each model order. The estimate of this order with highest likelihood value is kept and MDL calculated. The model with minimum MDL support is selected as the class-conditional distribution for the class. An example of applying the method to construct the class-conditional probability distribution from the data of one class is illustrated in Fig 1(b). It can be seen from the figure that the mixture model of order 6 has the minimum MDL and is select to represent the class.

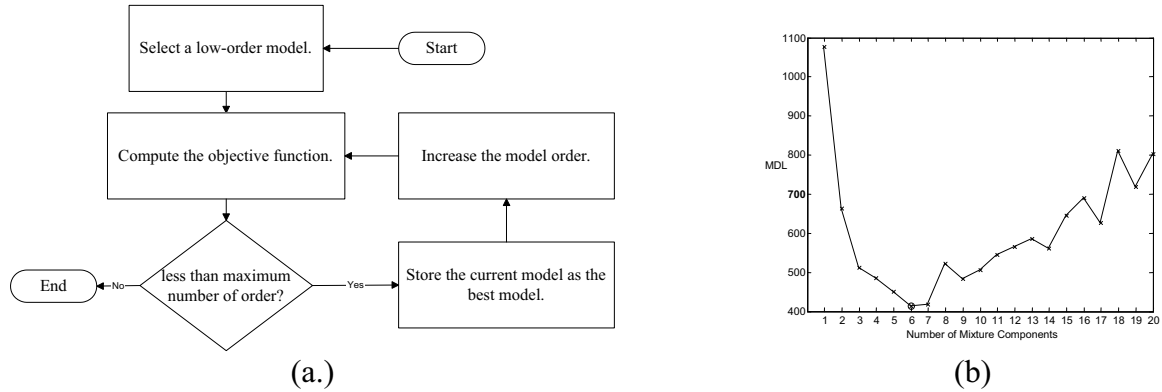


Fig. 1. (a) Flowchart of semi-parametric learning approach (b) An example of applying the method to construct the class-conditional probability distribution from the data of one class

Experimental Setup

The diagram of experimental setup is provided in Fig 2. Specimens made from AISI304 (austenitic stainless) 1 mm thick were prepared by wet grinding using a 1200 grit silicon carbide sheet, then rinsing with distilled water and getting dried in cold air. The electrochemical environment was 3%NaCl solution added with HCL to control its pH at the level of two. For the polarization tests, the electrochemically applied constant potential was controlled by a potentiostat (Solartron 1284) using E_{pit} at 0.31128 V. The sample acted as a working electrode, a platinum mesh as the counter-electrode and an Ag/AgCl (sat. KCl) as a reference. The AE instrumentation consisted of transducers, preamplifiers and a data acquisition system. A resonant transducer of type R15 from Physical Acoustic Corp. (PAC) was attached to the other side of the specimen using coupling gel and connected to a

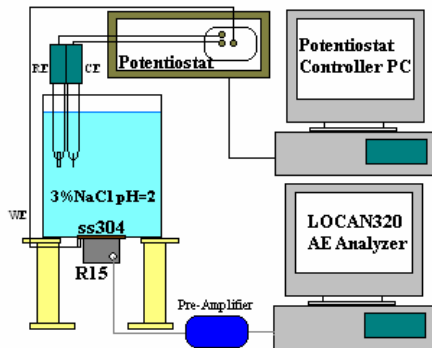


Fig. 2. A schematic of AE system

preamplifier set at 60 dB. Integrity of attachment of the AE sensor was verified by pencil lead breaking. AE parameters including amplitude, count, rise time, duration time and energy were recorded by an AE data acquisition system, PAC LOCAN320.

Since the corrosion severity level can not be measured directly during the corrosion process, a series of experiments with an increasing step of 30-minute interval was conducted under controlled environment. For each of the experiments, depth of corroded pits of the specimens was measured by a vertical-motion measuring pin. Depths around the hole area were taken and the maximum was chosen as the representative. A relation between corrosion depth and time was established and used to estimate the severity level for subsequent experiments.

Experimental Result

An experiment was executed and the AE parameters were recorded and labeled. The period of experiment was three hours for each specimen. The data was then undergone a preprocessing step before being fed into classifiers by a linear scaling so that it stayed within the range of $[-1,1]$ and

filtered by an *Adaptive Moving Average* (AMA) [6, 7].

Four classifiers, namely MAP, ML, FFNN and PNN were compared using the same set of data. For the first three methods, data were divided into two sets of equal size: training and testing sets. A set of 2% of data in each class was used to train the PNN for efficiency while the rest was for testing. For MAP and ML classifiers, class-conditional probability distributions were constructed by our semi-parametric learning. An additional set of prior probabilities was also calculated from the training set for MAP classifier using the amounts of data in classes. For FFNN, a single hidden-layer of eight nodes as suggested by our previous work [6] was used.

To reduce variations due to a single experiment, 20 experiments were run for each classifier. In each experiment, the data were randomly selected and separated into training and test sets. The training set was used to construct corresponding model for each classifier. Percentage of correct

Table 1. Overall Performance of Classifiers

Classifier	Correctly Classified Result [%]			
	Min	Max	Avg	Var
MAP	98.97	99.74	99.26	0.010
ML	98.68	99.52	99.03	0.014
FFNN [6]	84.73	98.85	90.65	3.115
PNN [7]	89.62	99.13	97.33	1.418

classification result was treated as its performance and recorded. Table 1 shows overall performance of classifiers from the contest. It can be seen that MAP and ML classifiers not only achieve best average performances but also have smallest variances. This means that on average, MAP and ML classifiers outperform other widely-used classifiers such as FFNN and PNN. Moreover, the semi-parametric learning of the two classifiers

also has very high consistency to reproduce the classifiers of outstanding performances.

Conclusion and Discussions

In this work, we present practical classification techniques based on Bayesian Statistical Decision Theory, namely MAP and ML classifiers. Mixture of Gaussian distributions is used as the class-conditional probability density function for the classifiers. Although, the mixture model has several appealing properties, it still suffers from model-order-selection and initialization problems. A semi-parametric scheme for learning the mixture model is therefore introduced to solve the difficulties. The proposed methods were applied to classify corrosion severity level of Acoustic Emission (AE) signals obtained from the pitting corrosion in stainless steel 304. Conventional FFNN and PNN were brought into the contest to compare its performance. The result showed that our proposed methods gave much lower classification-error rates and also far smaller variances of the classifiers.

Acknowledgments

The authors wish to acknowledge support from “Commission on Higher Education” and “The Thailand Research Fund” and would like to thank Dr. G. Lothongkum for his comments.

References

- [1] C. Jirarungsatean, A. Prateepasen and P. Thungsuk: IE net. conf., Thailand, pp. 376-387, 2002
- [2] R. S. Geng: Key Engineering Materials., Vol. 270-273 (2004), pp. 503-509.
- [3] H. Mazille, R. Rothea and C. Tronel: Corrosion Science, Vol.37, No.9, pp.1365-1375, 1995
- [4] H. Idrissi, H. Mazille, L. Renaud and Y. Cetre: Corrosion Science, 43, 627-641, 2001
- [5] J. Dimopoulos ATTAR: Corrosion Control & NDT, Melbourn, Australia, 2003.
- [6] N. Saenkhum, A. Prateepasen and P. Kaewtrakulpong: IMECE'2003, Washington, D.C., 2003
- [7] C. Jirarungsatean, A. Prateepasen and P. Kaewtrakulpong: Corrosion Control & NDT, Melbourn, Australia, 2003
- [8] R.O. Duda, P.E. Hart, and D.G. Stork: Pattern Classification. John Wiley and Sons, 2001.
- [9] D.M. Titterington, A.F.M. Smith, and U.E. Makov: Statistical Analysis of Finite Mixture Distributions. Wiley, 1985.
- [10] J. Rissanen: In ICPR98, page Invited Talk, 1998.

ภาคผนวก ง

Effect of Sulfuric Acid Concentration on Acoustic Emission Signals Obtained from Uniform-Corrosion

Asa Prateepasen^a Chalermkiat Jirarungsatean^b and Pongsak Tuengsook^c

Department of Production Engineering

King Mongkut's University of Technology Thonburi.

Bangmod, Toong-kru, Bangkok, 10140, Thailand

^aiasaasen@kmutt.ac.th, ^bochatean@kmutt.ac.th, ^cptuengsook@yahoo.com

Keywords: Uniform-corrosion, Acoustic emission, Sulfuric acid, Mild steel.

Abstract. In petroleum industry, corrosion failures of steel structures are common. The severity of corrosion in oil distilleries inorganic compounds is higher than in those of organic compounds. Inorganic compounds such as sulfur are the most influential corrosive activators inside oil or chemical storage tanks. They make the tanks to be inspected and repaired along their life time. In addition the concentration of sulfur compound increases due to the accumulation of the deposit inside the tank, and so does the corrosive rate. In this paper, Acoustic Emission (AE) has been chosen to study the characteristic of AE signals received from the uniform corrosion mechanism of mild steel (A36) in various concentrations of Sulfuric acid (H₂SO₄) solution. AE signals were captured using a board band sensor (WD) and recorded by AE system model LOCAN 320. The relationship between AE signals and sulfur concentrations as well as pH were exhibited.

Corrosion of Storage Tank of Crude Oil [1]

Iron and carbon steel usually have very low corrosion rates in deaerated neutral water and dilute salt solutions. However, the crude oil contains elements of sulfur and soil that may support relatively high corrosion rate attributed to aerobic bacteria. An aerobic bacterium is in the soil and it used oxygen for the growing known as sulfur oxidizing bacteria. This kind of bacteria can oxidize sulfur (S) or thiosulphate (S₂O₃²⁻) to sulfuric acid (H₂SO₄). So the electrochemical reaction for the uniform corrosion involved by sulfuric acid on carbon steel started with a release of electrons at the anodic surface: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$. Then the acceptance of electrons was coupled by hydrogen ions at the cathodic surface: $2e + 2H^+ \rightarrow 2H$. These previous reactions is followed by the aerobic corrosion involved with H₂SO₄. The mechanism of aerobic corrosion in H₂SO₄ concentrated solution is expressed as $4Fe + H_2SO_4 + 2H_2O \longrightarrow FeS + 3Fe(OH)_2$. FeS and Fe(OH)₂ are corrosion products from the process. This corrosion process is considered to be a uniform corrosion.

The corrosion monitoring using Acoustic emission (AE) technique is one of applications implemented by AE. Majority of them focused in two groups of corrosion: uniform and localized corrosion [2]. The occurrence of each corrosion form is influenced by corrosive environment and other respected factors. F. Ferrer and E. Andrès showed that the corrosion caused by sulfuric acid solution can be detected by AE technique. And their works studied on active-passive transitions during corrosion process on carbon steel [3]. The advantage of this method requires less accessibility and less time consumable.

Experimental setup

The work planed to study the influence of H₂SO₄ on uniform corrosion by using AE technique. The effect of H₂SO₄ on uniform corrosion can be separated to two ways. One is the effect of pH due to the concentrate of H₂SO₄. The other is the effect of sulfur of the corrosion process. Therefore, this work has two separated experiments. One is the experiment with various pH and the other is the experiment with various concentration of sulfur. The test specimens were prepared from the mild

steel type A36 bars with chemical composition: 0.26%C, 0.80%Mn, 0.04%P, 0.05%S, 0.40%Si, 0.20%Cu, and balanced Fe. The exposed surface was ground mechanically. The surfaces were then cleaned with distilled water, dried in stream of warm air, and were stored overnight in desiccators. In first experiment, the concentration of H_2SO_4 in the solution were varied for each condition testing by referring to the sulfur concentrated in crude oil (0.05-2% by weight) [4] which influences to corrosion process in storage tank of crude oil. The first experiment setup was shown in Fig. 1a where the exposed surface of sample is equal to 57.3 cm^2 in area. For the second experiment (see Fig. 1b), the exposed surface area of A36 sample is 57.3 cm^2 in the solution that pH value was adjusted by H_2SO_4 to be 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 and 6.5, respectively. The range of pH refers to the pH value range in the crude oil [4]. The Potentiostat was used to control the electrochemical of corrosion process at the static corrosive potential (E_{corr}). This potential value of each corrosive condition is difference. So the E_{corr} values for each pH adjustment were obtained from polarization curve by potentiodynamic tests.

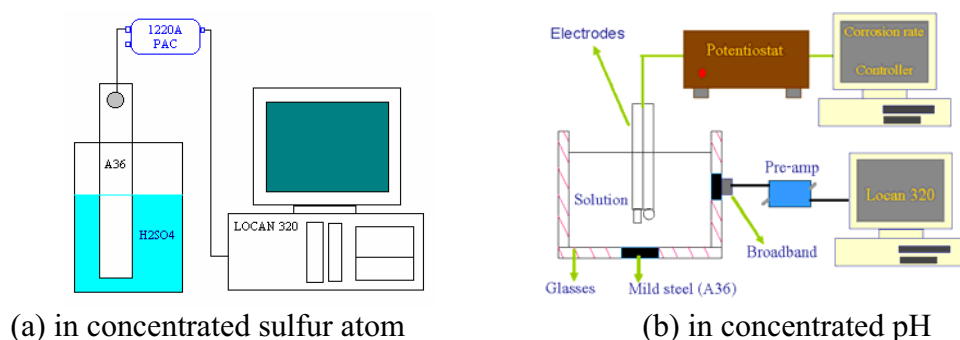


Fig. 1. Schematic representation of the corrosion monitoring by AE

Both experiments had been operated in order to monitor and collect AE signals for 24 hours. A piezoelectric transducer of type board band at corresponding frequency between 0 and 1 MHz from PAC was used to detect the AE signals. Then, the AE signals were filtered by using a 1 MHz low pass filter built in at the pre-amplifier. The gain of amplify is 60 dB. AE parameters were calculated and stored in LOCAN320 (PAC). For each detected AE signal, following acoustic parameters are studied: counts number, duration time, rise time and amplitude. These AE parameters were then analyzed corresponding to the corrosion behavior for each differ corrosive condition testing.

Experimental Results and Discussion

The AE signals in corrosion process were the results from the various corrosion mechanisms: the passive film breakage, the corrosion reaction on the metal surface and the present of corrosion product (hydrogen bubble and metal oxide).

Influence of sulfur concentration. The correlation plot of AE parameters, duration and counts parameter, of uniform corrosion on carbon steel in the solution with 1% by weight sulfur concentration showed the separations of AE parameter data into 2 groups, see Fig. 2. The separated group of AE parameters data came from different AE source. Group A was remarked as AE signal from the breakage of the passive films on the metal surface. One of the reasons by electrochemical explanation in corrosion mechanism is most of AE signal in group A are received at the first hour period which is the passive and re-passive film breakage. This oxide films protect the metal surface from the corrosion. If it broke, the uniform corrosion of carbon steel could start. In generally, the oxide film can form suddenly by itself after its damage, known as re-passivation process. For this work, the solutions with 1% and 0.05% by weight sulfur concentration have high concentration of sulfur atom and low value of pH. So the re-passive film was destroyed again and again. Therefore, AE signals in group A were released. After that the passive film was broken and formed in a moment, until the electrochemical potential of corrosion process exceeded E_{corr} value. In this time, the passive film cannot be produced again so the corrosive solution could attack metal surface directly. As the result of that, the uniform corrosion on the metal's surface started and then the AE

signals were released as data group B. This group, the uniform corrosion at the surface was still going on and emitting the acoustic signal as higher counts number and lower duration group than signals of group A.

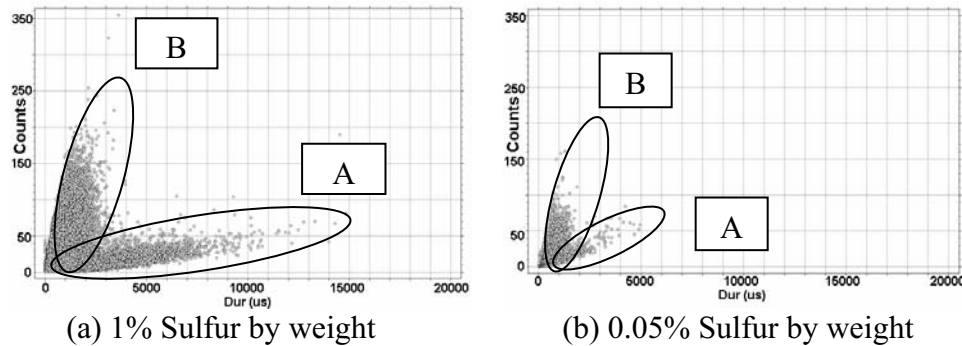


Fig. 2. AE Duration-Counts of different corrosive condition on carbon steel

Table 1. The corrosion rate of sulfur atom concentration corrosive solution

Corrosion Condition	Weight loss in grams	Corrosion rate (mm/yr)
1.00% Sulfur by weight	10.32	98.31
0.05% Sulfur by weight	0.56	5.33

The corrosion rate of 0.05% sulfur atom condition is much less than that of 1.00% sulfur atom condition (Table 1). When we consider the pH value of two corrosive solution of this experiment part, 0.05% by weight sulfur condition had pH value equal to 1.31 and 1.00% by weight sulfur condition had pH value equal to 0.2. These conditions are stronger acid than the condition in crude oil (pH 4-6). Thus the next experimental was discussed about influence of pH value in H_2SO_4 solution.

Influence of pH in Corrosion by H_2SO_4 Solution This part of work, AE monitoring of corrosion tests were in various pH value solution respected to the pH values 4-6 range for crude oil. However, the sulfur atom in this case was slightly changed. From the relation between pH and corrosion rate display in table 2 and the reason mention above, it can be concluded that the difference of pH values show more influence to corrosion rate than the sulfur concentration in H_2SO_4 solution. In addition to consider the correlated plot between AE Duration and Counts for pH 4.5 corrosion tests (Fig. 3), it differed from the result from the previous tests. The AE signal showed only one group

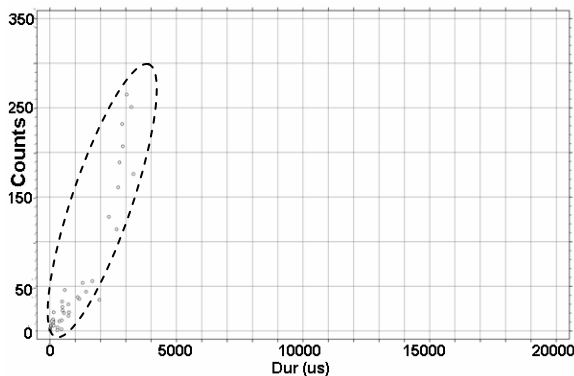


Fig. 3. Duration-Counts of pH 4.5 condition

which came from the breakage of passive film on metal A36 surface, because the electrochemical potential in corrosion process was around E_{corr} where passive film can rebuilt. This effect was same for all conditions in this part of experiments. The electrochemical potential was controlled to have the same value as E_{corr} for corrosion tests in each pH value solution by potentiostat controller. The E_{corr} value and corrosion rate for each condition tests were obtained by polarization curve in potentiodynamic tests and are shown in Table 2.

Table 2. The E_{corr} value and corrosion rate for each pH of H_2SO_4 solution

pH	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
E_{corr} (Volts)	-0.47577	-0.56130	-0.43673	-0.48407	-0.42576
Corrosion rate(mm/yr)	0.0625	0.0504	0.0432	0.0292	0.0119

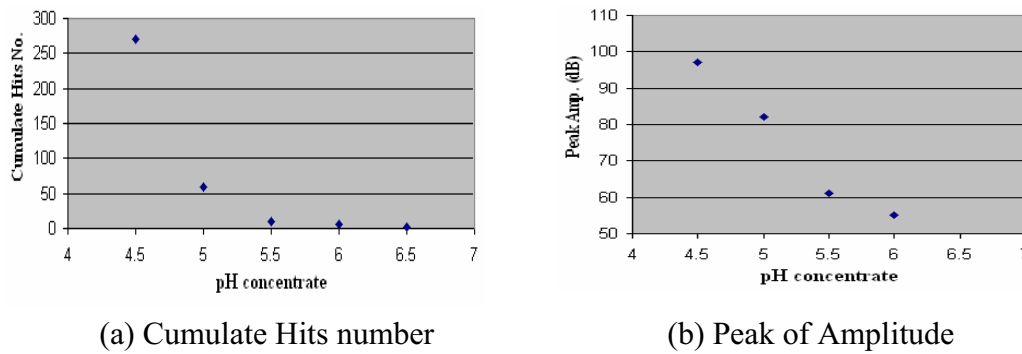


Fig. 4. The AE parameter analyzes for pH concentration of H₂SO₄ solution

The relationships between AE parameter and pH value of H₂SO₄ solution as shown in Fig.4 can be expressed in Eq. 1 and 2.

$$\text{Cumulate Hits number (no.)} = 3 \times 10^6 \times e^{-2.143 \times (\text{pH value})} \quad (1)$$

$$\text{Peak of Amplitude (dB)} = 260 - 36(\text{pH value}) \quad (2)$$

where R-squared of linear equation is 0.9908. In practical the corrosion level such as in tank floor will be graded roughly, for example, in to five grades. This experimental work can be used as useful information to know that AE activity changes with pH concentration.

Summary

The detected AE signals can be analyzed and then describe the effect of the difference H₂SO₄ concentrations for uniform corrosion process. The following conclusions can be drawn:

1. The investigation of scatter plot of AE parameter as Duration-Counts can explain the corrosion mechanism that released acoustic signals with different characteristics.
2. The AE analyzes shows that the difference of pH values has more influence to corrosion rate than the sulfur concentration in H₂SO₄ solution.
3. The cumulate Hits and Amplitude of detected AE signals exhibits correlation to pH concentration via obtained equations which are exponential and linear equation respectively.
4. The long time stored crude oil in storage tanks are tend to have increasing of sulfuric acid concentration due to the bacteria reduce corrosion. The pH value of crude oil increases too. This effect is one main factor of corrosion rate in field. This work studied the effect of difference in sulfuric acid concentration in crude oil which is useful information to predict corrosion rate.

Acknowledgments

The authors wish to acknowledge support from “Commission on Higher Education” and “The Thailand Research Fund”, and would like to thank Dr. G. Lothongkum, Dr. P. Kaewtrakulpong and Mr. C. Jomdecha for their comments.

References

- [1] D. A. Jones: Principles and prevention of corrosion (Prentice-Hall Inc., Singapore 1997)
- [2] Information on <http://www.ndt.net/article/apcndt01/papers/1143/1143.htm>
- [3] K. Darowicki and S. Krakowiak: Corrosion Science, Vol. 45, August 2003, pp. 1747-1756
- [4] G. V. Chilingar: Surface operations in petroleum production (Elsevier, New York 1969)

ภาคผนวก จ

การตรวจับการกัดกร่อนแบบยูนิฟอร์มในเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และรอยเชื่อมด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน

Uniform Corrosion Monitoring in Low Carbon Steel and Weld using Acoustic Emission

อาษา ประทีปเสน* และ มนตรี กุดั่น**

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี

126 ถ.ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทรศัพท์ 0-2872-9472

Email: *, * iasaasen@kmutt.ac.th, ** iamball09@hotmail.com

คำสำคัญ : อะคูสติกอิมิชชัน อัตราการกัดกร่อน เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ กรดซัลฟูริก

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำการตรวจสอบโดยไม่ทำลายวิธีอะคูสติกอิมิชชัน (Acoustic Emission : AE) ทำการตรวจับการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) ซึ่งวิธีการตรวจสอบนี้เป็นตรวจับสัญญาณคลื่นเสียงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวัสดุ และเป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลายที่มีข้อได้เปรียบกว่าวิธีการตรวจสอบอื่นๆ คือสามารถตรวจสอบวัสดุ อุปกรณ์ ขณะที่กำลังใช้งานอยู่และเป็นการตรวจสอบก่อนที่จะเกิดการเสียหาย จึงสามารถที่จะทำการป้องกัน แก้ไขหรือซ่อมแซมวัสดุ อุปกรณ์ก่อนจะเกิดการเสียหายได้ ซึ่งในการวิจัยจะศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับพารามิเตอร์ทางสัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน (AE-Parameter) โดยนำวัสดุที่ใช้ทำถังพักบรรจุคือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด A36 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด A36 ที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมลวดหุ้มฟลักซ์ (SMAW) โดยการเชื่อมใช้ลวดเชื่อมชนิด E7016 มาทดสอบการกัดกร่อนโดยใช้กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่มีค่าความเป็นกรด (pH) ต่างกัน 4 ระดับคือตั้งแต่ค่าความเป็นกรด 4.5 ถึง 6 โดยปรับค่าความเป็นกรดช่วงละ 0.5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระยะเวลา 24 ชั่วโมง ในขณะที่ทำการทดลองได้ควบคุมอัตราการกัดกร่อนให้คงที่ด้วยเครื่องควบคุมการกัดกร่อนด้วยไฟฟ้า (Potentiostat) โดยการควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าให้คงที่เท่ากับค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อน (E_{corr}) และได้บันทึกผลทางสัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน ตลอดการทดลองโดยติดตั้งหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมิชชัน ไว้ด้านข้างถังพักจำลองผลการวิจัยพบว่าเมื่อสภาวะการกัดกร่อนของวัสดุและกรดซัลฟูริกเปลี่ยนแปลงไป จะส่งผลให้พารามิเตอร์ทางสัญญาณอะคูสติกอิมิชชันมีลักษณะของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปด้วย และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับพารามิเตอร์ทางสัญญาณอะคูสติกอิมิชชันมีความสัมพันธ์กันในทางสมการคณิตศาสตร์

1. บทนำ

ในปัจจุบันปัญหาทางด้านการกัดกร่อนของวัสดุและอุปกรณ์เป็นปัญหาที่สำคัญยิ่งปัญหาหนึ่ง ของทางอุตสาหกรรม ในด้านการใช้งานและการบำรุงดูแลรักษา การกัดกร่อนจะลดอายุการใช้งานของวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ และบ่อยครั้งที่ทำให้ต้องหยุดการทำงานโดยไม่ทราบล่วงหน้าหรือบางครั้งก็เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงเกิดขึ้น ซึ่งในการตรวจสอบว่ามี การกัดกร่อนหรือไม่ และการตรวจสอบความรุนแรงของการกัดกร่อนของวัสดุและอุปกรณ์ที่จะตรวจสอบ จะต้องมีขั้นตอน เตรียมการล่วงหน้าก่อนการตรวจสอบหรืออาจจะต้องทำการหยุดการทำงานของเครื่องจักร วัสดุและอุปกรณ์นั้นๆ เช่น การตรวจสอบการกัดกร่อนที่ก้นของถังบรรจุ ก่อนการตรวจสอบการกัดกร่อนจะต้องนำของเหลวที่บรรจุอยู่ภายในถังบรรจุ นั้นออกให้หมดก่อน แล้วจึงจะทำการตรวจสอบการกัดกร่อนได้ ซึ่งบางครั้งการตรวจสอบอาจจะไม่พบสิ่งที่ผิดปกติเลย การตรวจจบบริเวณอะคูสติคิมิกซ์ชัน เป็นวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายวิธีหนึ่ง ที่สามารถตรวจจบบริเวณอะคูสติคิมิกซ์ชันที่เกิดขึ้นจากการกัดกร่อน เนื่องจากการกัดกร่อนจะทำให้โครงสร้างของวัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งโครงสร้างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้นจะเกิดสัญญาณเสียงเกิดขึ้น ทำให้สามารถตรวจจบบริเวณอะคูสติคิมิกซ์ชันได้โดยในปัจจุบันมีการยอมรับ ในการตรวจสอบการกัดกร่อน โดยการตรวจจบบริเวณอะคูสติคิมิกซ์ชันกันมากขึ้น เพราะการตรวจจบบริเวณอะคูสติคิมิกซ์ชันด้วยวิธีอะคูสติคิมิกซ์ชัน สามารถนำมาใช้กับการตรวจสอบแบบเฝ้าระวังได้เป็นอย่างดี รวมทั้งสามารถ ตรวจสอบวัสดุและอุปกรณ์โดยไม่ต้องทำการหยุดการทำงานของเครื่องจักรและอุปกรณ์ ดังนั้นการตรวจสอบด้วยวิธี อะคูสติคิมิกซ์ชันจึงเป็นวิธีการตรวจสอบที่เหมาะสมสำหรับการตรวจจบบริเวณอะคูสติคิมิกซ์ชันที่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้เป็นอย่างดี

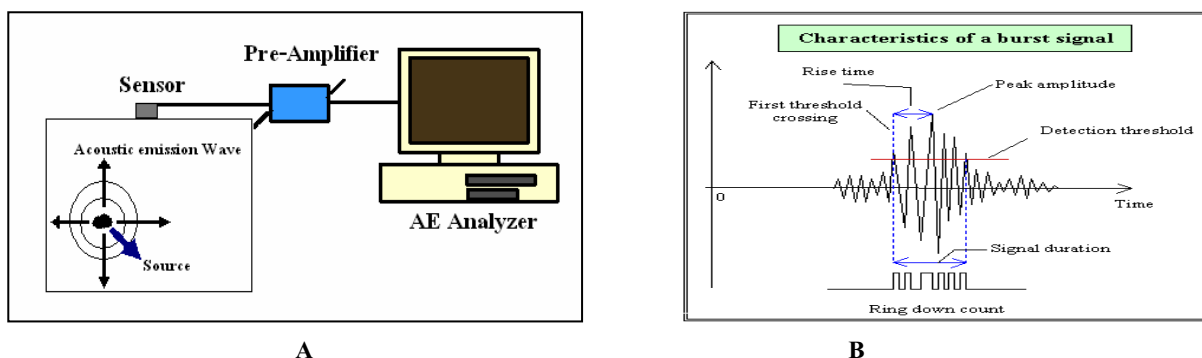
งานวิจัยที่ผ่านมาได้นำวิธีอะคูสติคิมิกซ์ชันมาตรวจจบบริเวณอะคูสติคิมิกซ์ชันโดยวัสดุที่ใช้ในการกัดกร่อนต่างๆกัน ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอน[1][2] เหล็กกล้าไร้สนิม [3] อลูมิเนียม[4]และ เป็นต้น วิธีการเร่งอัตราการกัดกร่อน การอาศัย สภาพแวดล้อม[5] หรือ สารละลายเป็นตัวเร่งอัตราการกัดกร่อน[6] สำหรับการวิเคราะห์สัญญาณได้ใช้พารามิเตอร์ทาง อะคูสติคิมิกซ์ชันหลายตัวแปร เช่น ฮิต(Hits)[2] พลังงานเฉลี่ย(AE rms) และแอมพลิจูด เป็นต้น อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ ระหว่างสัญญาณอะคูสติคิมิกซ์ชันกับอัตราการกัดกร่อนของวัสดุยังไม่มีผู้ใดรายงานไว้

บทความงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสัญญาณทางอะคูสติคิมิกซ์ชันกับอัตราการกัดกร่อนของวัสดุ โดยการทดลองจะควบคุมการกัดกร่อนให้มีอัตราการกัดกร่อน 4 ระดับโดยใช้กรดซัลฟริกที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่างๆกันและควบคุมการเกิดการกัดกร่อนวัสดุให้คงที่ด้วยเครื่องควบคุมการกัดกร่อนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัสดุทดสอบที่เลือกใช้ในการทดลองคือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด A36 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด A36 ที่ผ่านการเชื่อม ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทำถังพักบรรจุน้ำมันมาทดสอบการกัดกร่อนในถังจำลองโดยติดตั้งหัวตรวจสอบอะคูสติคิมิกซ์ชันไว้ ด้านข้างถังจำลองนั้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการการตรวจสอบด้วยวิธีอะคูสติคิมิกซ์ชัน

การปล่อยคลื่นอะคูสติคิมิกซ์ชัน คือ ปรากฏการณ์ที่คลื่นความยืดหยุ่นแบบชั่วคราวเกิดขึ้นจากการปลดปล่อยพลังงาน อย่างรวดเร็วของแหล่งพลังงานเฉพาะจุดจากภายในเนื้อหรือผิวของวัสดุ ซึ่งการปลดปล่อยคลื่นอะคูสติคิมิกซ์ชันนี้จะเกิด กลไกของการเสียรูปทรง การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวัสดุ และ การแตกหักของวัสดุซึ่งได้แก่ การคลาก(Yielding) การเคลื่อนตัว (Dislocation Motion) การขยายตัวของรอยร้าว (Crack Propagation) เป็นต้น ในขณะที่ชิ้นงานกำลังเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือเกิดความเสียหายจะปล่อยพลังงานกลในรูปของคลื่นเสียงออกมา ดังรูปที่ 1.A พลังงานกลนี้จะ ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อนำไปวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้น



รูปที่ 1 A. หลักการการตรวจสอบด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน B. พารามิเตอร์ทางสัญญาณอะคูสติกอิมิชชัน

โดยการวิเคราะห์การตรวจสอบจะใช้ พารามิเตอร์ทางอะคูสติกอิมิชชัน ต่างๆ ดังรูปที่ 1 B. ทำการประมวลผล พารามิเตอร์ทางอะคูสติกอิมิชชันที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์หักกัน ดังนี้

1. ฮิต(Hits) คือ จำนวนครั้งที่เกิดสัญญาณคลื่นอะคูสติกอิมิชชัน ขึ้น
2. แอมพลิจูดสูงสุด(Peak Amplitude) คือ แอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณคลื่นอะคูสติกอิมิชชันใน 1 ฮิต
3. เคาท์(Count) คือ จำนวนแอมพลิจูดของสัญญาณที่มีค่าสูงกว่าค่าจำกัดเริ่มต้น
4. ไรท์ไทม์(Rise Time) คือ ระยะเวลาระหว่างช่วงตั้งแต่สัญญาณมีค่าสูงกว่าค่าจำกัดเริ่มต้นครั้งแรกจนถึงสัญญาณที่มีค่าแอมพลิจูดสูงสุด
5. ดิวรีชั่น(Duration Time) คือ ระยะเวลาตั้งแต่สัญญาณแรกที่มีแอมพลิจูดสูงกว่าค่าจำกัดเริ่มต้น จนถึงเวลาของแอมพลิจูดของสัญญาณสุดท้ายที่สูงกว่าค่าจำกัดเริ่มต้น
6. พลังงาน(Energy) คือ พลังงานที่มีในสัญญาณของคลื่นอะคูสติกอิมิชชัน โดยค่าพลังงานของคลื่นอะคูสติกอิมิชชัน นี้จะหาได้จากการอินทิเกรตของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พิเศษตามสมการ ซึ่งค่าพลังงาน(U) นี้จะช่วยในการวิเคราะห์สัญญาณแบบต่อเนื่องที่มีแอมพลิจูดต่ำได้ดี

2.2 การกัดกร่อน กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อน การเปลี่ยนแปลงที่ผิวโลหะและอัตราการกัดกร่อน

ในความหมายอย่างกว้าง ๆ การกัดกร่อน คือ การสูญเสียเนื้อโลหะ โดยเกิดปฏิกิริยา กับสิ่งแวดล้อมอาจจะเป็นปฏิกิริยาทางเคมี หรือไฟฟ้าเคมี[8] ลักษณะของการกัดกร่อนจะมีหลายประเภท เช่น การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ(Uniform) แบบหลุมลึก(Pitting) การกัดกร่อนจากความเค้นตึงค้ำ(Stress Corrosion Cracking) เป็นต้น ในการทดลองนี้จะเป็นลักษณะของการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ ซึ่งจะเป็นรูปแบบการกัดกร่อนที่พบเห็นได้ทั่วไปเพราะจะเกิดขึ้นมากที่สุดและทำให้เกิดความเสียหายให้กับโลหะมากที่สุด โดยการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอจะเกิดจากโลหะทำปฏิกิริยาเคมีหรือไฟฟ้าเคมีกับสารเคมีในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนโดยเกิดทั่วทั้งผิวหน้าของโลหะที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมนั้น เมื่อเวลาผ่านไปโลหะถูกกัดกร่อนจนบางลงหรือบางจนเกิดความเสียหาย ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดการกัดกร่อนและความรุนแรงในการเกิดการกัดกร่อนมีหลายสาเหตุ เช่น ความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย อุณหภูมิแวดล้อมของวัสดุและสารละลาย ความเข้มข้นของธาตุบางชนิดในสารเคมี อัตราการไหลของสารละลายและโครงสร้างทางจุลภาค เป็นต้น

การกัดกร่อนของโลหะเกือบทั้งหมดจะมีขั้นตอนการเกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าหรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนในสารละลายจะเรียกว่าปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ในการถ่ายเทประจุไฟฟ้าจะประกอบด้วย 2 ปฏิกิริยาย่อยคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน

(Oxidation) และปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) เช่นเดียวกับการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก

ในสภาวะปกติปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ผิวโลหะจะดำเนินไปด้วยอัตราเร็วคงที่ค่าหนึ่ง ตามปริมาณอิเล็กตรอนที่แลกเปลี่ยนกัน เมื่อการให้และรับอิเล็กตรอนที่ผิวโลหะดำเนินไปชั่วเวลาหนึ่ง ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวโลหะจะเปลี่ยนไปในทางเป็นลบมากขึ้น ทั้งนี้เพราะอิเล็กตรอนมาคั่งรอเกิดปฏิกิริยาที่ผิวตรงรอยต่อของโลหะกับสารละลาย แสดงว่าในเวลานั้นปฏิกิริยาไม่ได้ดำเนินไปเร็วเท่าจำนวนอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในระบบ อิเล็กตรอนที่มีมากที่ผิวทำให้ศักย์ไฟฟ้าของโลหะเปลี่ยนแปลงไปทางลบมากขึ้นเรียกว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผิวหน้าของโลหะ ซึ่งมีผลต่ออัตราการกัดกร่อน การเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าที่ผิวโลหะแบบนี้จัดเป็น Cathodic Polarization ในทางตรงข้าม ถ้าอิเล็กตรอนที่ผิวโลหะไม่เพียงพอทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวโลหะมีค่าเป็นบวกมากขึ้นและส่งผลต่ออัตราการกัดกร่อนให้เพิ่มมากขึ้น เหตุการณ์นี้เรียกว่า Anodic Polarization

โลหะในสารละลายจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวที่ภาวะสมดุลค่าหนึ่ง เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อน (E_{corr}) และ กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อน (I_{corr}) มีค่าขึ้นกับอัตราการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนของปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชัน ถ้าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน จะส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนจะลดลง และค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนจะมีค่าผกผันกับค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน ดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อน คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้การเกิดปฏิกิริยาที่สมดุลระหว่างปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะและปฏิกิริยารีดักชันของสารละลาย และ กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อน คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนของปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะและปฏิกิริยารีดักชันของสารละลาย ที่มีสภาวะที่สมดุลและเหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาระหว่างโลหะและสารละลาย

การตรวจสอบการกัดกร่อนเป็นการประเมินคุณภาพของคุณลักษณะของการกัดกร่อนซึ่งจะแสดงอยู่ในรูปของอัตราการกัดกร่อน อัตราการกัดกร่อนเป็นอัตราการสูญเสียโลหะในช่วงเวลาหนึ่ง หน่วยของอัตราการกัดกร่อนที่นิยมใช้ คือ Mills Per Year (MPY) (1 Mil = 0.001 นิ้ว) หรือ มิลลิเมตรต่อปี (mmPY) โดยวิธีการหาอัตราการกัดกร่อน จะมี 2 วิธี คือ ใช้การคำนวณค่าน้ำหนักที่หายไป และ วิธีไฟฟ้าเคมี ในที่นี้จะกล่าวถึงการหาวิธีอัตราการกัดกร่อนวิธีไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น โดยการหาอัตราการกัดกร่อนวิธีนี้จะเป็นการหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อนของโลหะตัวอย่างที่ใช้เป็นขั้วอะโนดในเซลล์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนที่มีสารละลายที่สัมผัสโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยควบคุมให้ความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิ และค่าความเป็นกรดของสารละลาย เป็นต้น ให้เหมือนกับสภาวะจริง เมื่อได้ค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อนแล้วจะนำไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนโดยสมการนี้

$$\text{Corrosion Rate (mmPY)} = \frac{I_{corr} * E_w * 10}{(D * 96500)} \quad (2.1) [7]$$

โดย I_{corr} = ค่าลอการิทึมของค่าความหนาแน่นกระแส (แอมป์ / ตารางเซนติเมตร)

D = ความหนาแน่นของวัสดุทดสอบ (กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร)

E_w = Equivalent weight (กรัม / Equivalent)

ซึ่ง $E_w = AW / N$

โดย AW = น้ำหนักของอะตอม

N = จำนวนประจุไฟฟ้าที่แลกเปลี่ยนในปฏิกิริยา

2.3 แหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ที่เกิดจากการกักกร่อน[8]

แหล่งกำเนิดของสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ของโลหะภายใต้สภาวะการกัดกร่อนระหว่างสารละลายกับวัสดุสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น การชนจากการไหลของสารละลายที่ผิวหน้าวัสดุ หรือ สัญญาณทางไฟฟ้าที่เป็นตัวเร่งให้เกิดการกัดกร่อน แต่โดยทั่วไปมีการยอมรับว่าแหล่งกำเนิดจะเกิดจากปรากฏการณ์ต่างๆ คือ 1. การหลุดและการแตกของฟองก๊าซ ฟองก๊าซจะเกิดจากการทำปฏิกิริยาของโลหะและสารละลาย ฟองที่เกิดขึ้นได้ของเหลวบริเวณสัมผัสเนื้อโลหะจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนไหวจากการสั่นสะเทือนบนผิวหน้าระหว่างของเหลวและโลหะ ทำให้อนุภาคโลหะค่อยๆ เชื้อหลุดจากบริเวณผิว ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นนี้จะผ่านไปสู่วิวเนื้อวัสดุ เมื่อฟิล์มเกิดการแตกผิวหน้าของวัสดุจะเกิดการเคลื่อนไหวที่ซับซ้อนมาจากแรงที่กระทำและจะส่งสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ออกมาทำให้ตรวจจับได้ จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้มาทำการวิเคราะห์ต่อไป ซึ่งจากการวิเคราะห์นั้นสามารถบอกได้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างเกิดการกัดกร่อน กับค่าตัวแปรทางสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ที่เกี่ยวข้องได้ 2.การเคลื่อนตัวของเนื้อโลหะที่เกิดจากการกัดกร่อน เมื่อโลหะทำปฏิกิริยากับสารละลาย จะทำให้โลหะเกิดการสูญเสียเนื้อของโลหะเกิดขึ้น ซึ่งจะหลุดตัวออกมาจากโลหะเป็นเศษผง การหลุดตัวออกมานั้นจะทำให้เกิดสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์เกิดขึ้น

3.วิธีการทดลอง

การทดลองจะแบ่งออก 2 ขั้นตอน คือ

3.1 การทดลองหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน เพื่อนำไปควบคุมการกัดกร่อนด้วยเครื่องควบคุมการกัดกร่อนด้วยไฟฟ้าในการทดลองต่อไป

3.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางอะคูสติกอิมพัลส์ กับ อัตราการกัดกร่อนของวัสดุ

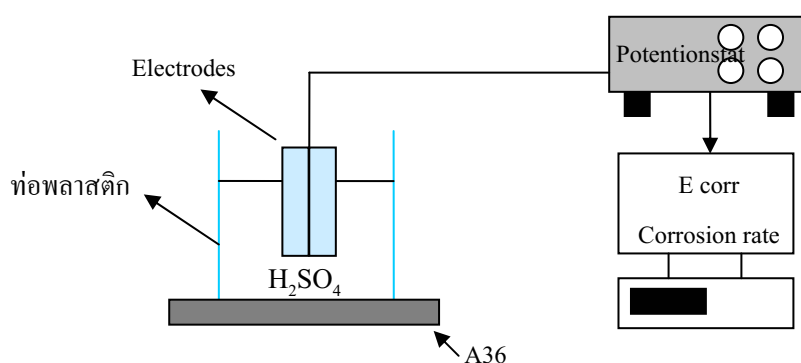
3.1 การทดลองหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน

การทดลองใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเกรด A 36 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด A 36 ที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมลวดหุ้มฟลักซ์ โดยการเชื่อมใช้ลวดเชื่อมชนิด E7016 ซึ่งงานมีขนาด $5 \times 5 \times 0.5$ เซนติเมตร และผ่านการเตรียมผิวชิ้นงานโดยการขัดด้วยกระดาษน้ำเบอร์ 180,1000 และ 1200 นำชิ้นงานนั้นติดไว้ที่ ปลายท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.4 เซนติเมตร สูง 9 เซนติเมตร ภายในบรรจุสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีค่าความเป็นกรด ต่างๆ กัน 4 ระดับ คือ 4.5 5 5.5 และ 6 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อน กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อน และ อัตราการกัดกร่อนของวัสดุ การบันทึกและประมวลผลใช้ เครื่องควบคุมการกัดกร่อนด้วยไฟฟ้า (Potentionstat Solarton รุ่น 1284) แสดงดังรูปที่ 2.

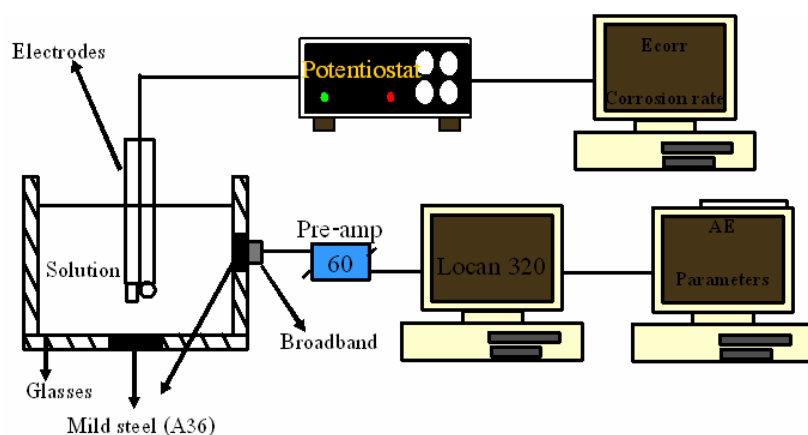
3.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางอะคูสติกอิมพัลส์กับอัตราการกัดกร่อน

การทดลองใช้เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด A 36 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำชนิด A 36 ที่ผ่านการเชื่อมด้วยกระบวนการเชื่อมลวดหุ้มฟลักซ์ โดยการเชื่อมใช้ลวดเชื่อมชนิด E7016 ซึ่งผ่านการเตรียมผิวหน้าดังเช่นที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.1 นำชิ้นงานนั้นติดไว้ตรงตำแหน่งพื้นถึงจำลองที่มีขนาด $30 \times 50 \times 30$ เซนติเมตร ที่ทำจากกระจกใส ซึ่งเจาะรูวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของพื้นและกึ่งกลางผนังของถังจำลอง สารละลายคือกรดซัลฟูริกที่มีค่าความเป็นกรดต่างๆ กัน 4 ระดับคือตั้งแต่ ค่าความเป็นกรด 4.5 ถึง ค่าความเป็นกรด 6 โดยปรับค่าความเป็นกรดช่วงละ 0.5 คือ 4.5 , 5 , 5.5 และ 6 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในถังจำลองการทดลอง ในขณะที่ทำการทดลองได้

ควบคุมอัตราการกัดกร่อนให้คงที่ด้วยเครื่องควบคุมการกัดกร่อนด้วยไฟฟ้า โดยตั้งค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนมีค่าเท่ากับค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อน แต่ละค่าความเป็นกรดในแต่ละระดับ วัฏจักรที่ ซึ่งได้จากการทดลองที่ 3.1(แสดงในตารางที่ 1) แล้วปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง การบันทึกข้อมูลทำการบันทึกด้วยอะคูสติกอิมพัลส์ โดยติดตั้งหัวตรวจสอบอะคูสติกอิมพัลส์ชนิด Broad Band ซึ่งจะสามารถรับสัญญาณในช่วงความถี่ 100 – 1,000 กิโลเฮิร์ต ไว้บนเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด A 36 ที่ผ่านการเคลือบผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อนด้านข้างถึงจำลอง โดยสัญญาณที่เข้ามาจากหัวตรวจสอบจะถูกทำการขยายสัญญาณด้วยอุปกรณ์ขยายสัญญาณเบื้องต้น(Pre-amplifier) ซึ่งจะตั้งค่าการขยายสัญญาณไว้ที่ 60 dB และจะวิเคราะห์ประมวลผลบันทึกพารามิเตอร์ต่างๆทางอะคูสติกอิมพัลส์ด้วย เครื่อง AE Location Analyzer 320(LOCAN 320) โดยจะตั้งขีดเริ่มเปลี่ยน(Threshold) ไว้ที่ 45 dB การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3.



รูปที่ 2. การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อน ค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน



รูปที่ 3. การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองหาความสัมพันธ์ของสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์กับการกัดกร่อนในระดับอัตราการกัดกร่อนต่างๆ

4.ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองการหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อน ค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนกับระดับค่าความเป็นกรดของกรดซัลฟิวริก

จากการทดลองที่ 3.1 จะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อน ค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อน แล้วนำไปคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อนโดยใช้สมการที่ 2.1 ของแต่ละระดับค่าความเป็นกรดของกรดซัลฟูริกกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด A36 และเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เกรด A36 ที่ผ่านการเชื่อมได้ดังตารางที่ 1.

ตารางที่ 1. ผลการทดลองหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อน กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อน จากการกัดกร่อนบนวัสดุทดสอบ

ผลการทดลองหาค่า E corr I corr และ Corrosion rateของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกับกรด H ₂ SO ₄			
pH	E corr(Volts)	I corr(amp/cm ²)	Corrsion rate(mm / year)
pH 4.5	-0.47577	3.64E-05	0.0625
pH 5	-0.5613	1.15E-05	0.0504
pH 5.5	-0.43673	8.66 E-06	0.0432
pH 6	-0.48579	1.27E-06	0.0292
Weldment pH 5	-0.47319	5.17E-05	0.06

จากตารางที่1. พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนค่าความเป็นกรดของกรดซัลฟูริกค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อนจะเปลี่ยนแปลงไป ค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของการกัดกร่อนบนวัสดุทดสอบ จะลดลงเมื่อค่าความเป็นกรดของกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้น และเมื่อวัสดุทดสอบต่างชนิดค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อนเปลี่ยนแปลงไปด้วย ค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อนของวัสดุทดสอบที่ผ่านการเชื่อมจะมีค่าที่สูงกว่าวัสดุทดสอบ และอัตราการกัดกร่อนของวัสดุทดสอบที่ผ่านการเชื่อมจะมีค่าที่สูงกว่าวัสดุทดสอบ เนื่องจากวัสดุที่ผ่านการเชื่อมซึ่งจะมีโครงสร้างเป็น มาเทนไซด์ โครงสร้างทางจุลภาคประเภทนี้จะส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนของการกัดกร่อนบนวัสดุสูงขึ้น

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางอะคูสติคิมิซันกับการกัดกร่อนในระดับอัตราการกัดกร่อนต่างๆ

ผลของการวิจัยในส่วนนี้จะเป็นผลการทดลองที่ 3.2 ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

4.2.1 ผลการวิจัยทางตัวแปรทางการกัดกร่อน

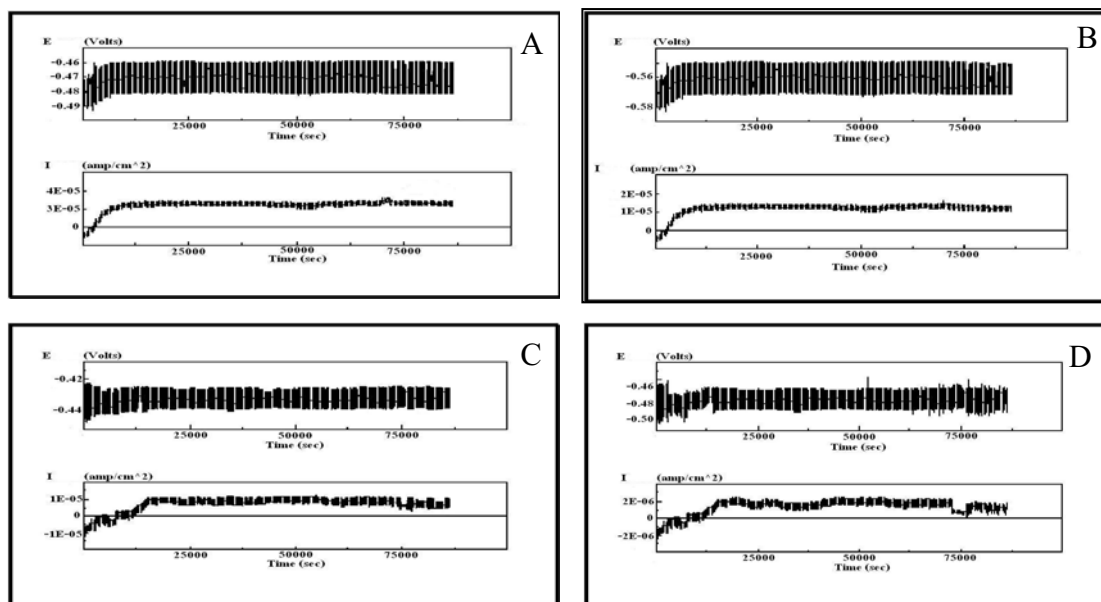
4.2.2 ผลการวิจัยหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางสัญญาณอะคูสติคิมิซันกับอัตราการกัดกร่อน

4.2.3 ผลการวิจัยการเปรียบเทียบสัญญาณอะคูสติคิมิซันที่ตรวจจับได้จากการกัดกร่อนบนวัสดุต่างชนิด

4.2.1 ผลการวิจัยทางตัวแปรทางการกัดกร่อน

ผลการวิจัย ในด้านการกัดกร่อนด้วยการปรับค่าความเป็นกรดของกรดซัลฟูริก เท่ากับ 4.5 5 5.5 และ 6 ที่เกิดขึ้นตลอดการทดลองเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไม่มีเกิดฟองก๊าซเกิดขึ้นในระบบการทดลอง ลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในการทดลองบนวัสดุทดสอบเป็นการกัดกร่อนแบบยูนิฟอร์ม ลักษณะทางกายภาพผิวของวัสดุทดสอบที่ผ่านการทดลองมีสีน้ำตาลแดงปนสีดำ เมื่อนำข้อมูลทางด้านการกัดกร่อนที่ได้จากการทดลอง ทำการประมวลผลโดยโปรแกรมประมวลผลตัวแปรทางการกัดกร่อน จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อนกับเวลา และ

กระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนกับเวลา ดังรูปที่ 4. แสดง ผลการทดลองกรดซัลฟูริกที่มีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 4.5 5.5 และ 6 ตามลำดับ ดังนี้

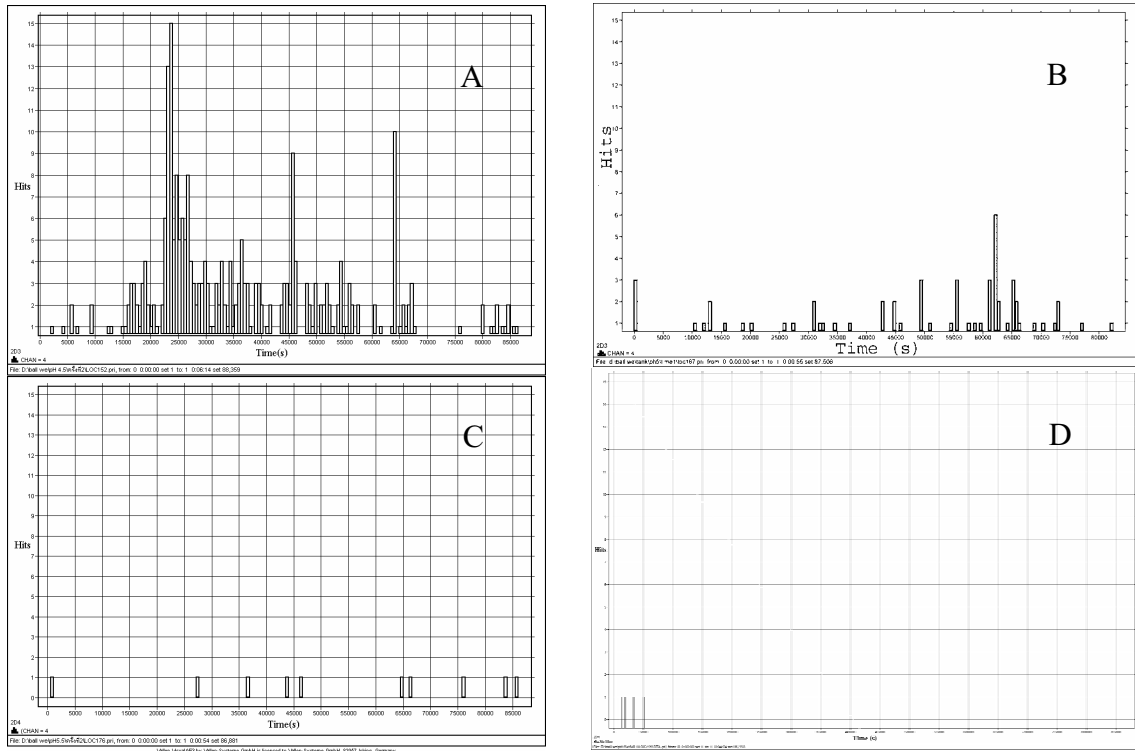


รูปที่ 4. กราฟศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเทียบกับเวลาและค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนเทียบกับเวลาของการทดลอง โดยใช้กรดซัลฟูริกที่มีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 4.5(A) 5(B) 5.5(C) และ 6(D)

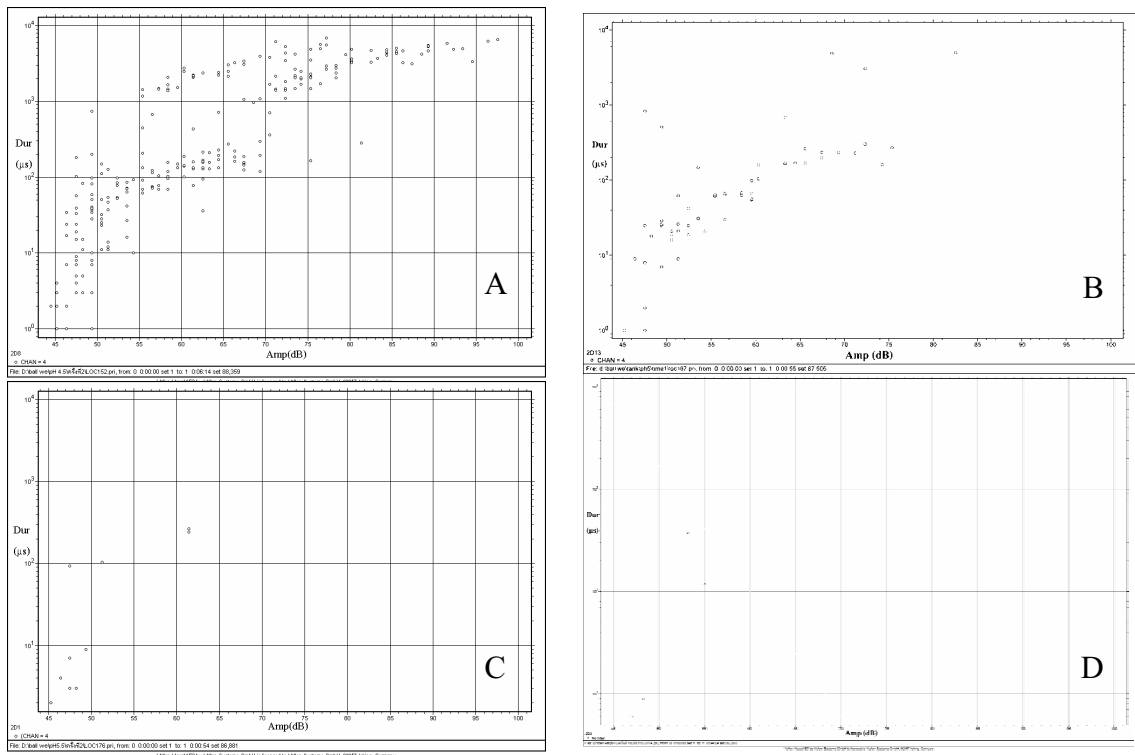
จากการทดลองพบว่าข้อมูลจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรก ช่วงเวลา 0 – 20,000 วินาที ค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า เมื่อเทียบช่วงเวลานี้กับการกัดกร่อน พบว่าเป็นช่วงที่พาสซีฟฟิล์ม ของวัสดุทดสอบแตกตัว ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนและค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนเกิดการแกว่งตัว ซึ่งส่งผลต่ออัตราการกัดกร่อนจะไม่คงที่เช่นกัน และส่วนที่ 2 ช่วงเวลา 20,000 วินาที จนครบเวลาการทดลอง ค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน จะลู่เข้าสู่ค่าคงที่ พบว่าจะลู่เข้าสู่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อนและค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกัดกร่อน ซึ่งจะได้อัตราการกัดกร่อนเท่ากับผลการทดลองที่ 4.1 (ตารางที่ 1.) เมื่อค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนคงที่ ก็จะทำการหาอัตราการกัดกร่อนคงที่ด้วย ซึ่งส่วนที่ 2 นี้ จะเป็นช่วงเวลาที่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับตัวแปรทางสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ ในการวิเคราะห์ผลขั้นต่อไป

4.2.2 ผลการวิจัยหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์กับอัตราการกัดกร่อน

จากการทดลองพบว่าเมื่ออัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น (ค่าความเป็นกรดของกรดซัลฟูริกทดลอง) สัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ที่ตรวจจับได้จะมีพารามิเตอร์ทางสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ ที่เพิ่มขึ้นด้วย แต่พารามิเตอร์ทางสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์บางตัวแปรไม่สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ในการทดลองได้ ดังนั้นในการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้ จะเลือกพารามิเตอร์สัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ ที่สามารถสร้างความสัมพันธ์กับอัตราการกัดกร่อนได้ ดังรูปที่ 5.1 และ 5.2 เป็นตัวอย่างพารามิเตอร์ทางสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ที่มีแนวโน้มมีความสัมพันธ์ทางสมการคณิตศาสตร์กับอัตราการกัดกร่อน



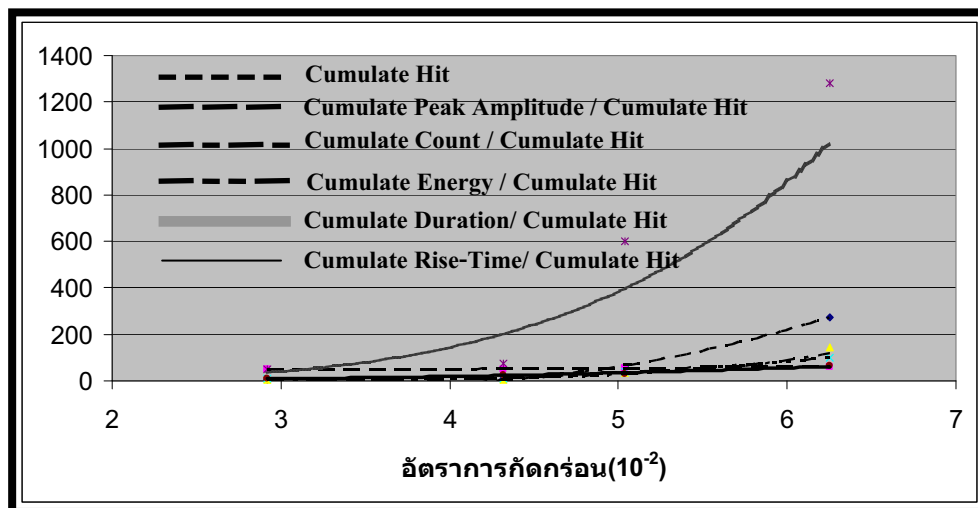
รูปที่ 5.1 พารามิเตอร์ฮิตเทียบกับเวลาที่ได้จากการทดลอง
โดยใช้กรดซัลฟูริกที่มีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 4.5(A) 5(B) 5.5(C) และ 6(D)



รูปที่ 5.2 พารามิเตอร์แอมพลิจูดเทียบกับพารามิเตอร์ดูเรชั่นที่ได้จากการทดลอง
โดยใช้กรดซัลฟูริกที่มีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 4.5(A) 5(B) 5.5(C) และ 6(D)

จากรูปที่ 5.1 และ 5.2 เมื่อค่าความเป็นกรดของกรดซัลฟูริกลดลง พารามิเตอร์ทางสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์จะแนวโน้มมีค่าที่เพิ่มขึ้นทั้งพารามิเตอร์ฮิต แอมพลิจูด และดูเรชั่น

เมื่อนำพารามิเตอร์ทางสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ต่าง ๆ ที่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรดของกรดซัลฟูริกลดลงที่ได้จากการทดลองของแต่ละการทดลอง มาสร้างความสัมพันธ์กับอัตราการกัดกร่อนของแต่ละค่าความเป็นกรดของกรดซัลฟูริกที่ได้จากการทดลองที่ 3.1 โดยใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ ได้ดังรูปที่ 6.



รูปที่ 6. ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์กับอัตราการกัดกร่อนของวัสดุ

จากรูปที่ 6. เมื่อสร้างเส้นแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ต่าง ๆ กับอัตราการกัดกร่อนแล้ว จากนั้นนำเข้าสู่โปรแกรมคำนวณทางสถิติ เพื่อสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์กับอัตราการกัดกร่อนของวัสดุ โดยการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์นี้จะสร้างสมการที่มีความเชื่อมั่นมากกว่า 90% ขึ้นไป ซึ่งได้ทางสมการคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\text{จำนวนสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์รวม} = 6.0397(\text{อัตราการกัดกร่อน})^2 - 38.473(\text{อัตราการกัดกร่อน}) + 62.546$$

$$\begin{aligned} \text{แอมพลิจูดสูงสุดรวมต่อจำนวนสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์รวม} &= -3.6416(\text{อัตราการกัดกร่อน})^2 \\ &+ 44.006(\text{อัตราการกัดกร่อน}) - 72.721 \end{aligned}$$

$$\text{ตัวแปรเคาท์รวมต่อจำนวนสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์รวม} = 0.0122 e^{1.4816(\text{อัตราการกัดกร่อน})}$$

$$\begin{aligned} \text{ตัวแปรพลังงานรวมต่อจำนวนสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์รวม} &= 9.1284(\text{อัตราการกัดกร่อน})^2 \\ &- 60.374(\text{อัตราการกัดกร่อน}) + 102.35 \end{aligned}$$

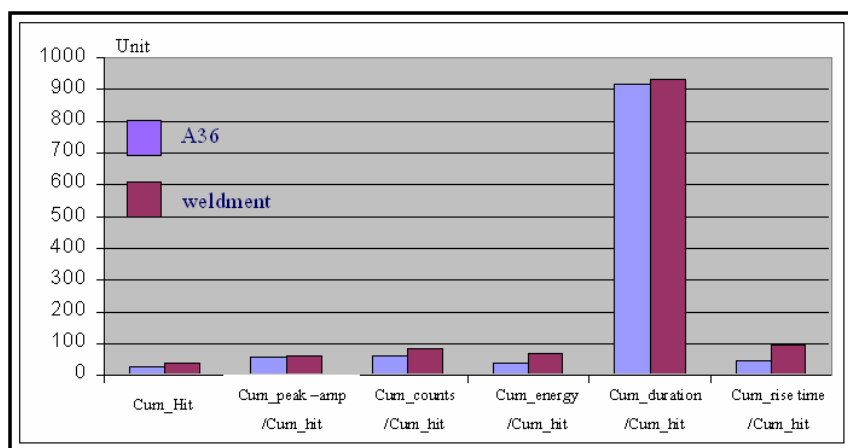
$$\text{ตัวแปรดูเรชั่นรวมต่อจำนวนสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์รวม} = 0.0022(\text{อัตราการกัดกร่อน})^{7.4028}$$

$$\text{ตัวแปรไรท์ไทม์รวมต่อจำนวนสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์รวม} = 0.0418(\text{อัตราการกัดกร่อน})^{4.1208}$$

4.2.3 ผลการวิจัยการเปรียบเทียบสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ที่ตรวจจับได้จากการกัดกร่อนบนวัสดุทดสอบและรอยเชื่อม

เมื่อนำพารามิเตอร์ทางสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ ที่ตรวจจับได้จากการกัดกร่อนบนวัสดุทดสอบโดยค่าความเป็นกรดของกรดซัลฟูริกเท่ากับ 5 และพารามิเตอร์ทางสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ ที่ตรวจจับได้จากการกัดกร่อนบนวัสดุทดสอบที่

ผ่านการเชื่อมโดยค่าความเป็นกรดของกรดซัลฟูริกเท่ากับ 5 เปรียบเทียบดังรูปที่ 7. พบว่าพารามิเตอร์ทางสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ที่ตรวจจับได้นั้นมีจำนวนที่แตกต่างกัน โดยที่การกัดกร่อนวัสดุที่ผ่านการเชื่อมโดยใช้ซัลฟูริกที่มีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 5 จะตรวจจับพารามิเตอร์ทางสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ได้เป็นจำนวนที่มากกว่าการกัดกร่อนบนวัสดุทดสอบ



รูปที่ 7. การเปรียบเทียบสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ที่ตรวจจับได้จากการกัดกร่อนบนวัสดุต่างชนิด

ผลจากการวิจัยนี้จะเป็นการยืนยัน การวิเคราะห์ผลการวิจัยว่าเมื่ออัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นลักษณะสัญญาณทางอะคูสติกอิมพัลส์ที่ตรวจจับได้จะมีลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ที่ตรวจจับได้จากการกัดกร่อนจะขึ้นอยู่กับอัตราการกัดกร่อนบนพื้นผิววัสดุ

5.สรุป

จากการวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1.การตรวจสอบโดยไม่ทำลายด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ สามารถตรวจสอบการกัดกร่อนแบบยูนิฟอร์มได้
- 2.สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ กับอัตราการกัดกร่อนและสามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์
- 3.การตรวจสอบโดยไม่ทำลายด้วยวิธีอะคูสติกอิมพัลส์สามารถทำนายอัตราการกัดกร่อนของการกัดกร่อนแบบยูนิฟอร์มได้
- 4.พารามิเตอร์ทางสัญญาณอะคูสติกอิมพัลส์ที่ตรวจจับได้จากการกัดกร่อนแบบยูนิฟอร์มจะขึ้นอยู่กับอัตราการกัดกร่อนของการกัดกร่อนแบบยูนิฟอร์มที่เกิดขึ้นบนวัสดุ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และ นายเฉลิมเกียรติ จิระรุ่งเสถียร นักวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับคำปรึกษา แนะนำและเสนอแนะแนวคิดเห็นในการทำวิจัยฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

7.เอกสารอ้างอิง

- [1] J Dimopoulos ATTAR , Acoustic Emission as a Corrosion Monitoring Tool for Above Ground Storage Tanks , Corrosion Control and NDT-2003 ; 037.
- [2]. Frederic Ferrer,Thierry,Faure,Jean Goudiakas,Eric Andres, Acoustic emission study of active-passive transitions during carbon steel erosion-corrosion in concentrated sulfuric acid ,Corrosion Science 44 , 2002 ;1529-1540
- [3] เฉลิมเกียรติ จิระรุ่งเสถียร , อาษา ประทีปเสน และ พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข. การตรวจจับการกัดกร่อนด้วยอะคูสติกอิมิชัน, การประชุมวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแห่งประเทศไทย ,2545 ; 152 – 154
- [4] Rong, S. G., Corrosion-related Acoustic Emission and Its Identification, *10th APCNDT* BRISBANE 2001
- [5] Retting,TW,Acoustic Emission Method for Monitoring Corrosion Reactions,Corrosion,32(4), 1976;121-126
- [6] Phillip T. Cole, Stephen N. Gautrey , Development History of the Tankpac AE Tank Floor Corrosion Test., NDT.net ,September 2002;Vol 7.No 09 .
- [7] Jones, D. A.. Principles and Prevention of Corrosion , 2nd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ ,1996
- [8] F.Bellenger ,H.Mazille , H.Idrissi , Use of acoustic emission technique for the early detection of aluminium alloys exfoliation corrosion, NDT&E International 35,2002 ;385-392

ภาคผนวก จ

A Study on Source Location Using an Acoustic Emission System for Various Corrosion Types

C. Jomdecha¹, A. Prateepasen¹ and P. Kaewtrakulpong²

¹Department of Production Engineering

²Department of Control system and Instrumentation Engineering

King Mongkut's University of Technology Thonburi

126 Prachautid, Bangmod, Toongkru, Bangkok, Thailand 10140.

ABSTRACT

In this paper, four main types of corrosion; uniform, pitting, crevice and stress corrosion cracking (SCC) found in petrochemical industry were characterized and identified by Acoustic Emission (AE) analysis using their locations and extracted AE parameters. A novel low-cost AE location system based on an FPGA-PC and a LOCAN 320 AE analyzer were utilized in this study. Specimens used in experiments were austenitic stainless steel SS304. Pattern of AE signals from each type of corrosions was plotted using their locations and correlations. Experimental results show the ability of our FPGA-PC system to locate corrosion locations. The correlations of AE parameters including amplitude, count, hit and time were used to identify different types of corrosions. In addition, the characteristic of corrosion process for each type is explained using the obtained AE signals corresponding to the source locations, together with experimental observation.

Keyword: Acoustic emission, corrosion, FPGA-PC, location.

INTRODUCTION

In several industries especially petrochemicals, corrosion is one of the main causes of catastrophes to their structures and components. They are frequently found in hazardous zones where structures or components in an unventilated area bear heavy loads. Storage tanks, pressure vessels and pipes are gradually corroded by chemical or

electrochemical reactions within its environment. Main types of corrosion frequently found are pitting and uniform corrosions; however, crevice and stress corrosion cracking are also highly concerned. Hence, periodically inspections are necessary to prevent the destruction from corrosion. Several conventional Non-destructive testing techniques such as Electromagnetic Test have been applied to locate and determine its severity. However, these techniques require a great deal of process disruption and preparation, for example, drainage of material from inspection specimens.

Acoustic Emission (AE) inspection has been introduced to the problem and gained popularity thank to its real time response. AE allows contiguous monitoring of the inspection area without process interruption. Since low-level elastic waves is generated within material throughout corrosion process, the AE can be applied to detect and monitor the corrosion [1, 2]. The AE activity from the corrosion source was explained by several assumptions such as the hydrogen bubbles nucleation, evolution of hydrogen bubbles closed to the pits and damage of specimen in pitting corrosion.

For locating corrosions, the AE signals, obtained from a suitable transducer array using proprietary equipment and techniques [3-5], are analyzed to locate the corrosion source. Typically, the techniques to operate equipment and array of the AE sensors are proprietary. A number of location data from detected AE activities were used to infer the relative severity of corrosion.

However, the corrosion mechanism and the detection of various corrosion types were not clearly identified. At the present, a number of researches have been done in the area of detecting and classifying severity levels of corrosion detected by AE inspection. Uniform and pitting types of corrosion are the main subjects of these works [6, 7]; however, other types of dangerous corrosion such as crevice and stress corrosion cracking are not often considered [8, 9]. The reason is probably that the characteristics of these corrosions detected by NDE techniques are still unclear.

Consequently, this paper presents a study on determining location and type of corrosion cracking by AE. AISI304 austenitic stainless steel is selected as material in this work. Corrosive solution and electrochemical method is used to control corrosion processes. A novel low-cost AE source-location system using an FPGA-PC configuration have been constructed and employed to detect weak AE signals generated from corrosion sources. A Field Programmable Gate Array (FPGA) was designed to determine the arrival time difference with a high speed

counter. The AE instrument LOCAN320 was used to analyze and store the AE parameters. Two dimension technique of arrival time difference was use to locate and hit time of AE using our system. Correlations of analyzed AE parameters were utilized to describe the corrosion characters and their mechanism patterns. Measurement data were transmitted to PC for analyzing the corrosion source locations and number of hits.

THEORY

Corrosion returns the metal to its combined state in chemical compounds that are similar to the minerals of extracted metals. Thus, corrosion has been called *extractive metallurgy in reverse* and, all aqueous corrosion reactions are considered to be electrochemical. Most reactions involve water in either liquid or condensed vapor forms. The reaction that produced corrosion is depicted in Figure 1.

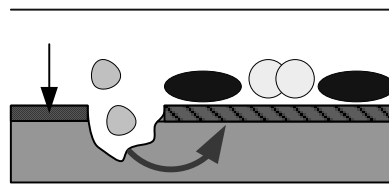
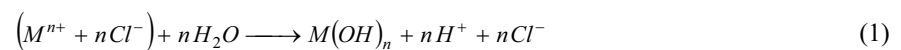


Figure 1 Corrosion mechanism

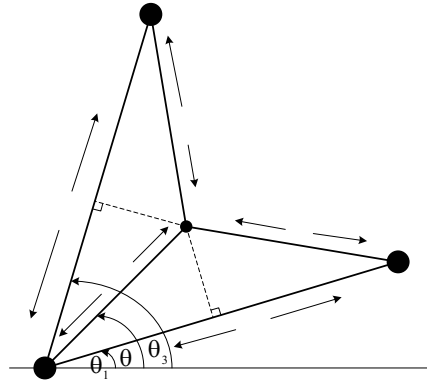
From Figure 1, Anodic reaction is the dissolution of metallic ions through the passive film, and Cathodic reaction is involved the dissolved oxygen whereas M indicates the metal. In a chloride-containing medium, the metallic ions reaction is represented by



where n is the valency of the dissolved ions. Chromium ions are presented in the stainless steel ($M^{n+} = Cr^{+++}$).

Since various AE signals are generated throughout the corrosion process. AE activity from corrosion sources was reported with many assumptions such as the hydrogen bubbles nucleation, evolution of hydrogen near pits, damage of material in pitting corrosion mechanism etc. The detected AE parameters of corrosion were analyzed using several relations and reported that the AE signals could be divided into two groups, signals generated from corrosion and from non-corrosion. Examples of the later are movement of hydrogen bubbles and the stress applied to specimen in case of SCC.

Two-dimensional data of AE events, assumed extensively in the work on non-geologic structures, was utilized. In this model, three sensors mounted on an infinite plane are presumed to simplify the situation. The velocity of the wave in the material, V is assumed constant. A general arrangement is illustrated in Figure 2



In Figure 2, the distance and angle of the AE source from sensor 1 can be determined by solving the following set of equations [12]

$$R = \frac{1}{2} \frac{D_2^2 - \Delta t_2^2 V^2}{\Delta t_2 V + D_2 \cos(\theta_3 - \theta_0)}, \text{ and } R = \frac{1}{2} \frac{D_1^2 - \Delta t_1^2 V^2}{\Delta t_1 V + D_1 \cos(\theta_0 - \theta_1)} \quad (2)$$

where Δt_1 and Δt_2 are time differences between sensors 1&2 and 1&3 respectively.

The time difference parameters can be obtained by simple thresholding or cross-correlation techniques. Solving the set of equations gives the location of the source in a polar form (R, θ) as illustrated in Figure 2.

MATERIALS AND METHODS

In our experiment, locations of uniform, pitting, crevice and SCC on AISI304 austenitic stainless steel were estimated by an AE system. The thickness of specimen is 1 mm prepared by wet grinding using a series of silicon carbide sheets of up to 1200 grit, then rinsed with distilled water and dried in cool air.

The position and dimension of each corrosion source is illustrated in Figure 2(a). The experiment to produce each type of corrosion mentioned above was performed separately. AE sensors used to capture AE signals were type R15 transducers with a resonance frequency at 150 kHz. Locations were computed by FPGA-PC and AE parameters were determined using the LOCAN 320.

Corrosion Generation

Uniform Corrosion

High chloride concentration and strong acidic solutions were used as corrosive environment to produce the uniform corrosion. The corrosive environment was a 30% NaCl solution with pH controlled at level of one. HCL was used to control the pH and to accelerate hydrogen bubble nucleation in stable state of the destroyed passive films and concentration solution. The solution was placed in a plastic cylinder tube of diameter of 4.3 cm. on the active AE sensors array zone as shown in Figure 2(a).

Pitting and Crevice Corrosion

For both pitting and crevice corrosions, the electrochemical environment was a 3% NaCl solution with pH at level of two to facilitate pitting corrosion mechanism. Pitting potential (E_{pit}) was controlled electrochemically by a potentiostat (Solartron 1284) for accelerating pitting corrosion.

For crevice, a special container was used to carry the solution that contained the corrosion occurrences within the edge of the container. A little gap inside the edge was made to set up an unventilated area.

The different between pitting and crevice is that the crevice corrosion particularly occurs at the unventilated area of the specimen.

Stress Corrosion Cracking (SCC)

For SCC, stress corrosion on a three-point loading bent-beam was utilized to produce tensile stress on the specimen according to the ASTM G39-90 (Reapproved 1994) standard. The elastic stress at the midpoint of specimen can be calculated from

$$\sigma = 6Ety / H^2 \quad (3)$$

where σ is the maximum tensile stress, E the modulus of elasticity, t the thickness of specimen, y the maximum deflection, and H the distance between outer supports.

The specimen was dipped into the 3%NaCl electrochemical solution with pH of two. The potentiostat was used to accelerate the corrosion process. The method to produce SCC and its experimental set-up is shown in Figure 2(b).

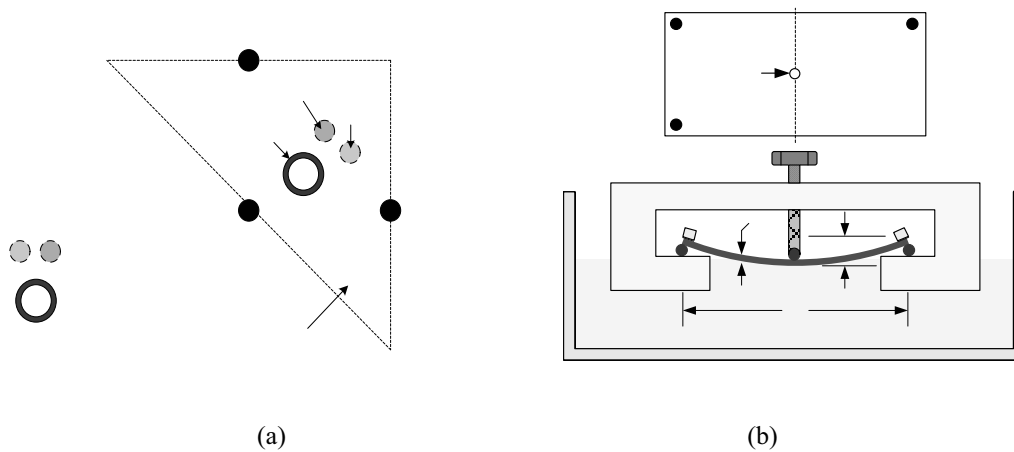


Figure 2, position of producing (a) uniform, pitting and crevice; (b) stress corrosion cracking.

AE systems

For the AE source location system, an FPGA-PC system was utilized to calculate arrival time difference from signals received from an array of three AE sensors on the specimen. The system consists of AE sensors, pre-amplifiers, signal conditioning unit, FPGA module, PC and LOCAN320 AE analyzer. Two-dimensional or planar representation was used to demonstrate the results of corrosion locations. Figure 3 is illustrated the diagram of experimental set up for corrosion source localization.

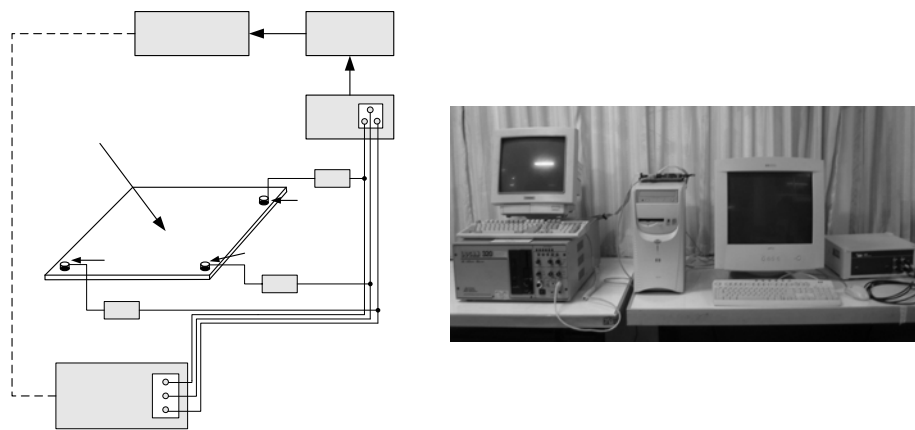


Fig.3 Three AE sensors array of source location technique and the system

The FPGA was designed as multi-channel high speed counters with a serial communication using VHDL (Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language). When all AE sensors are triggered, the counting data from the FPGA-based electronic front-end will be sent to the PC via an RS-232 port. The FPGA was operated at approximately 30 millisecond per cycle. The PC was employed for analyzing the arrival time differences of sensors and finally, the coordinate of corrosion can be estimated.

RESULTS AND DISCUSSION

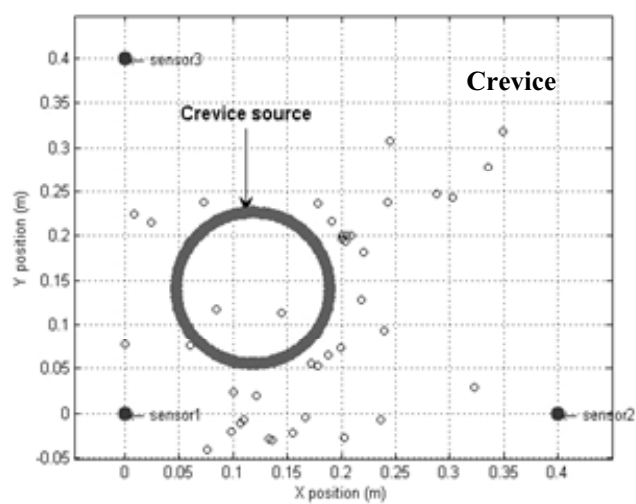
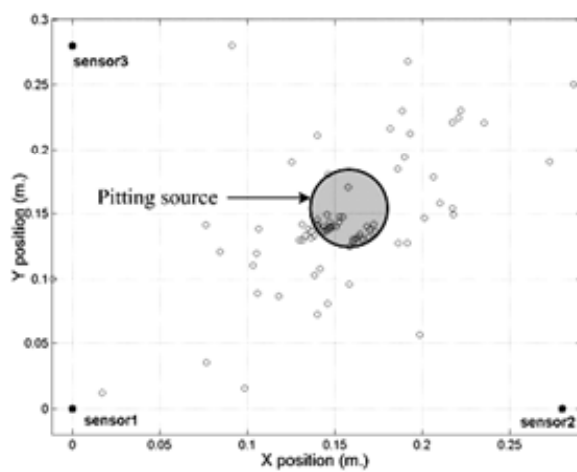
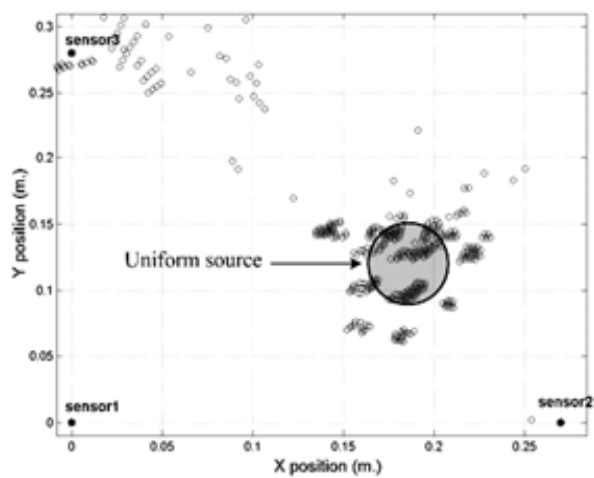
The experimental results of the study on various types of corrosion show correlations of AE parameters to their source location. Locations, count VS amplitude, hit VS amplitude, hit VS time and cumulative count VS time are the features used to explain different corrosion types and their mechanisms.

Location

Locations of each corrosion type were illustrated in Fig. 4. A large amount of the uniform corrosions (93.7%) detected by our system were grouped in the actual area. Their locations are not located inside the uniform source perfectly but show some clusters spreading around the region of uniform source (6.3%). This could be caused by groups of hydrogen bubble breaking in the acid solution. The other reason is possibly the combination of interference and ambiguity.

The locations of pitting and crevice were spread around in the region of the corrosion sources. Fewer signals could be detected in comparison to that of uniform corrosion. This may be caused by the distance between sensors and the high corrosion source was extended to reduce AE signal from bubble around the electrode. The attenuation of complex wave propagation paths, generated from the corroded pits, caused some dislocation of the detected corrosion. It should be noted that the amount of data obtained from crevice corrosion were much smaller than that of the pitting due to limited corrosion area around the edge of the container.

For the SCC, the result shows accurate locations of corrosion occurrences at the middle of the specimen where the stress was applied. Some corrosion points were detected at the downside area close to sensors 2 and 3. These might be affected by asymmetric bending during stress application, and Hit Lock out Time (HLT) error in the system.



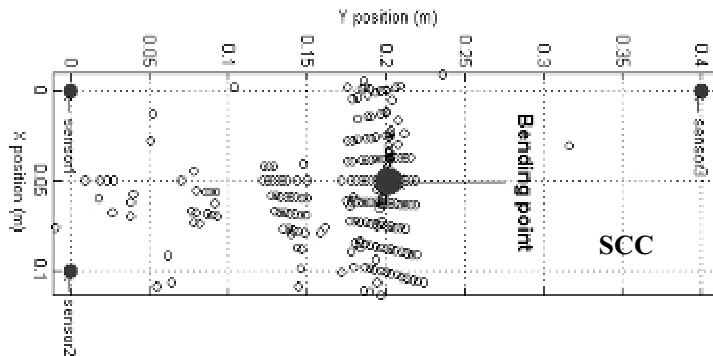


Figure 4. Location results and their characters of uniform, pitting, crevice and SCC respectively.

AE parameters analysis

Count VS Amplitude

The correlation of AE parameters between count and amplitude is illustrated in Figure 5. AE signals generated from the uniform corrosion in Figure 5a grouped around actual positions of the corrosion source. The signals revealed a large amount of data with high amplitude (between 45 to 63 dB) and the number of counts not exceeding 500. Some counts were over 500 with amplitudes higher than 63 dB, but some had high amplitudes (upto 75 dB) with fewer counts. From our observation and the theories of corrosion mechanism, AE signals were generated from breaking of numerous hydrogen bubbles which is from the consistent destroyed passive films of the material surface.

The count-amplitude relations of pitting and crevice corrosions depicted in Figure 5b and 5c have some similarity. The amount of data was less than that obtained from the uniform corrosion; however, both amplitude and count were higher. In addition, the correlation between count and amplitudes was closed to a straight line. The high amplitude and count AE data probably came from passive film breakage at the beginning of both types of corrosion processes [11]. Propagation mechanism of the pitting is the same as crevice corrosion which concentrated chloride ions (Cl^-) causes local acidification within pitting and crevice experimentation. Therefore AE parameter correlations of both corrosion types were similar in this research. However, initiation of the pitting is different from that of the

crevice. A gap between two surfaces of material is required to produce crevice; nevertheless, pitting has no geometrical requirement.

For SCC in Figure 5d, a large amount data also shows an approximately linear relation between count and amplitude. The highest number of counts reached 700 and amplitudes were up to 100 dB. The amounts of high AE amplitude may be caused by cracks creeping and applied stress.

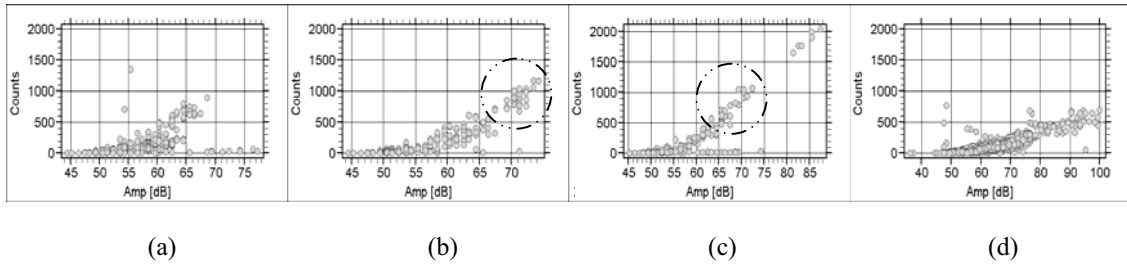


Figure 5. Count-amplitude correlation of (a) uniform, (b) pitting, (c) crevice and (d) SCC

Hits VS Amplitudes

AE hit and amplitude relations of the four corrosion types are shown in Figure 6. The correlation of the uniform type in Figure 6a shows a large portion of hits within amplitudes ranging from 45 to 65 dB. The amplitude distribution was similar to a Normal distribution with the highest hit at the amplitude of 53 dB. The distributions of pitting and crevice bear similarity having a small hit quantity and wide amplitude range as shown in Figure 6b and 6c. The hits are not exceeded 60 at all values of amplitude with the highest hits at 48 dB for both types of corrosion. Their distributions spread in the range of 45 to 75 dB for pitting, and 45 to 85 dB for crevice. In Figure 6d, the SCC type shows a characteristic of very high hits at amplitude around 48 dB and an exponential decrease at higher amplitudes.

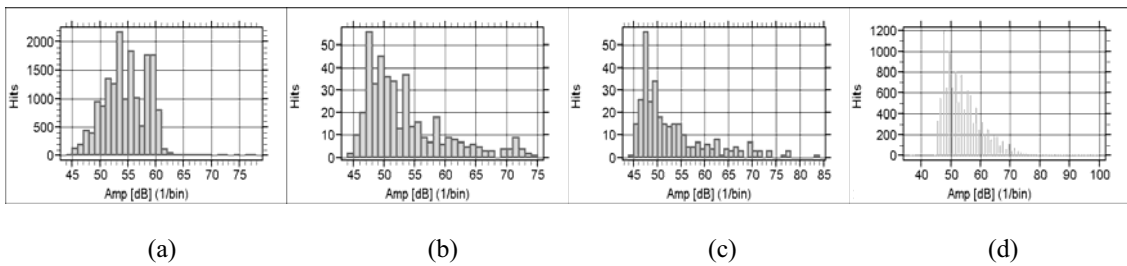


Figure 6. Hit-amplitude correlation of (a) uniform, (b) pitting, (c) crevice and (d) SCC

Hits VS Time

The analysis of data shows a great number of hits from the uniform corrosion at the first four hours then decreasing significantly as shown in Figure 7a. Since uniform corrosion occurs throughout the surface of material by the high chloride concentration and strong acidic solution, the decrease at the end may be due to the fall of solution concentration. For the result of pitting corrosion as shown Figure 7b, hits quantity was closed to that of the crevice depicted in Figure 7c. The hits frequently occurred at all times; however, higher numbers of hits was evident from the eighth hour to the end of the process by pit and crevice propagation. It should be noted that AE hits in the first seven hours were come from breakage of passive film and distributed throughout the period due to the large specimen area. The size of testing area is a factor affecting the electrochemical reaction and corrosion rate control. For pitting and crevice corrosion, initial corrosion is higher and quicker in a small testing area than a larger area. Thus the passive film was destroyed slowly in this work as anticipated. The AE hits of SCC illustrated in Figure 7d were very high at the beginning of the process then decreased exponentially along the time.

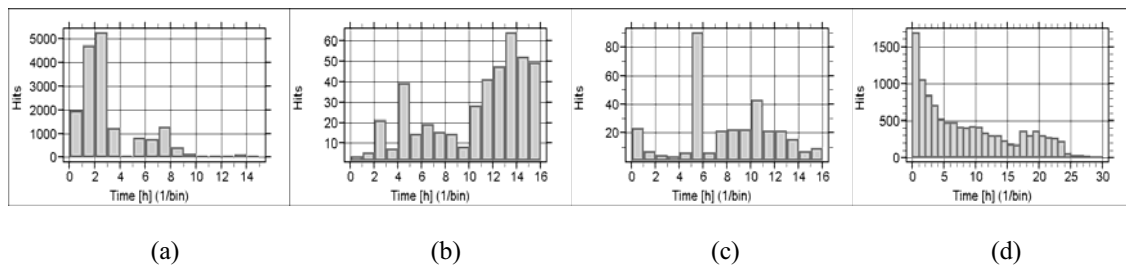


Figure 7. Hit-time correlation of (a) uniform, (b) pitting, (c) crevice and (d) SCC

Cumulative Count

The analysis of cumulative count was utilized to describe patterns of different corrosion types. The results indicate different trends for distinguishing the corrosion type as illustrated in Figure 8. The counts of uniform (Figure 8a) shows a very high count rate (of about 220,000 counts per hours) from the beginning to the fourth hour of the experiment and a rapidly decreasing rate to approximately 20,000 counts per hour after that to the end of fifteenth hour. This may be accounted for the diminishing of solution concentration as described in previous topic. The results of pitting and crevice corrosion have similar pattern as manifested in Figure 8b and 8c. It can be seen that the AE counts for both types are very low initially then rise rapidly to the end of the process. As the pitting destroys the passive film without hydrogen bubble occurrences at the beginning of the experiment, the pitting was

then formed and ran in the pitting holes. This produced AE activities continuously. For the SCC shown in Figure 8d, the rate of counts was rather constant at 16,500 counts per hour from the beginning to the twentieth hour by the constant applied stress. Then, the count rate fell quickly to the end of the experiment.

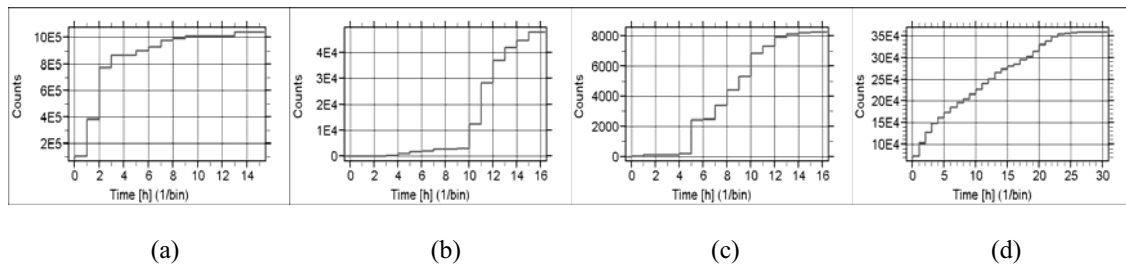


Figure 8. Count rate of (a) uniform, (b) pitting, (c) crevice and (d) SCC

From the result from the uniform corrosion experiment, a large amount of AE counts detected in the first four hours was related to the amount of bubbles generated during the process from our observation. This AE activity could be originated from the hydrogen nucleation process which is the destruction and generation of passive films on the material surface. In this period, the rate of destruction overcomes that of the generation. Another supporting assumption is that the amplitudes of bubble breaking are relatively high within a narrow range. After the period, the hits declined rapidly since the rate of passive film destruction and production are similar at this new state.

For the pitting and crevice corrosion, the AE counts were high in a wide range of amplitudes. The count rate was low in the initial period but rapidly increased in the later stage. Initially the corrosion gradually destroyed the passive film of material. After the film was destroyed, the pitting was formed and prevented the film from being built again due to the controlled environment. Pitting therefore ran in the pitting holes and produced the activity continuously.

For Stress corrosion cracking (SCC), the count rate was high and spread over a wide range of amplitudes and fell exponentially at the final stage. The SCC was produced at the middle point of the specimen dipped into the electrochemical environment. In the beginning, stress was occurred in the specimen greatly after corrosion happened then, reduced during the corrosion run. All activities were produced from the applied stress and corrosion cracking as evident from the expected locations and patterns of the corrosion. Figure 9 illustrate the results of uniform, pitting, crevice and SCC on 1 mm. thickness of SS304.

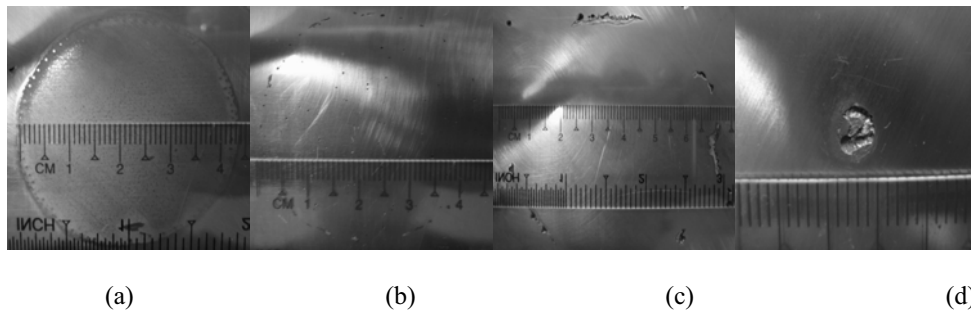


Figure 9 Results of corrosion on the SS304 specimen. (a) Uniform, (b) pitting, (c) crevice and (d) SCC.

CONCLUSIONS

A novel and low cost AE system based on FPGA-PC is proposed to detect and locate corrosion activities.

The majority of uniform corrosions were grouped in the real corrosion positions. The patterns of the correlations of AE parameters detected from corrosion were utilized to distinguish and describe the corrosion mechanism.

AE signals received from uniform corrosion were produced from hydrogen nucleation activity.

The signals appeared narrower range of amplitude than the other types of corrosion, as well as high count rate and large number of hits in the beginning of the corrosion stage.

The number of AE signals obtained from pitting and crevice corrosion is less than that from the uniform corrosion. The locations obtained by our system spread around the actual sources. Pattern of the correlations of AE parameter showed a wide range of amplitudes, high count rate in the later stage of the corrosion and a great number of hits throughout the process.

For SCC, direction of stress application on the specimen was manifested by the result of detected locations. AE signals reveal a wide range of high amplitudes (of up to 100 dB) as well as high count rate throughout the corrosion process. Numbers of hit was highest at the earlier stage then decayed exponentially.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to acknowledge “King Mongkut’s University of Technology”, “Commission on Higher Education” and “The Thailand Research Fund” for their financial support. We also would like to thank Dr. G. Lothongkum and C. Jirarungsatean for their assistance and suggestion.

REFERENCES

1. C. Jirarungsatean, A. prateepasen and P. Thungsuk, Corrosion Monitoring Using Acoustic Emission, Science & Material Technology, Thailand, 2002,2:152-154.
2. F. Bellenger, H. Mazille and H. Idrissi, Use of Acoustic Emission Technique for The Early Detection of Aluminum Alloys Exfoliation Corrosion, NDT&E International, 2002, 35:385-392.
3. P. T. Cole, S. N. Gautrey, Development History of the Tankpac AE Tank Floor Corrosion Test, NDT.net, 2002, 7(9).
4. J. D. Attar, Acoustic emission as a corrosion monitoring tool for above ground storage tanks, Corrosion Control and NDT, 2003.
5. D. Foo, J. Dimopoulos, D. Olsen et al., Application and limitations of acoustic emission (AE) testing of tank bottoms of aboveground storage tanks (ASTs), NDT AUSTRALIA-Special joint conference issue.
6. H. Idrissi, H. Mazille, L. Renaud and Y. Cetre, Initiation and Propagation Steps in Pitting Corrosion of Austenitic Stainless Steels: Monitoring by AE, Corrosion Science, 2001, 43:627-641.
7. F. Ferrer, H. Idrissi and H. Mazille, A study of abrasion-corrosion of AISI 304L austenitic stainless steel in saline solution using acoustic emission technique, NDT&E International, 2000, 33:363-371.
8. Y. P. Kim, M. Fregonese, D. Feron, et al., Ability of acoustic emission technique for detection and monitoring of crevice corrosion on 304L austenitic stainless steel, NDT&E International, 2003, 36:553-562.
9. R. Cowking and A.; Carswell, An acoustic emission study of stress corrosion cracking in GFRP: 40519 Hill, NDT & E International, 1997, 30(2).
10. A. Prateepasen, P. Kaewtrakulpong and C. Jirarungsatean, Semi-Parametric Learning for Classification of Pitting Corrosion Detected by Acoustic Emission, Key Engineering Materials, 2006 (in press).

11. A. Prateepasen, C. Jirarungsatean, and P. Tuengsook, Identification of AE Source in Corrosion Process, Key Engineering Materials, 2006, (in press).
12. R. Miller, P. McIntire, Nondestructive Testing Hand Book: Acoustic Emission Testing, 1987, 5, 2nd, p.57-59, 135-154.