

## ผลของการถ่ายเทประจุทางไฟฟ้าเคมีต่อสัญญาณอะคูสติก ในการตรวจจับการกัดกร่อนด้วยวิธีอะคูสติกอิมิชชัน

เฉลิมเกียรติ จิระรุ่งเสถียร<sup>1</sup> อาษา ประทีปเสน<sup>2</sup> และ เมธิณี มุกดาสิริ<sup>3</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

### บทคัดย่อ

กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีภายใต้สภาวะควบคุมในการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ในสารกัดกร่อน โซเดียมคลอไรด์เจือจางและปรับความเป็นกรดให้เท่ากับ 2 ได้ถูกนำมาศึกษาความสัมพันธ์ในการเกิดสัญญาณอะคูสติกอิมิชชันกับการถ่ายเทประจุไฟฟ้า ทั้งในสภาวะที่ต้านการกัดกร่อนและขณะเกิดการกัดกร่อน โดยการวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าเคมีแบบพลวัต (Potentiodynamic test) ซึ่งการวิเคราะห์โดยใช้ค่าตัวแปรทางอะคูสติกแสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของสัญญาณอะคูสติกที่มีความสัมพันธ์กับกลไกของการกัดกร่อนที่มีความแตกต่างกันของแต่ละขั้นของการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก (Pitting corrosion) ซึ่งสอดคล้องกันกับกลไกที่เกิดขึ้นจริงจากการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมี และผลการทดลองสามารถอธิบายถึงผลจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าในกระบวนการกัดกร่อนที่มีต่อการเกิดสัญญาณอะคูสติกโดยการวิเคราะห์การตรวจจับสัญญาณในช่วงเวลาการทดลอง นอกจากนี้ผลการทดลองยังเป็นการยืนยันว่าการกัดกร่อนแบบหลุมลึกสามารถตรวจจับได้ด้วยการตรวจสอบแบบอะคูสติกอิมิชชัน

**คำสำคัญ :** การกัดกร่อน / การวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมี / อะคูสติกอิมิชชัน

<sup>1</sup> นักวิจัย สำนักวิจัยและบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

<sup>2</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

<sup>3</sup> อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

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

Chalermkiat Jirarungsatian<sup>1</sup>, Asa Prateepasen<sup>2</sup>, and Medini Mukdasiri<sup>3</sup>  
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

### 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.

**Keywords :** Corrosion / Electrochemical Analysis / Acoustic Emission

---

<sup>1</sup> Researcher, Institute for Scientific and Technological Research and Services.

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Production Engineering.

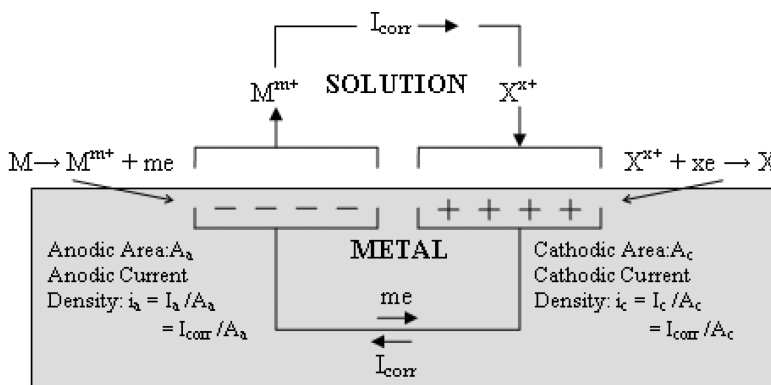
<sup>3</sup> Lecturere, Department of Production Engineering.

## 1. บทนำ

การวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุหรือโครงสร้างที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกัดกร่อนโดยอาศัยการปลดปล่อยของคลื่นความเค้น (Stress Wave) ที่เรียกว่าการตรวจสอบแบบไม่ทำลายวิธีอะคูสติกอิมพัลส์ ได้มีการพัฒนาให้เกิดความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อได้เปรียบบางประการที่ดีกว่าการตรวจสอบการกัดกร่อนแบบวิธีอื่น เช่น ความรวดเร็วในการตรวจสอบ ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในการตรวจสอบที่น้อยกว่า เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยจากกลุ่มผู้วิจัยจำนวนมากได้พยายามวิจัยเพื่อเพิ่มความสามารถและความแม่นยำให้มากยิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการวิจัยอะคูสติกจากการกัดกร่อนของวัสดุที่เป็นเหล็กคาร์บอน [1], อลูมิเนียมอัลลอย [2-3] หรือเหล็กกล้าไร้สนิม [4-5] ในสภาวะกัดกร่อนแบบต่างๆ ซึ่งการวิเคราะห์การกัดกร่อนโดยการควบคุมปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Technique) ได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยเพื่อกำหนดสภาวะศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนให้เป็นไปตามต้องการเพื่ออธิบายถึงปรากฏการณ์ และความเกี่ยวข้องกันของสัญญาณอะคูสติกที่ตรวจวิเคราะห์ผ่านค่าตัวแปรอะคูสติกรูปแบบต่างๆ [6-10] ซึ่งผลการวิจัยส่วนใหญ่จะเป็นการบอกว่าการกัดกร่อนเกิดขึ้นหรือไม่ หรือกระบวนการกัดกร่อนมีความสอดคล้องกับสัญญาณอะคูสติกที่ตรวจจับได้ [11] ซึ่งการวิเคราะห์ต่างๆ เหล่านี้ยังมีข้อโต้แย้งกันอยู่ในเรื่องของ

แหล่งกำเนิดของอะคูสติกที่นำมาวิเคราะห์ [12] และจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาถึงแหล่งกำเนิดต่างๆ ในระบบการกัดกร่อนเพื่อแสดงลักษณะเฉพาะของแต่ละแหล่งกำเนิดออกมาผ่านพารามิเตอร์ทางอะคูสติกในสภาวะกัดกร่อนที่ต่างกันได้อย่างชัดเจน [13] อย่างไรก็ตามการเกิดการกัดกร่อนภายใต้สภาวะที่กำจัดสัญญาณรบกวนทางกลอันเนื่องมาจากฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการกัดกร่อนและสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าออกไป ให้คงเหลือเพียงสัญญาณจากการกัดกร่อนเท่านั้น ผลของการถ่ายเทของประจุอย่างต่อเนื่องระหว่างการกัดกร่อนอาจส่งผลต่อการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกได้เช่นกัน ซึ่งจะนำไปสู่การแปลผลที่มีความผิดพลาด

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลจากการถ่ายเทประจุของการกัดกร่อนที่อาจส่งผลต่อการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกในกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้สำหรับประกอบเป็นถังพักวัตถุดิบในทางอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและอุตสาหกรรมอาหาร โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก โดยการควบคุมศักย์ไฟฟ้า และการวิเคราะห์โดยเทคนิคไฟฟ้าเคมี ลักษณะการได้รับของสัญญาณอะคูสติกและการวิเคราะห์ผ่านค่าตัวแปรอะคูสติกสามารถบอกได้ถึงผลของการถ่ายเทประจุไฟฟ้า และสิ่งที่ตรวจจับได้ว่าเป็นความสอดคล้องกับการกัดกร่อนอย่างไร



รูปที่ 1 วงจรไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนและการถ่ายเทของประจุไฟฟ้า

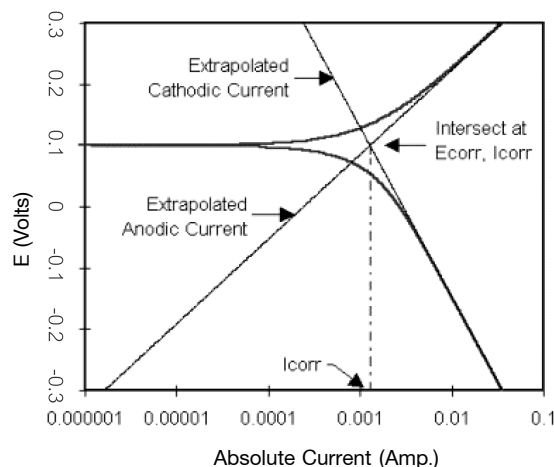
## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การถ่ายเทประจุไฟฟ้าในกระบวนการกัดกร่อน

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

### 2.2 ความหมาย และที่มาของการวิเคราะห์

#### Polarization Curve

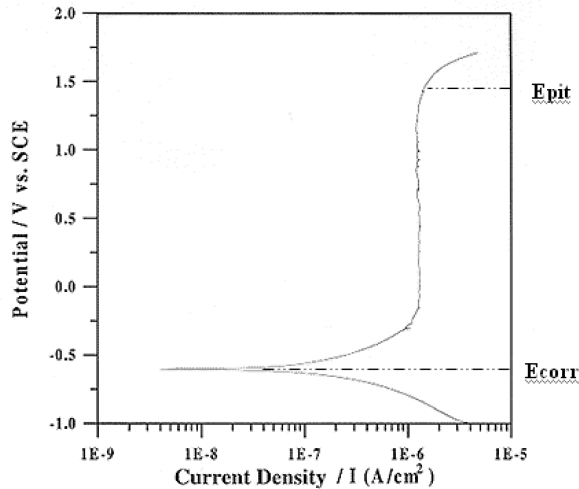


รูปที่ 2 การวัดค่า  $I_{corr}$  ด้วยวิธี Classic Tafel Analysis

การวัดค่าของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน ( $I_{corr}$ ) เพื่อไปคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนไม่สามารถที่จะวัดได้โดยตรงจากการที่ประจุถ่ายเทระหว่างบริเวณอะโนดและแคโทดบนผิววัสดุที่เกิดการกัดกร่อน อย่างไรก็ตามในบางกรณีที่เป็นกรกัดกร่อนบนวัสดุโลหะเหล็กกล้าไร้สนิมในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด เป็นไปได้ที่จะวัดค่ากระแสดังกล่าวได้โดยวิธีทางอ้อม โดยการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมี อาศัยการวัดผ่านขั้วแคโทดเออร์อิเล็กโทรด (Counter electrode) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นแพลตตินัม (Platinum) และเครื่องมือทางอิเล็กโทรนิคส์ที่เรียกว่า Potentiostat โดยต่อกับอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode) โดย Potentiostat จะเป็นเครื่องมือที่ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วงานทดสอบเพื่อที่จะควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้เป็นไปตามที่ต้องการในการทดลอง ซึ่งการวัดค่า  $I_{corr}$  ด้วยวิธีการสร้างโค้งความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าที่ควบคุมกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน โดยประกอบด้วยโค้งอะโนดิก (Anodic Curve) และโค้งแคโทดิก (Cathodic curve) และการวิเคราะห์แบบ Tafel จะทำให้ได้จุดตัดที่เป็นค่าของ  $E_{corr}$  และ  $I_{corr}$  ดังรูปที่ 2

ความหมายของค่า  $E_{corr}$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีอัตราการรวมของปฏิกิริยาทั้งหมดทางอะโนดิกเท่ากับอัตราการรวมของปฏิกิริยาทั้งหมดทางคะโทดิกซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการสมดุลสำหรับกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้น โดยจะมีค่ากระแสกัดกร่อนคงที่เท่ากับ  $I_{corr}$  สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของการกัดกร่อนของวัสดุสามารถทำได้จาก

การวิเคราะห์โดยการสร้างกราฟโพลาไรเซชัน (Polarization Curve) ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้จะแสดงความสัมพันธ์ของศักย์ไฟฟ้าในการกัดกร่อนกับการถ่ายเทประจุไฟฟ้า ที่บ่งบอกช่วงของการต้านทานการกัดกร่อนโดยการสร้างฟิล์มป้องกัน (Passive Film) การทำลายฟิล์มป้องกันการกัดกร่อนและการเกิดการกัดกร่อนที่เนื้อวัสดุได้



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

สำหรับกราฟโพลาไรเซชันของโลหะที่มีสมบัติสามารถสร้างฟิล์มต้านการกัดกร่อน ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม (ดังรูปที่ 3) โดยการกัดกร่อนบนเหล็กกล้าไร้สนิมอาจเกิดได้ทั้งการกัดกร่อนแบบหลุมลึก และการกัดกร่อนแบบยูนิฟอร์มได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงของศักย์ไฟฟ้าในปฏิกิริยากัดกร่อน การเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึกเกิดขึ้นเมื่อศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ  $E_{pit}$  และการกัดกร่อนแบบทั้งผิวหน้า สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนอยู่ระหว่างช่วง  $E_{corr}$  และ  $E_{pit}$  โดยรูปร่างของกราฟโพลาไรเซชันสำหรับแต่ละคู่ปฏิกิริยากัดกร่อน (โลหะ-สารกัดกร่อน) ก็จะแตกต่างกันไป หากโลหะมีการต้านทานการกัดกร่อนต่ำ หรือไม่สามารสร้างฟิล์มต้านทานการกัดกร่อนได้ เช่น ในกรณีเหล็กคาร์บอน ซึ่งการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึกจะไม่เกิดขึ้น แต่จะเกิดเป็นการกัดกร่อนแบบทั่วทั้งผิวหน้า ดังนั้นค่าของ  $E_{pit}$  จึงไม่เกิดขึ้นบนกราฟ

โพลาไรเซชันของโลหะคาร์บอน รวมถึงช่วงการต้านทานการกัดกร่อนก็จะแคบลงด้วย

### 2.3 อะคูสติคอิมิชันสำหรับการวิเคราะห์การกัดกร่อน

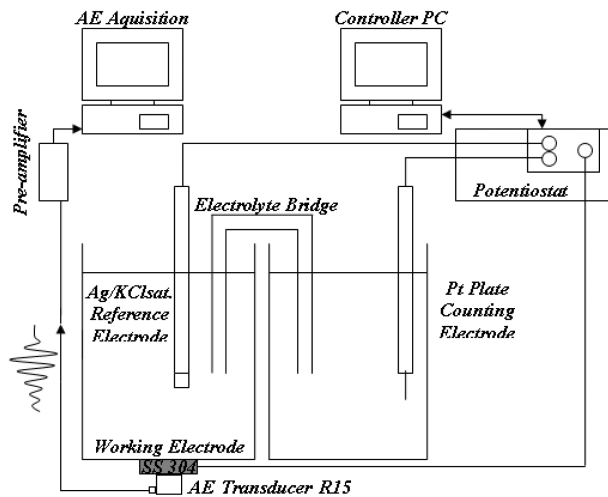
การปลดปล่อยสัญญาณอะคูสติคในกระบวนการกัดกร่อนมีแหล่งกำเนิดของสัญญาณมาจากหลายแหล่งกำเนิด ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเป็นไปได้ที่จะมาจากการเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนที่ผิววัสดุ การแตกของพาสซีฟฟิล์ม ผลของผลิตผลจากการกัดกร่อน (Corrosion product) เช่น การเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจน การก่อตัวขึ้นของออกไซด์โลหะหรือที่เรียกว่าการเกิดสนิม เป็นต้น และสัญญาณรบกวนทั้งทางกลและทางไฟฟ้า ซึ่งแต่ละแหล่งกำเนิดของสัญญาณอะคูสติคจะมีลักษณะเฉพาะ โดยสามารถวิเคราะห์เพื่อการจำแนกแต่ละแหล่งกำเนิดของ

สัญญาณที่ตรวจจับได้ จากการวิเคราะห์ผ่านค่าตัวแปรอะคูสติกที่กำหนดมาจากสัญญาณอะคูสติกในโดเมนเวลาจากการพิจารณาสัญญาณที่เกินระดับขีดจำกัดเริ่มต้น (Threshold level) ที่กำหนดไว้ ได้แก่ จำนวนครั้งของแอมพลิจูดที่มีรอบการแกว่งของสัญญาณเกินระดับขีดจำกัดเริ่มต้น (Count) ระดับของสัญญาณที่มีค่าสูงที่สุด (Peak amplitude) ค่าเวลาของระดับสัญญาณเกินกว่าระดับขีดจำกัดเริ่มต้นจนถึงระดับของสัญญาณสูงสุด (Rise time) ค่าเวลาของสัญญาณตั้งแต่ระดับของสัญญาณสูงสุดจนลดลงเหลือเท่ากับระดับขีดจำกัดเริ่มต้น (Duration time) และจำนวนครั้งของการตรวจจับสัญญาณที่ตรวจจับได้ตลอดช่วงเวลาที่สนใจ (Hit) และค่าของพลังงานอะคูสติก (AE Energy) ที่ไม่เกี่ยวข้องกับระดับการกำหนดค่าขีดจำกัดเริ่มต้น โดยพารามิเตอร์อะคูสติกแต่ละตัวจะมีความสัมพันธ์กับการกัดกร่อนที่ศึกษาอยู่หรือไม่ สามารถรู้ได้จากการพิจารณาพารามิเตอร์แต่ละตัวเปรียบเทียบกับกราฟเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดกร่อนตามช่วงเวลา (History plot) หรือการวิเคราะห์ค่าของคู่พารามิเตอร์

(Correlation plot) เป็นต้น [13]

### 3. การดำเนินการวิจัย

เหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ความหนา 0.5 มม. และขนาดพื้นที่ทดสอบ 6.25 ซม.<sup>2</sup> ซึ่งผ่านการเตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 1200 จากนั้นเป่าให้แห้งด้วยอากาศอุ่น และทิ้งข้ามคืนในภาชนะที่มีการป้องกันความชื้นด้วยสารดูดความชื้นซิลิกา โดยชิ้นงานทดสอบได้ถูกนำมาทดสอบ ภายใต้สภาวะการกัดกร่อนสารละลาย 3% NaCl ปรับความเป็นกรด pH ให้เท่ากับ 2 ด้วยสารละลาย HCl เข้มข้น และควบคุมปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีด้วยแบบพลวัต ด้วยเครื่อง Potentiostat โดยควบคุมความต่างศักย์ตั้งแต่ช่วง -0.5 ถึง 0.5 โวลต์ (อิเล็กโทรดอ้างอิง Ag/KCl<sub>sat</sub>) ซึ่งอัตราการสแกนเป็น 0.2 มิลลิโวลต์/วินาที และบันทึกค่าความหนาแน่นของประจุในการกัดกร่อนผ่าน Counter Electrode แบบแผ่นแพลตทินัม เข้าสู่คอมพิวเตอร์บันทึกและแสดงผลกราฟโพลาริเซชัน



รูปที่ 4 ระบบการวิเคราะห์สัญญาณอะคูสติกอิมมิชชันและการควบคุมระบบไฟฟ้าเคมีการกัดกร่อน

สัญญาณอะคูสติกจากการกัดกร่อนของวัสดุทดสอบ ถูกบันทึกตลอดช่วงการทดสอบทางไฟฟ้าเคมีโดยหัวตรวจสอบอะคูสติกแบบเพียโซอิเล็กทริก รุ่น R15 โดยมีความถี่เรโซแนนซ์ที่ 150 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งสอดคล้องกับย่านความถี่ของสัญญาณอะคูสติกจากการกัดกร่อนในช่วงประมาณ

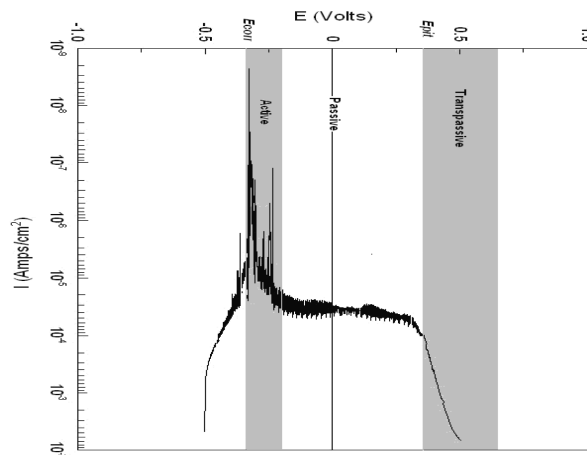
100-200 กิโลเฮิร์ตซ์ และการทดลองใช้ Pre-amplifier รุ่น 1240 จาก PAC โดยใช้อัตราการขยายสัญญาณที่ 60 dB พร้อมทั้งกรองความถี่แบบแถบความถี่ (Band-Pass) ในช่วงความถี่ 100-300 กิโลเฮิร์ตซ์ และบันทึกผลทางอะคูสติกทางเวลาด้วย LOCAN320 จาก PAC โดย

การออกแบบทดลองได้ใช้สะพานอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Bridge) เพื่อป้องกันสัญญาณทางอะคูสติกจากฟองก๊าซที่เกิดขึ้นที่ขั้ว Counter Electrode และป้องกันสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าเข้าสู่หัวตรวจสอบอะคูสติกจากการจ่ายกระแสในระบบการกัดกร่อนไปยังวัสดุทดสอบที่ขั้ว Working Electrode ด้วยระบบการกวาดสัญญาณ

#### 4. ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

ผลในการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีการ Potentiodynamic Test ทำให้ได้รูปแบบของ Polarization Curve และค่าเฉพาะตัวของวัสดุทดสอบเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ในงานวิจัย เพื่ออ้างอิงถึงกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อน และอธิบายปรากฏการณ์ของสัญญาณอะคูสติกที่ตรวจจับได้ตลอดช่วงเวลาทดสอบ ค่า  $E_{corr}$  และ  $E_{pit}$  ที่ได้จากการวิเคราะห์เป็น  $-0.36346$  และ  $0.37109$  โวลต์ ตามลำดับ ค่าศักย์ไฟฟ้าเฉพาะตัวทั้งสองค่าจะเป็นค่าที่กำหนดขอบเขตของช่วง Active,

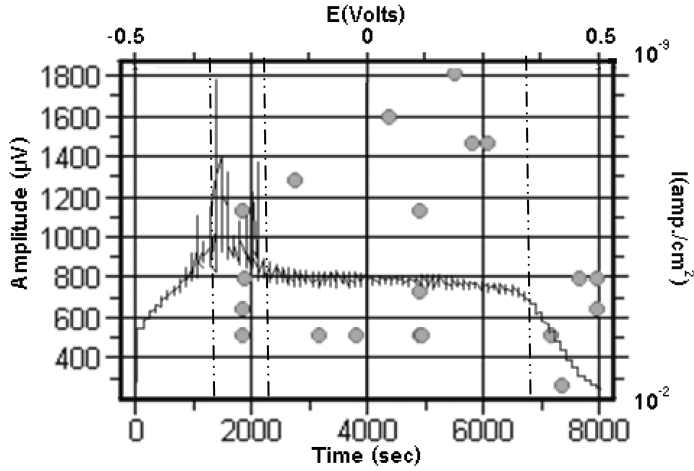
Passive และ Trans-passive ดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นลำดับขั้นของการเกิดการกัดกร่อนในสภาวะแท้จริงของเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีสมบัติที่สามารถต้านการกัดกร่อน ได้แก่ การเสียหายหรือแตกของออกไซด์ฟิล์ม หรือพาสซีฟฟิล์มที่ปกป้องผิวในขณะเริ่มต้นการกัดกร่อน จากนั้นฟิล์มดังกล่าวก็จะถูกสร้างขึ้นมาอีกครั้งเพื่อดำเนินทานการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในช่วง Passive ซึ่งในช่วงนี้โลหะจะพยายามสร้างฟิล์มขึ้นมา และในทางกลับกันก็มีบางส่วนของฟิล์มได้ถูกทำลายไป ด้วยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะเห็นได้จากการที่ค่าของความหนาแน่นของกระแสมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก และเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าที่ควบคุมเข้าใกล้ค่า  $E_{pit}$  การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นกระแสจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งหมายถึงผิวโลหะไม่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้อีกต่อไป ฟิล์มที่สร้างขึ้นถูกทำลายและไม่สามารถสร้างขึ้นมาใหม่ได้อีก และการกัดกร่อนแบบหลุมลึก (Pitting) จึงเริ่มต้นขึ้นได้ช่วง Trans-passive นี้



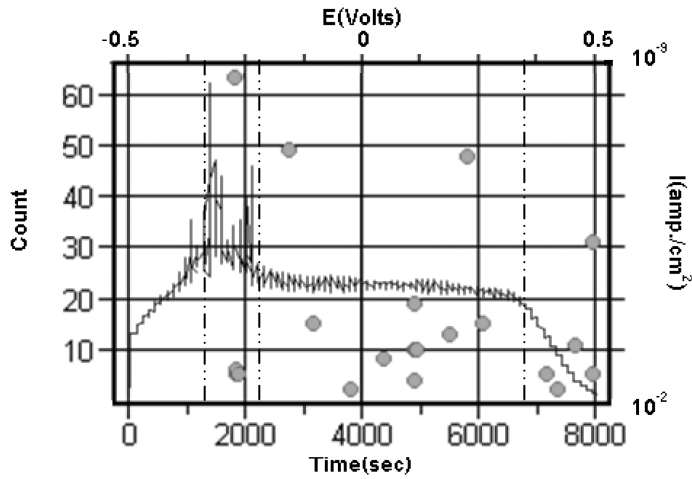
รูปที่ 5 Polarization Curve ของตัวอย่างเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด 304

สัญญาณอะคูสติกที่ตรวจจับถูกนำมาวิเคราะห์ผ่านพารามิเตอร์อะคูสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเวลา และประกอบกับการอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นทางไฟฟ้าเคมีของการควบคุมศักย์ไฟฟ้าเคมีที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ค่า  $E = -0.50$  โวลต์ ไปจนเสร็จสิ้นที่  $E = 0.50$  โวลต์ ด้วยอัตราการสแกน 0.2

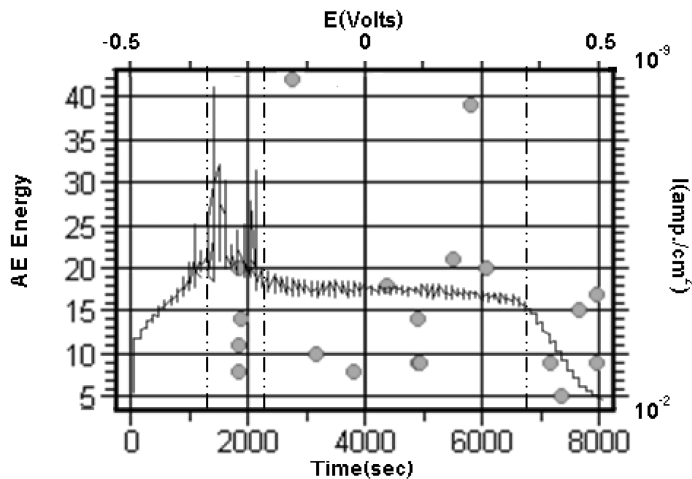
มิลลิโวลต์ต่อวินาที ซึ่งเป็นเวลาในการวิเคราะห์ทั้งสิ้น 8,000 วินาที โดยพารามิเตอร์อะคูสติกที่วิเคราะห์ร่วมกับกลไกของการกัดกร่อนคือ Amplitude, Counts, Energy, และ Hit ดังรูปที่ 6 ถึง 9



รูปที่ 6 ตัวแปรอะคูสติคแอมพลิจูดต่อเวลา เปรียบเทียบกับกราฟโพลาริเซชันของการเกิดการกัดกร่อน

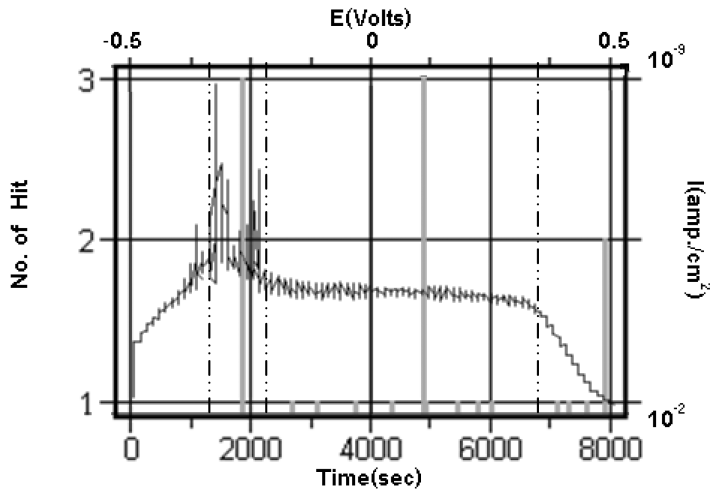


รูปที่ 7 ตัวแปรอะคูสติค Count ต่อเวลาเปรียบเทียบกับกราฟโพลาริเซชันของการเกิดการกัดกร่อน



รูปที่ 8 ตัวแปรอะคูสติค Energy ต่อเวลา เปรียบเทียบกับกราฟโพลาริเซชันของการเกิดการกัดกร่อน





รูปที่ 9 ตัวแปรอะคูสติค Hit ต่อเวลา เปรียบเทียบกับกราฟโพลาริเซชันของการเกิดการกัดกร่อน

ซึ่งพบว่าการแสดงผลของสัญญาณจะแบ่งกลุ่มของสัญญาณออกเป็นสามช่วงเช่นกัน (Active, Passive และ Trans-passive) โดยสัญญาณอะคูสติคที่เกิดขึ้นจะมีการตรวจจับได้ของสัญญาณอย่างไม่ต่อเนื่อง (Discrete Signal) และมีลักษณะเป็นสัญญาณแบบเบิสต์ (Burst) ซึ่งในการควบคุมกระบวนการกัดกร่อนจากงานวิจัยนี้จะเห็นว่ามีการถ่ายเทของประจุในการกัดกร่อนอย่างต่อเนื่อง จากกราฟโพลาริเซชัน แต่ผลของการถ่ายเทประจุกลับไม่ส่งผลต่อสัญญาณอะคูสติค หรือก่อให้เกิดสัญญาณ

อะคูสติคที่มีความต่อเนื่องแต่อย่างใด และสัญญาณอะคูสติคที่ได้นั้นยังมีความสอดคล้องกันกับการเกิดการกัดกร่อนด้วย ซึ่งในการวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณจะแบ่งเป็นการวิเคราะห์ในส่วนของสัญญาณจากการเสียหายหรือแตกของฟิล์มพาสซีฟ จะเกิดขึ้นทั้งในช่วง Active รวมกับช่วง Passive เพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณที่เกิดจากการกัดกร่อนแบบหลุมลึกที่เนื้อวัสดุทดสอบ (ช่วง Trans-passive) ซึ่งผลการวิจัยได้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของค่าพารามิเตอร์อะคูสติคในแต่ละช่วงการกัดกร่อน

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

ค่าเฉลี่ยของแต่ละพารามิเตอร์อะคูสติคแสดงถึงความแตกต่างกันของในแต่ละช่วงของการกัดกร่อน โดยค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดสามารถอธิบายถึงความแตกต่างได้ดีที่สุด โดยที่จะมีค่าในช่วงพาสซีฟฟิล์มแตกสูงกว่าช่วงของการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึก สำหรับพารามิเตอร์ Count

และ Energy ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 7 และ 8 และการพิจารณาผ่านค่าเฉลี่ยพบว่ามีความแตกต่างเพียงเล็กน้อยจากสองแหล่งกำเนิดสัญญาณ ขณะที่อัตราเฉลี่ยของค่า Hit พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก

## 5. สรุปการวิจัย

1. ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบระบบในการทำการทดลองและวิจัยให้เกิดสัญญาณรบกวนทางกลในระบบการกัดกร่อนให้น้อยที่สุด อันได้แก่ การกำจัดฟองก๊าซที่เกิดขึ้นที่ขั้วของ Counter Electrode และการกำจัดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าด้วยระบบการกราวด์ จึงทำให้สัญญาณที่ตรวจจับได้นั้นเป็นสัญญาณที่มาจาก การกัดกร่อนเพียงอย่างเดียวเท่านั้น และได้ศึกษาถึงผลจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าในกระบวนการกัดกร่อนว่ามีผลต่อสัญญาณอะคูสติกหรือไม่ โดยสามารถสรุปได้ว่าการถ่ายเทประจุไม่ได้ส่งผลกระทบต่อสัญญาณอะคูสติกในการตรวจจับการกัดกร่อนแต่อย่างใด ด้วยเหตุผลจากการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกได้เป็นลักษณะไม่ต่อเนื่องตลอดการทดสอบทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีการถ่ายเทประจุอย่างต่อเนื่องโดยการพิจารณาจากค่าความหนาแน่นของกระแสที่เกิดขึ้นในระบบ หากผลของการถ่ายเทประจุมีผลต่อสัญญาณอะคูสติก สัญญาณอะคูสติกก็ควรจะตรวจจับได้อย่างต่อเนื่องเช่นกัน

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. สัญญาณอะคูสติกที่ตรวจจับได้นั้นสามารถจำแนกออกเป็นสองแหล่งกำเนิด เมื่ออธิบายด้วยเหตุผลจากการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีของการกัดกร่อนควบคู่กัน ซึ่งพบว่ามีแหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกมาจากการแตกของพาสซีฟฟิล์ม และการเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมลึกที่เนื้อ

วัสดุ ซึ่งผลการวิจัยนี้สนับสนุนงานวิจัยก่อนหน้านี้ [13]

4. การตรวจจับและวิเคราะห์การกัดกร่อนด้วยวิธีอะคูสติกอิมมิชชันในการใช้งานจริง จะไม่มีผลอันเนื่องมาจากศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของระบบ แต่จะขึ้นอยู่กับกลไกของการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน โดยสามารถพิจารณาได้จากพารามิเตอร์ทางอะคูสติกดังกล่าวในช่วงต้น

## 6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาสำหรับทุนสนับสนุนการวิจัย ดร.พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข และคุณเชิดพงษ์ จอมเดช สำหรับคำแนะนำที่เป็นประโยชน์

## 7. 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  $\alpha,\beta$  -Brass by Acoustic Emission”, *NDT & E International*, Vol. 36, Issue 2, 1 March 2003, pp. 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*, Vol. 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](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*, Vols. 321-323, pp. 545-548.
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.

