

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสมบัติการป้องกันการกัดกร่อนโลหะ  
ของสารประกอบแอนโทไธยานินในกะหล่ำปลีสีม่วง



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

ปพ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จ 645 ก

2539

2539

เลขหม.....

เลขทะเบียน..... 32042

วัน, เดือน, ปี..... 0 ก.พ. 2542

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Study on Corrosive Protection Properties of  
Anthocyanins Extracted from Red Cabbage**



Miss Jureeporn Pitaktrakunsiri

Miss Supaporn Thumsorn

Miss Hathaiporn Tanwandee

**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the  
Requirement for the Degree of Bachelor of Science**

**Department of Chemistry**

**Faculty of Science**

**King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**

**1996**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

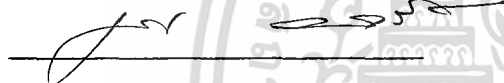
**หัวข้อโครงการพิเศษ** การศึกษาสมบัติการป้องกันการกัดกร่อนโลหะของสารประกอบ  
แอนโทไซยานินในกะหล่ำปลีสีม่วง

**โดย** นางสาวจรีพร พัทธ์ภัทรตระกูลศิริ  
นางสาวสุภาภรณ์ ทুমสอน  
นางสาวหทัยพร แทนวันดี

**ภาควิชา** เคมี

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ดร.อรรพรรณ ชัยลภากุล

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติ  
ให้นำโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



(ผศ.นงนุช เกตรานูวัฒน์)

หัวหน้าภาควิชา

**คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ**



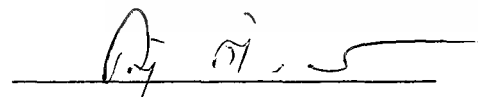
(ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์)

ประธานกรรมการ



(ดร.ตะวัน สุขน้อย)

กรรมการ



(อาจารย์คณิตา ตั้งคณานุรักษ์)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                    |  |
|--------------------|--|
| หัวข้อโครงการพิเศษ | การศึกษาสมบัติการป้องกันการกัดกร่อนโลหะของสารประกอบแอนโทไซยานินในกะหล่ำปลีสีม่วง |
| นักศึกษา           | นางสาวจวีพร พิทักษ์ตระกูลศิริ<br>นางสาวสุภาภรณ์ ทุมสอน<br>นางสาวหทัยพร แทนวันดี  |
| อาจารย์ที่ปรึกษา   | ดร.อรวรรณ ชัยลภากุล  |
| ภาควิชา            | เคมี   |
| ปีการศึกษา         | 2539   |

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาศสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนเหล็ก (St 37) ของสารประกอบแอนโทไซยานินจากกะหล่ำปลีสีม่วง โดยทำการนำกะหล่ำปลีสีม่วงมา 150 กรัม สกัดด้วยสารละลายกรดซิตริก 5 เปอร์เซ็นต์ในเมทานอลโดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นทำการระเหยตัวทำละลาย และสกัดด้วยคลอโรฟอร์ม นำชั้นคลอโรฟอร์มทิ้งไป แล้วนำสารละลายที่ได้จากการสกัดมาทดสอบประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน ในสารละลายกรดไนตริกและโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ซึ่งจะทำการทดสอบ 2 วิธี วิธีที่ 1 ทำการผสมสารที่สกัดได้ลงในสารละลายกรดไนตริกและโซเดียมคลอไรด์ วิธีที่ 2 ทำการเคลือบสารที่สกัดได้ลงบนแผ่นเหล็ก และทำการทดสอบในสารละลายกรดไนตริกและโซเดียมคลอไรด์ จากการทดลองตามวิธีที่ 1 พบว่า เมื่อปริมาตรของสารประกอบแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้น ทำให้การกัดกร่อนช้าลงในสารละลายกรดไนตริก และจากการทดสอบวิธีที่ 2 พบว่า เหล็กจะมีฟิล์มบางที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน เช่นเดียวกับฟิล์มที่เกิดขึ้นบนผิวเหล็ก ที่ทดสอบตามวิธีที่ 1

**Special Project Title** Study on Corrosive Protection Properties of Anthocyanins Extracted from Red Cabbage

**Name** Miss Jureeporn Pitaktrakunsiri  
Miss Supaporn Thumsorn  
Miss Hathaiporn Tanwandee

**Special Project Advisor** Dr.Orawon Chailapakul

**Department** Chemistry

**Academic Year** 1996



### Abstract

The special project emphasized on the corrosive protection in iron (St 37) of anthocyanins extracted from red cabbage. Anthocyanins were extracted by 5% W/V citric acid in methanol, then solvent was evaporated and the remaining solution was washed by chloroform. The extracted anthocyanins were tested for protection efficiency in nitric acid and also in sodium chloride solution. Two experiments were set for testing, firstly, anthocyanins were added in nitric acid and sodium chloride solution, secondly, iron was immersed in anthocyanins for 24 hours and tested in nitric acid and sodium chloride solution. From the first experiment, it was found that a corrosion rate of iron (St 37) decreased in nitric acid, when the volume of anthocyanins increased. From the second experiment, passive was formed film on the surface of metal, preventing.

## กิติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.อรรพวง ชัยลภากุล อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทาง ให้คำปรึกษา และการสนับสนุน ในการดำเนินการจัดทำโครงการพิเศษนี้ด้วยดีมาตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.เสน่ห์ เอกะวิภาต อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ช่วยในการให้คำแนะนำ และให้ความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ในการทดสอบ

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ศิริลักษณ์ นิวิฐจรรยาพงศ์ รองผู้อำนวยการฝ่ายพัฒนาเทคโนโลยี และวิจัย ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีไทย-ฝรั่งเศส ที่ช่วยให้คำแนะนำ และความสะดวกในการใช้เครื่องมือในการทดสอบ

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัศวรัตน์ ดร.ตะวัน สุชน้อย อาจารย์คณิตศาสตร์ และอาจารย์กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ที่กรุณาเป็นคณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีไทย-ฝรั่งเศส นักศึกษาและเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้คำแนะนำ และ เอื้อต่อความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี และภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ได้ให้ความสะดวกในการจัดทำโครงการพิเศษ

และขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกท่าน ที่ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ และช่วยให้การดำเนินงานครั้งนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

นางสาวจวีพร พิทักษ์ตระกูลศิริ

นางสาวสุภาภรณ์ ทุมสอน

นางสาวหทัยพร แทนวันดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

|  | หน้า  |
|--|-------|
| บทคัดย่อ   | ก     |
| Abstract   | ข     |
| กิตติกรรมประกาศ                                      | ค     |
| สารบัญ   | ง     |
| สารบัญตาราง  | ฉ     |
| สารบัญรูป  | ช     |
| บทที่ 1 บทนำ   | 1     |
| 1.1 ความเป็นมาของโครงการ                             | 1-2   |
| 1.2 วัตถุประสงค์                                     | 2     |
| 1.3 ขอบเขตของการศึกษา                                | 2     |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ                              | 3     |
| 2.1 พื้นฐานทางเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อน                | 3-4   |
| 2.2 กฎของฟาราเดย์ในการกัดกร่อน                       | 4     |
| 2.3 โพลลาไรเซชันของการกัดกร่อน                       | 5-7   |
| 2.4 ผลของสิ่งแวดล้อมต่อการกัดกร่อน                   | 8     |
| 2.5 รูปแบบของการกัดกร่อน                             | 8-14  |
| 2.6 การป้องกันการกัดกร่อน                            | 14-15 |
| 2.7 การป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน | 15-18 |
| 2.8 การใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้าในการศึกษาอัตราการกัดกร่อน | 18-21 |
| 2.9 สารประกอบแอนโทไซยานิน                            | 21-23 |
| บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินงาน                      | 24    |
| 3.1 วัสดุและเคมีภัณฑ์                                | 24    |
| 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ                             | 24    |
| 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน                              | 25    |
| 3.3.1 การสกัดสารประกอบแอนโทไซยานินจากกะหล่ำปลีสีม่วง | 25    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|   | หน้า      |
|---|-----------|
| 3.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของ<br>สารประกอบแอนโทไซยานินที่สกัดได้จากกะหล่ำปลีสีม่วง<br>โดยใช้เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน | 25-26     |
| 3.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของ<br>สารประกอบแอนโทไซยานินที่สกัดได้จากกะหล่ำปลีสีม่วง<br>โดยการเคลือบลงบนแผ่นเหล็ก       | 27        |
| <b>บทที่ 4 ผลการวิจัย</b>   | <b>28</b> |
| 4.1 ผลการทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนของสารประกอบแอนโท-<br>ไซยานินที่สกัดได้จากกะหล่ำปลีสีม่วง  | 28        |
| 4.1.1 ผลการทดสอบการกัดกร่อนในการใช้เป็นสารยับยั้งการ<br>กัดกร่อน  | 28-30     |
| 4.1.2 ผลการทดสอบเมื่อเคลือบลงบนแผ่นเหล็ก  | 31        |
| 4.2 รูปแบบของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในสภาวะต่างๆ   | 32-34     |
| <b>บทที่ 5 สรุปผลและวิจารณ์</b>   | <b>35</b> |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย  | 35-38     |
| 5.2 สรุปผลและวิจารณ์  | 38-39     |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ  | 39        |
| <b>ภาคผนวก</b>  | <b>40</b> |
| ภาคผนวก ก   | 41        |
| ภาคผนวก ข   | 45        |
| <b>เอกสารอ้างอิง</b>  | <b>59</b> |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

|   | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน  | 10   |
| ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงกัลวานิกของโลหะและโลหะผสม   | 11   |
| ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงสารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ในอุตสาหกรรม   | 16   |
| ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อน   | 18   |
| ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงสารประกอบแอนโทไซยานิน   | 22   |
| ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการทดสอบการกัดกร่อนในการเป็น<br>สารยับยั้งการกัดกร่อนในสารละลายกรดไนตริก      | 28   |
| ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงผลการทดสอบการกัดกร่อนในการเป็น<br>สารยับยั้งการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ | 29   |
| ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงผลของประสิทธิภาพในการเป็น<br>สารยับยั้งการกัดกร่อนในสารละลายกรดไนตริก           | 30   |
| ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงผลของประสิทธิภาพในการเป็น<br>สารยับยั้งการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์      | 30   |
| ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงผลการทดสอบในการเคลือบแผ่นเหล็ก<br>ด้วยสารประกอบแอนโทไซยานิน                     | 31   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 แสดง cathodic และ anodic polarization   | 6    |
| รูปที่ 2.2 แสดง activation concentration polarization  | 6    |
| รูปที่ 2.3 แสดง cathodic และ anodic polarization สำหรับ passive ที่ อานินด   | 7    |
| รูปที่ 2.4 รูปแบบของการกัดกร่อน  | 9    |
| รูปที่ 2.5 แสดงทิศทางการไหลของกระแสจากอานินด(A) ไปยังคาโทด(C) เมื่อเกิดการกัดกร่อนของโลหะ  | 15   |
| รูปที่ 2.6 วงจรของเครื่อง Potentiostat   | 19   |
| รูปที่ 2.7 แสดงเครื่องมือในการทดสอบการกัดกร่อน   | 20   |
| รูปที่ 2.8 Hypothetical Linear Polarization Plot   | 21   |
| รูปที่ 2.9 โครงสร้างของ Flavylium Cation   | 22   |
| รูปที่ 2.10 โครงสร้างของสารประกอบแอนโทไซยานินในกะหล่ำปลีสีม่วง   | 23   |
| รูปที่ 4.1 ผิวเหล็ก (St 37) ที่ผ่านการขัดทำความสะอาด (กำลังขยาย 10 เท่า)   | 32   |
| รูปที่ 4.2 การกัดกร่อนแบบทั่วไป (Uniform corrosion) ของเหล็กในสารละลายกรดไนตริก (กำลังขยาย 10 เท่า)                                    | 32   |
| รูปที่ 4.3 การกัดกร่อนแบบทั่วไป (Uniform corrosion) ของเหล็กในสารละลายกรดไนตริก (กำลังขยาย 50 เท่า)                                    | 33   |
| รูปที่ 4.4 การกัดกร่อนแบบทั่วไป (Uniform corrosion) ของเหล็กที่เคลือบด้วยสารประกอบแอนโทไซยานิน ในสารละลายกรดไนตริก (กำลังขยาย 10 เท่า) | 33   |
| รูปที่ 4.5 การกัดกร่อนแบบทั่วไป (Uniform corrosion) ของเหล็กในสารละลายกรดไนตริกเติมสารประกอบแอนโทไซยานิน (กำลังขยาย 10 เท่า)           | 34   |
| รูปที่ 4.6 การกัดกร่อนแบบจุด (Pitting corrosion) ของเหล็กในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (กำลังขยาย 10 เท่า)                                  | 34   |
| รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลายกับปริมาตรของสารประกอบแอนโทไซยานิน   | 35   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน<br>กับปริมาตรของสารประกอบแอนโทไซยานิน     | 36   |
| รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Polarization resistance<br>กับปริมาตรของสารประกอบแอนโทไซยานิน     | 37   |
| รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อน<br>กับปริมาตรของสารประกอบแอนโทไซยานิน             | 37   |
| รูปที่ 1ก เครื่องทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า  | 41   |
| รูปที่ 2ก ชุดทดสอบการกัดกร่อน  | 41   |
| รูปที่ 3ก เครื่องตัดโลหะ   | 42   |
| รูปที่ 4ก เครื่องขัดชิ้นงาน  | 42   |
| รูปที่ 5ก กล้องไมโครสโคป (microscope) ถ่ายภาพชิ้นงาน   | 43   |
| รูปที่ 6ก การทดสอบการกัดกร่อนของสารประกอบแอนโทไซยานิน<br>ในสารละลายกรด                                   | 43   |
| รูปที่ 7ก การทดสอบการกัดกร่อนของสารประกอบแอนโทไซยานิน<br>ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์                        | 44   |
| รูปที่ 1ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กใน $\text{HNO}_3$                                     | 45   |
| รูปที่ 2ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กใน $\text{HNO}_3$<br>เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 0.5 ml | 46   |
| รูปที่ 3ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กใน $\text{HNO}_3$<br>เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 1.0 ml | 47   |
| รูปที่ 4ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กใน $\text{HNO}_3$<br>เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 2.0 ml | 48   |
| รูปที่ 5ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กใน $\text{HNO}_3$<br>เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 3.0 ml | 49   |
| รูปที่ 6ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กใน $\text{HNO}_3$<br>เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 4.0 ml | 50   |
| รูปที่ 7ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กใน NaCl   | 51   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 8ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กใน NaCl<br>เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 0.5 ml                       | 52   |
| รูปที่ 9ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กใน NaCl<br>เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 1.0 ml                       | 53   |
| รูปที่ 10ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กใน NaCl<br>เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 2.0 ml                      | 54   |
| รูปที่ 11ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กใน NaCl<br>เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 3.0 ml                      | 55   |
| รูปที่ 12ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กใน HNO <sub>3</sub><br>เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 4.0 ml          | 56   |
| รูปที่ 13ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กที่แช่ใน<br>สารประกอบแอนโทไซยานิน 24 ชั่วโมง ใน HNO <sub>3</sub> | 57   |
| รูปที่ 14ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กที่แช่ใน<br>สารประกอบแอนโทไซยานิน 24 ชั่วโมง ใน NaCl             | 58   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1.ความเป็นมาของโครงการ

ในปัจจุบันอุปกรณ์และเครื่องมือที่เราใช้ ทั้งในทางอุตสาหกรรมและเกษตรกรรม จะนำโลหะมาใช้ เนื่องจากโลหะมีความแข็งแรงทนทาน สามารถแปรรูปได้ง่าย และมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า แต่โลหะยังมีข้อเสียคือ ตามธรรมชาติโลหะบริสุทธิ์ (สินแร่) จะไม่เสถียร ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของสารประกอบต่าง ๆ เช่นสารประกอบออกไซด์ ในการแยกโลหะออกจากสินแร่จะต้องใช้พลังงาน และปฏิกิริยาเคมีทำให้โลหะเปลี่ยนสภาพเป็นสารประกอบเดิมที่โลหะแยกออกมา ทำให้โลหะนั้นเกิดการสูญเสียสภาพไปหรือเรียกได้ว่าการกัดกร่อน (corrosion) เนื่องจากสภาวะแวดล้อม<sup>4</sup> เมื่อเกิดการกัดกร่อนขึ้นทำให้อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ที่มีโลหะเป็นส่วนประกอบ จะเกิดความเสียหายไม่สามารถใช้งานได้ และต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงในการซ่อมแซมรักษา จึงมีความจำเป็นที่จะต้องรักษาสภาพของโลหะให้ทนทานต่อการกัดกร่อน

การกัดกร่อน คือการเปลี่ยนสภาพหรือการสูญเสียเนื้อของโลหะ ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีทั้งการเปลี่ยนแปลงโดยเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีไฟฟ้าเกิดขึ้น<sup>9</sup>

ขั้นตอนของการเกิดการกัดกร่อนในโลหะ จะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า 2 ปฏิกิริยา<sup>17</sup> คือ

1. เมื่อโลหะอยู่ในสารกัดกร่อนจะเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่แอโนด คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันของอะตอมโลหะไปเป็นไอออนของโลหะ และอิเล็กตรอน เช่นปฏิกิริยาของเหล็กเมื่ออยู่ในน้ำ



2. อิเล็กตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อ คือ



จากทั้งสองปฏิกิริยาเมื่อรวมกันจะเป็นสมการทั่วไปของการกัดกร่อน คือ



นั่นคือเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าทั้งสองปฏิกิริยา จะทำให้มีการกัดกร่อนเกิดขึ้น การกัดกร่อนเป็นปัญหาที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดได้เลย วิธีที่ดีที่สุดคือ ทำการป้องกันให้เกิดการกัดกร่อนช้าลง หรือไม่ให้เกิดการกัดกร่อนในเวลาที่กำหนด

การป้องกันการกัดกร่อนสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งการเลือกวัสดุที่เหมาะสม การควบคุมสภาวะแวดล้อม การป้องกันโดยการเคลือบผิววัสดุไม่ให้สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม การป้องกันโดยใช้ไฟฟ้า และการป้องกันโดยใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีการจัดทำโครงการพิเศษเพื่อศึกษาการป้องกันการกัดกร่อนโดยวิธีที่ศึกษา คือ การป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้สารอินทรีย์ สำหรับสารอินทรีย์ที่ทำการศึกษา คือ สารประกอบแอนโทไซยานิน ซึ่งเป็นสารประกอบที่สกัดได้จากส่วนของพืชที่มีสีแดง และม่วง ซึ่งพบมากในธรรมชาติ โดยได้มีการศึกษาถึงคุณสมบัติของสารประกอบแอนโทไซยานินในสารละลายกรดซัลฟิวริกและมาลิก<sup>12</sup> และการป้องกันการกัดกร่อนโดยการเคลือบโลหะด้วยสารประกอบเชิงซ้อนของแอนโทไซยานิน ซึ่งมีลักษณะเป็นการป้องกันโดยใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน (corrosion inhibitor)<sup>8</sup>

สำหรับสารประกอบแอนโทไซยานินที่นำมาศึกษาได้จากการสกัดสารประกอบแอนโทไซยานินในกะหล่ำปลีสีม่วง เพื่อทำการศึกษาถึงสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กในสารละลาย ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์จากสารที่สกัดได้จากธรรมชาติ

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1. เพื่อทำการศึกษารายละเอียดของการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของเหล็ก โดยใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า

1.2.2. เพื่อศึกษาสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนของสารประกอบแอนโทไซยานินในกะหล่ำปลีสีม่วง

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1. ทำการศึกษารายละเอียดการกัดกร่อนของเหล็กด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

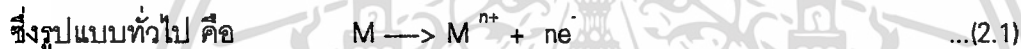
1.3.2. ศึกษาสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนของสารประกอบแอนโทไซยานินในกะหล่ำปลีสีม่วง

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

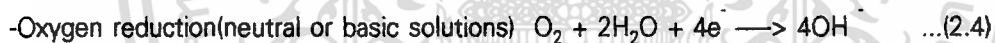
### 2.1 พื้นฐานทางเคมีไฟฟ้าของการกัดกร่อน

การกัดกร่อน (corrosion) คือ การเปลี่ยนแปลงสภาพหรือการสูญเสียเนื้อของโลหะ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีทั้งการเปลี่ยนแปลงโดยเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีไฟฟ้า ขั้นตอนการกัดกร่อนนั้นจะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า 2 ปฏิกิริยา<sup>5</sup> คือ

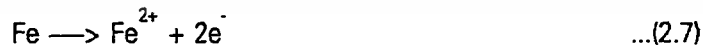
1. Anodic Reaction ในปฏิกิริยาการกัดกร่อน คือ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะ เช่น เมื่อโลหะอยู่ในน้ำ โลหะที่เกิดการกัดกร่อนได้จะมีการแตกตัวเป็นไอออนประจุบวก



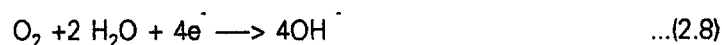
2. Cathodic Reaction เป็นปฏิกิริยาที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน จะมีหลายรูปแบบ คือ



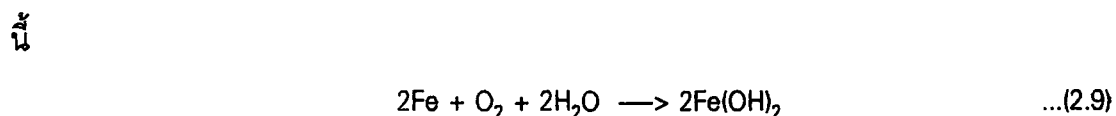
โลหะในตำแหน่งที่เกิดการกัดกร่อน<sup>2</sup> จะถูกทำลายเนื้อโลหะที่ผิวก่อน โดยโลหะในตำแหน่งนั้น จะละลายแล้วให้อิเล็กตรอนออกมา อิเล็กตรอนจะผ่านจากเนื้อโลหะไปยังบริเวณใกล้เคียงได้ เช่นเกิดปฏิกิริยากับกรด  $H^+$  ในสารละลายเกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) โดยมีน้ำเป็นสื่อกลางของการเชื่อมต่อให้ครบวงจรที่อิเล็กตรอนจะผ่านไปได้ เรียกสารละลายที่ไอออนผ่านได้ว่าอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ตัวอย่างของปฏิกิริยา เช่น เมื่อเหล็กอยู่ในน้ำจะถูกออกซิไดส์ ดังปฏิกิริยา



ขณะเดียวกันออกซิเจนในน้ำหรือความชื้นรอบๆ ก็จะถูกรีดิวซ์ ดังปฏิกิริยา

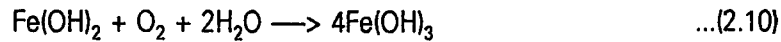


ผลรวมก็คือจะเกิดเป็นสารประกอบเหล็ก(II)ไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำเกิดขึ้นที่ผิวโลหะดัง



และสารประกอบนี้จะเปลี่ยนเป็นเหล็ก(III)ไฮดรอกไซด์ต่อไป ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง-3-เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สนิมเหล็ก  $\text{Fe(OH)}_3$  หรืออาจเขียนเป็น  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  มีสีน้ำตาลแดง

ดังนั้นการกัดกร่อนของเหล็กจึงเป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยารีดักชัน

## 2.2 กฎของฟาราเดย์ในการกัดกร่อน<sup>4</sup>

ปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าจะมีทั้งการให้และรับอิเล็กตรอน อัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากปฏิกิริยา คือ การวัดอัตราของปฏิกิริยา ซึ่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน สามารถวัดได้จากกระแส โดยที่ปริมาณกระแส 1 แอมแปร์ เท่ากับประจุ 1 คูลอมบ์ ( $6.2 \cdot 10^{18} e^-$ ) ต่อวินาที สัดส่วนระหว่างกระแสและมวลที่เปลี่ยนไป จะเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ คือ

$$m = ita / nF \quad \dots(2.11)$$

m คือ มวลที่เปลี่ยนไป (g)

i คือ กระแส (A)

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ = 96,500

n คือ จำนวนอิเล็กตรอนสมมูล

a คือ น้ำหนักอะตอม (g)

t คือ เวลา (s)

และในการวัดอัตราการกัดกร่อนโดยใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยมากจะวัดในรูปของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจากสมการข้างต้นเมื่อคิดเป็นเวลาต่อพื้นที่จะได้เป็นอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate, r)

$$r = m / tA = ia / nF \quad \dots(2.12)$$

i คือ current density =  $I/A$  ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

จากสมการนี้จะเป็นสัดส่วนของมวลที่สูญหายไปต่อพื้นที่ในหนึ่งหน่วยเวลา ( $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ )

ในการบอกความรุนแรงของการกัดกร่อน จะคิดเป็นความสูญเสียโดยดูจากอัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) ซึ่งโดยทั่วไปจะวัดอัตราการกัดกร่อนเป็นมิลต่อปี (mils per year, mpy)<sup>5</sup> โดยที่

$$\text{mpy} = 534W/\text{DAT} \quad \dots(2.13)$$

W คือ น้ำหนักที่สูญหายไป (mg)

D คือ ความหนาแน่นของตัวอย่างโลหะ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

A คือ พื้นที่ผิวของตัวอย่าง ( $\text{inch}^2$ )

T คือ เวลาในการทดสอบ (hr)

## 2.3 โพล่าไรเซชันของการกัดกร่อน<sup>2</sup>

การกัดกร่อนเมื่อเริ่มเกิดจะดำเนินไปชั่วระยะเวลาหนึ่งด้วยอัตราเร็วคงที่ค่าหนึ่ง อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเรื่อยๆ จะมารอที่ผิวโลหะทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของโลหะเป็นค่าลบมากขึ้น นั่นคือ ที่รอยต่อระหว่างโลหะกับสารละลาย จะมีอิเล็กตรอนมาอยู่มากเกินพอเพื่อรอให้เกิดปฏิกิริยารับอิเล็กตรอน หรือรีดักชันที่ขั้วคาโทด ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยารับอิเล็กตรอนเกิดไม่รวดเร็วเพียงพอ อิเล็กตรอนที่มากเกินที่รอยต่อของผิวโลหะกับสารละลายนี้มีผลให้การกัดกร่อนลดลงได้ เรียกว่า cathodic polarization ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวรอยต่อเป็นลบมากขึ้น อีกกรณีคือ โลหะเกิดการกัดกร่อน ให้อิเล็กตรอนไปที่รอยต่อผิวโลหะกับสารละลายน้อย หรือไม่เพียงพอ จะมีผลให้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวรอยต่อเป็นบวกมากขึ้น จะเรียกว่า anodic polarization ในกรณีนี้จะมีผลในการเร่งการกัดกร่อน ให้อิเล็กตรอนมากและเร็วขึ้นเพื่อผลิตอิเล็กตรอนให้เพียงพอ ดังนั้นโพล่าไรเซชัน (polarization) จึงเป็นการเปลี่ยนแปลงอัตราการกัดกร่อนเนื่องจากการให้และรับอิเล็กตรอนไม่สัมพันธ์กันนั่นเอง ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวโลหะที่สัมผัสกับสารละลายที่มีค่าเป็นบวกมากกว่า มีแนวโน้มว่าจะเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายและเร็วกว่า ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากโลหะ และสารละลาย

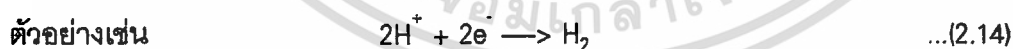
ดังนั้น cathodic polarization ก็คือ การเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วปฏิกิริยา (การกัดกร่อน) ที่ถูกควบคุมโดยอัตราเร็วของปฏิกิริยารีดักชันที่คาโทด

และ anodic polarization คือ การเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วปฏิกิริยาที่ถูกควบคุมโดยอัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอโนด

ลักษณะของ cathodic และ anodic polarization จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.1

โพล่าไรเซชัน (Polarization, η)<sup>4</sup> สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

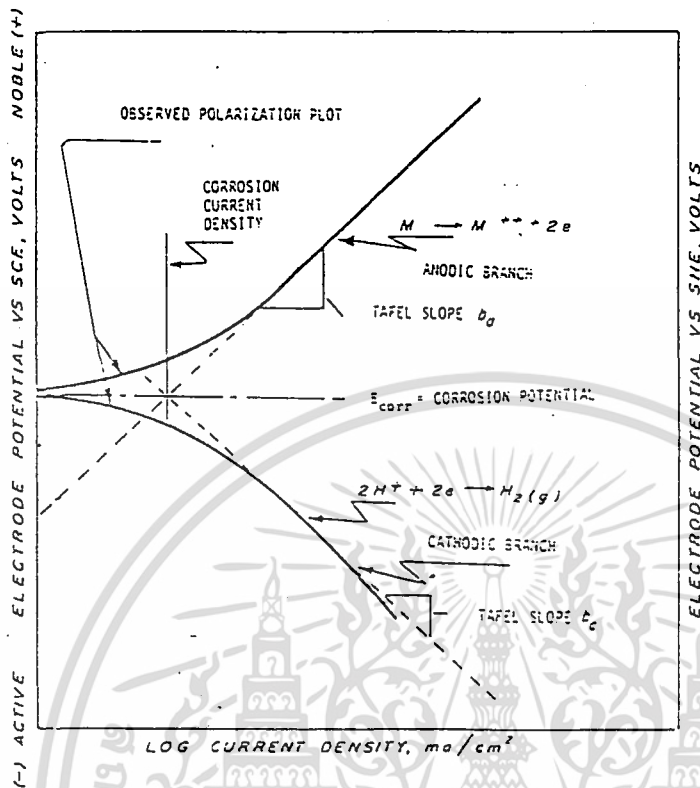
1.Activation Polarization จะเป็นขบวนการเคมีไฟฟ้าที่ถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของโลหะ เช่น การกัดกร่อนของโลหะในกรด



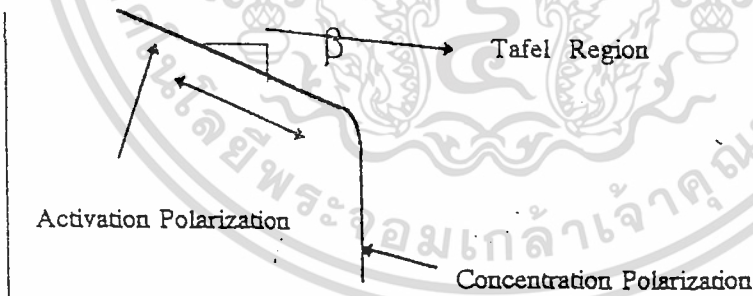
จะทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะปกคลุมผิวคาโทด ไอออนในสารละลายเข้าไปรับอิเล็กตรอนไม่สะดวก ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่แอโนดลดลงไปด้วย

2.Concentration Polarization เป็นขบวนการเคมีไฟฟ้าที่ถูกควบคุมโดยการแพร่ในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งสามารถทำให้ลดลงได้โดยการคนสารละลาย

โดยทั่วไปการเกิด concentration polarization มักจะเกิดควบคู่กับ activation polarization ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 แสดง cathodic และ anodic polarization<sup>14</sup>

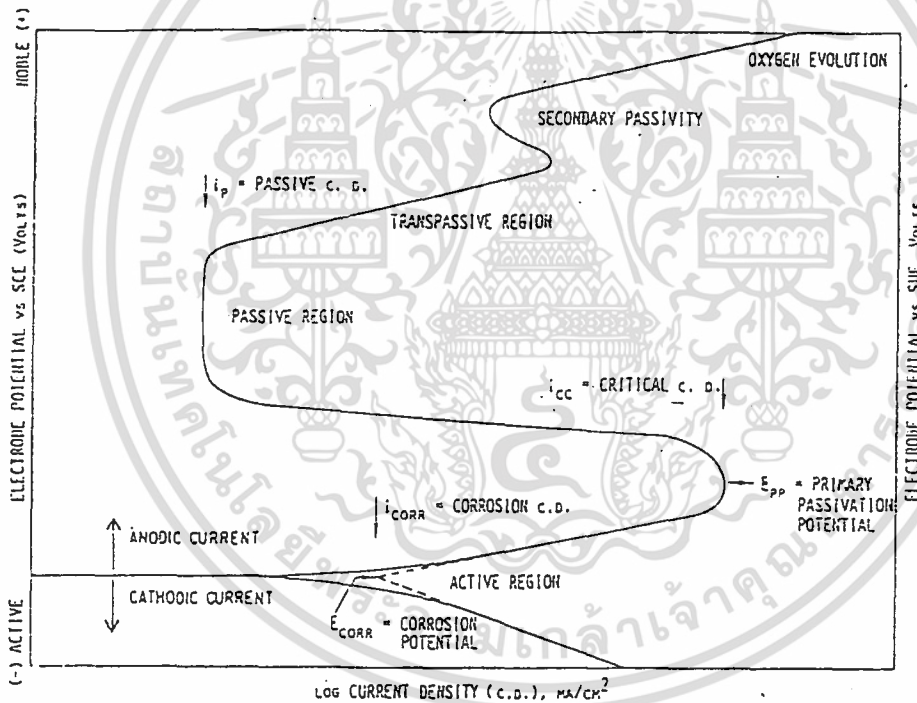


รูปที่ 2.2 แสดง activation concentration polarization<sup>12</sup>

เราสามารถทำนายพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะจาก Polarization curve โดยถ้าเรานำโลหะชนิดหนึ่งจุ่มในสารละลายชนิดหนึ่ง ทำการตั้งทิ้งไว้ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวโลหะที่สัมผัสกับสารละลาย จะมีค่าเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง เรียกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน (corrosion potential) หรือ  $E_{\text{corr}}$  มีค่าขึ้นกับความสามารถ และความเร็วของการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนของ 2 ปฏิกิริยา

คือปฏิกิริยาให้และรับอิเล็กตรอน โดยปกติถ้าเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวรอยต่อให้สูงกว่า  $E_{cor}$  อัตราการกัดกร่อนหรืออัตราเร็วของปฏิกิริยาให้อิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้น ซึ่งโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนต่ำกว่า จะเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายกว่า

เมื่อโลหะเกิดการกัดกร่อนจะมีไอออนของโลหะเกิดขึ้น และเกิดเป็นออกไซด์ฟิล์มเคลือบผิวไว้ ทำให้กระแสลดลงจนคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และเมื่อยังทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าต่อไป อัตราการกัดกร่อนจะลดลงจนคงที่ หรือเกือบคงที่ ทั้งนี้ เพราะฟิล์มสามารถทนต่อศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้ เรียกช่วงที่เกิดนี้ว่า passive region ช่วงความยาวของ passive region จะบอกถึงประสิทธิภาพของโลหะในสารละลายนั้น ดังนั้นการใช้โลหะในสารละลาย ควรใช้ในช่วงของศักย์ที่เกิดฟิล์มบาง (passive film) จะดีที่สุด เมื่อศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น ฟิล์มจะเกิดการแตกออก และทำให้เกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.3 แสดง cathodic และ anodic Polarization สำหรับ passive ที่อาโนด<sup>14</sup>

ในการเกิด polarization นั้นนอกจากขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของโลหะแล้ว ยังขึ้นอยู่กับสารละลาย และพื้นที่ของอาโนดและคาโทดด้วย<sup>4</sup>

## 2.4 ผลของสิ่งแวดล้อมต่อการกัดกร่อน<sup>1</sup>

- 1.ผลของ pH
- 2.ผลของออกซิเจนและ oxidising agent
- 3.ผลของอัตราการไหล และความเร็ว ของสารกัดกร่อน
- 4.ผลของอุณหภูมิ
- 5.ผลของความเข้มข้นของสารกัดกร่อน

## 2.5 รูปแบบของการกัดกร่อน<sup>1,2,4</sup>

การกัดกร่อนแบ่งเป็นประเภทต่างๆ ตามลักษณะที่เกิด ซึ่งส่วนใหญ่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า บางกรณีอาจต้องใช้กำลังขยายสูงเพื่อความมั่นใจ การพิจารณาสภาพการกัดกร่อนว่าเป็นการกัดกร่อนแบบใด หรือเกิดจากสาเหตุอะไร ต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับสภาพการใช้งานของชิ้นงานที่ถูกกัดกร่อน และไม่ควรล้าง หรือขัดคราบสนิมออก เพราะข้อมูลที่เป็นประโยชน์อาจถูกกำจัดไปในขณะทำความสะอาด

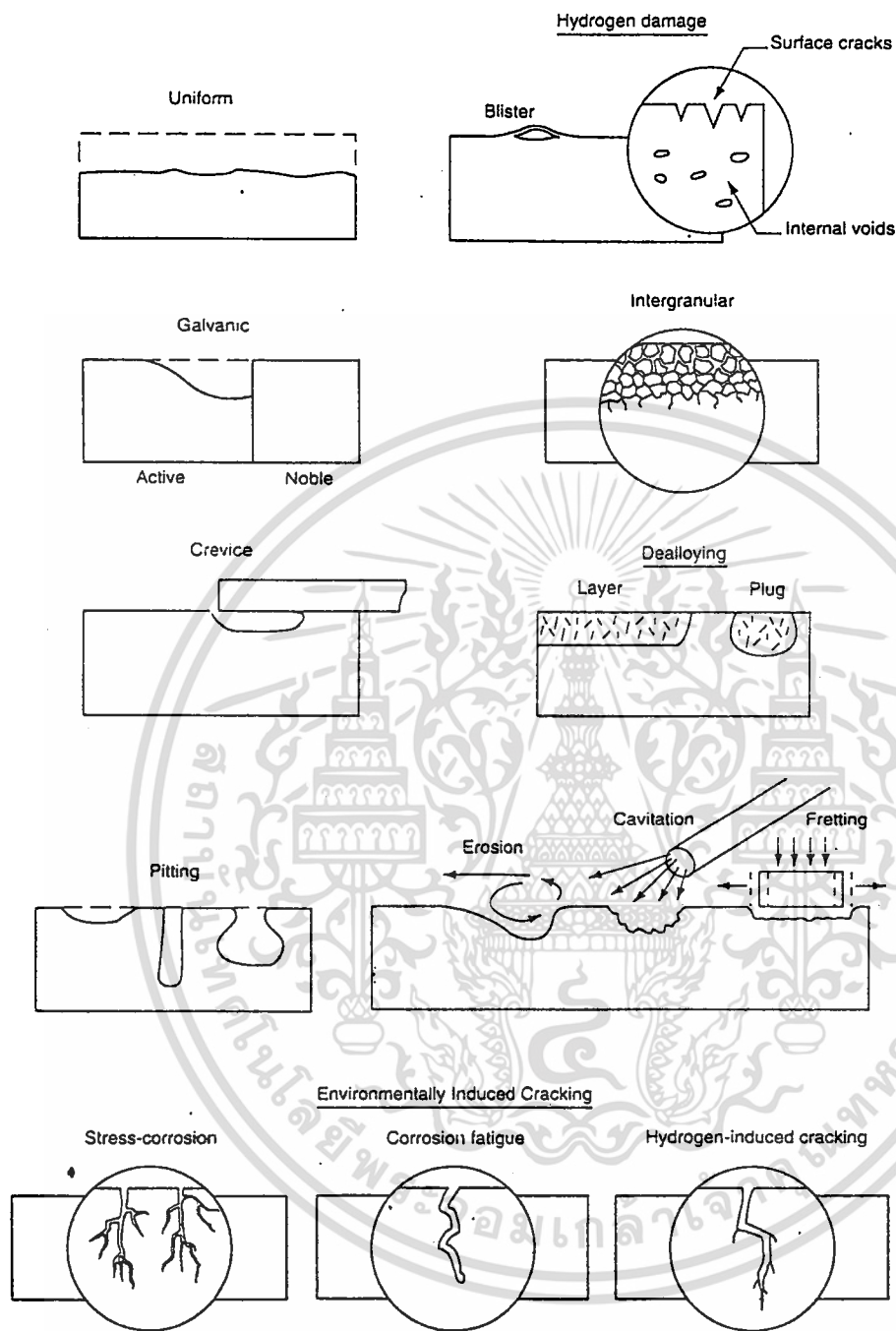
การกัดกร่อนแต่ละแบบมีลักษณะเฉพาะตัว ซึ่งการกัดกร่อนที่เกิดอาจเกิดขึ้นร่วมกัน รูปแบบของการกัดกร่อนแสดงดังรูปที่ 2.4 แบ่งได้เป็นดังนี้ คือ

1.Uniform Corrosion เป็นการกัดกร่อนที่พบมากที่สุด โดยโลหะจะถูกกัดกร่อนอย่างสม่ำเสมอทั่วผิวโลหะนั้น จะทำให้โลหะบางลงเรื่อยๆ และสามารถทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อของโลหะมากที่สุด การเกิดการกัดกร่อนแบบนี้จะทำให้อายุการใช้งานสั้นลง เช่น การเกิดสนิม

### การป้องกัน

- เลือกวัสดุที่เหมาะสม รวมทั้งการทาสีผิวที่ชิ้นงาน
- ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน
- ใช้เทคนิคการป้องกันการกัดกร่อนแบบคาโทด

2.Galvanic Corrosion เป็นการกัดกร่อนที่เกิดจากโลหะ 2 ชนิดที่ต่างกัน มาสัมผัสกัน และจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เดียวกัน จะทำให้โลหะที่มีศักย์ต่ำกว่า จะเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย ตารางศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (standard electromotive force,EMF) จะแสดงถึงค่าศักย์ไฟฟ้าของโลหะแต่ละชนิด ดังตารางที่ 2.1 และสามารถใช้ในการบอกความยากง่ายในการเกิดการกัดกร่อนได้ แต่เนื่องจากสภาวะการใช้งานจริงโลหะที่ใช้มักเป็นโลหะผสม ดังนั้นตารางที่ใช้งานได้กว้างขวางกว่าคือตารางที่ 2.2



Schematic summary of the various forms of corrosion.

### รูปที่ 2.4 รูปแบบของการกัดกร่อน\*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 9  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน<sup>4</sup>

Standard Electromotive Force Potentials (Reduction Potentials)

|  | Reaction   | Standard Potential, $e^\circ$<br>(volts vs. SHE) |
|--|--|--|
| Noble  | $\text{Au}^{3+} + 3e^- = \text{Au}$  | +1.498   |
|  | $\text{Cl}_2 + 2e^- = 2\text{Cl}^-$  | +1.358   |
|  | $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^- = 2\text{H}_2\text{O}$ (pH 0)               | +1.229   |
|  | $\text{Pt}^{3+} + 3e^- = \text{Pt}$  | +1.2   |
|  | $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- = 4\text{OH}^-$ (pH 7) <sup>a</sup> | +0.82  |
|  | $\text{Ag}^+ + e^- = \text{Ag}$  | +0.799   |
|  | $\text{Hg}_2^{2+} + 2e^- = 2\text{Hg}$                                       | +0.788   |
|  | $\text{Fe}^{3+} + e^- = \text{Fe}^{2+}$                                      | +0.771   |
|  | $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- = 4\text{OH}^-$ (pH 14)             | +0.401   |
|  | $\text{Cu}^{2+} + 2e^- = \text{Cu}$  | +0.337   |
|  | $\text{Sn}^{4+} + 2e^- = \text{Sn}^{2+}$                                     | +0.15  |
|  | $2\text{H}^+ + 2e^- = \text{H}_2$  | 0.000  |
|  | $\text{Pb}^{2+} + 2e^- = \text{Pb}$  | -0.126   |
|  | $\text{Sn}^{2+} + 2e^- = \text{Sn}$  | -0.136   |
|  | $\text{Ni}^{2+} + 2e^- = \text{Ni}$  | -0.250   |
|  | $\text{Co}^{2+} + 2e^- = \text{Co}$  | -0.277   |
|  | $\text{Cd}^{2+} + 2e^- = \text{Cd}$  | -0.403   |
|  | $\text{Fe}^{2+} + 2e^- = \text{Fe}$  | -0.440   |
|  | $\text{Cr}^{3+} + 3e^- = \text{Cr}$  | -0.744   |
| $\text{Zn}^{2+} + 2e^- = \text{Zn}$                      | -0.763   |  |
| $2\text{H}_2\text{O} + 2e^- = \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ | -0.828   |  |
| Active   | $\text{Al}^{3+} + 3e^- = \text{Al}$  | -1.662   |
|  | $\text{Mg}^{2+} + 2e^- = \text{Mg}$  | -2.363   |
|  | $\text{Na}^+ + e^- = \text{Na}$  | -2.714   |
|  | $\text{K}^+ + e^- = \text{K}$  | -2.925   |

<sup>a</sup>Not a standard state but included for reference.

Source: A. J. deBethune and N. S. Loud, Standard Electrode Potentials and Temperature Coefficients. 2SC, Clifford A. Hampel, Skokie, Ill., 1964.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ -10- เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงศักวานิกของโลหะและโลหะผสม<sup>2</sup>

|   |  |
|---|--|
| ↑<br>Noble or<br>cathodic                 | Platinum                                       |
|   | Gold   |
|   | Graphite                                       |
|   | Titanium                                       |
|   | Silver   |
|   | [ Chlorimet 3 (62 Ni, 18 Cr, 18 Mo)            |
|   | [ Hastelloy C (62 Ni, 17 Cr, 15 Mo)            |
|   | [ 18-8 Mo stainless steel (passive)            |
|   | [ 18-8 stainless steel (passive)               |
|   | [ Chromium stainless steel 11-30% Cr (passive) |
|   | [ Inconel (passive) (80 Ni, 13 Cr, 7 Fe)       |
|   | [ Nickel (passive)                             |
|   | Silver solder                                  |
|   | [ Monel (70 Ni, 30 Cu)                         |
|   | [ Cupronickels (60-90 Cu, 40-10 Ni)            |
| [ Bronzes (Cu-Sn)                         |  |
| Copper                                    |  |
| [ Brasses (Cu-Zn)                         |  |
| [ Chlorimet 2 (66 Ni, 32 Mo, 1 Fe)        |  |
| [ Hastelloy B (60 Ni, 30 Mo, 6 Fe, 1 Mn)  |  |
| [ Inconel (active)                        |  |
| [ Nickel (active)                         |  |
| Tin                                       |  |
| Lead                                      |  |
| Lead-tin solders                          |  |
| [ 18-8 Mo stainless steel (active)        |  |
| [ 18-8 stainless steel (active)           |  |
| Ni-Resist (high Ni cast iron)             |  |
| Chromium stainless steel, 13% Cr (active) |  |
| [ Cast iron                               |  |
| [ Steel or iron                           |  |
| 2024 aluminum (4.5 Cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn)    |  |
| Active or<br>anodic                       | Cadmium  |
|   | Commercially pure aluminum (1100)              |
|   | Zinc   |
| ↓   | Magnesium and magnesium alloys                 |

### การป้องกัน

-หากไม่สามารถหลีกเลี่ยงการใช้โลหะ 2 ชนิดสัมผัสกัน ควรเลือกโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าใกล้เคียงกัน

-หลีกเลี่ยงการใช้โลหะที่มีพื้นที่ผิวน้อยเป็นอาโนด

-ทาสี หรือเคลือบโลหะที่เป็นคาโทด

-ใช้สารยับยั้งเพื่อลดความรุนแรงของการกัดกร่อน

-ใช้วิธีการป้องกันแบบคาโทด โดยหาโลหะอื่นที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าโลหะทั้ง 2 ชนิดที่ใช้งานมาต่อเข้ากับโลหะที่ต้องการป้องกัน

3.Crevice Corrosion เป็นการกัดกร่อนที่เกิดจากความแตกต่างของปริมาณโลหะไอออน หรือความเข้มข้นของออกซิเจน ซึ่งเกิดการกัดกร่อนในบริเวณสัมผัสของข้อต่อ หรือบริเวณใต้ที่อับต่างๆ

### การป้องกัน

-ใช้การเชื่อมโลหะ 2 แผ่นให้ติดกันแทนการยึดด้วยน๊อต หรือปิดรอยแยกต่างๆ ด้วยการเชื่อม

-ออกแบบอุปกรณ์ไม่ให้มีสารละลายตกค้างอยู่ในชิ้นส่วน

-หมั่นทำความสะอาดเครื่องมือและอุปกรณ์อยู่เสมอ

4.Pitting Corrosion เป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงาน มีลักษณะเป็นจุด ๆ มีการสูญเสียเนื้อของโลหะน้อย แต่เป็นการกัดกร่อนที่เป็นผลเสีย เนื่องจากมองจากลักษณะภายนอกจะเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ยาก ซึ่งเกิดเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอในเนื้อโลหะ การเกิดรอยรูดขีดบริเวณผิวโลหะ

### การป้องกัน

-สามารถทำการป้องกันแบบเดียวกับการกัดกร่อนแบบ Crevice

5.Environmentally Induced Cracking สามารถแบ่งได้เป็น stress corrosion, corrosion fatigue และ hydrogen induced cracking

-stress corrosion เมื่อวัสดุได้รับแรงเค้นจากสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการกัดกร่อน อาจจะเป็นรอยร้าว หรือรอยแตก

-corrosion fatigue ในกรณีนี้ชิ้นงานถูกแรงเค้นซ้ำแล้วซ้ำอีกจากสภาวะแวดล้อม ทำให้เกิดความเสียหาย โดยทำให้รอยแตกแผ่ขยาย ทำให้ชิ้นงานเสียไปในที่สุด

-hydrogen induced cracking มีสาเหตุมาจากการแพร่ของไฮโดรเจน ลักษณะการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะคล้ายกับ stress corrosion

#### การป้องกัน

- ลดค่าความเค้นที่เหลืออยู่โดยการอบร้อน
- ลดความรุนแรงของสภาวะแวดล้อม
- เลือกใช้โลหะที่ทนต่อสภาวะแวดล้อมของการใช้งาน
- ใช้การป้องกันแบบคาโทด
- ใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน

6. Hydrogen Damage เกิดจากการที่โลหะดูดซับไฮโดรเจนในรูปของอะตอม ซึ่งมาจากการแตกตัวของสารละลาย แล้วทำให้โลหะนั้นสูญเสียความยืดหยุ่นไป เกิดความเปราะ บวม และมีรอยแตกร้าวขึ้น

#### การป้องกัน

- เลือกใช้เหล็กกล้าที่มีช่องว่างหรือโพรงภายในให้น้อยที่สุด
- การใช้สารยับยั้งเพื่อลดอัตราการกัดกร่อน และปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนไอออนในขณะผ่านกระบวนการล้าง (pickling) ซึ่งจะมีการกัดกร่อนเกิดขึ้นอย่างมาก
- การเคลือบผิวชิ้นงานด้วยโลหะ สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ รวมทั้งการบุภายในด้วยยาง หรือพลาสติก

7. Intergranular Corrosion เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นระหว่างเกรนของตัวอย่าง เนื่องมาจากการสูญเสียธาตุบางอย่างที่ชอบในการต้านทานการกัดกร่อน โลหะที่เกิดการกัดกร่อนแบบนี้บ่อยได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม

#### การป้องกัน

- ป้องกันไม่ให้เกิดโครเมียมคาร์ไบด์ตามขอบเกรน โดยการอบที่อุณหภูมิสูง การใส่โลหะอื่นเพื่อฟอร์มคาร์ไบด์ได้ไวกว่าโครเมียม และการเลือกใช้เหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.03% เพื่อไม่ให้คาร์บอนมาจับกับโครเมียม

8. Dealloying and Dezincification โลหะผสมที่ประกอบด้วยโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โลหะที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าจะเกิดการกัดกร่อน เช่น ทองเหลือง (ทองแดง+สังกะสี) จะสูญเสียสังกะสีไป ทำให้ทองเหลืองที่เหลืออยู่ ส่วนมากเป็นทองแดง ทำให้มีสีแดงขึ้น

#### การป้องกัน

- ลดความรุนแรงของสภาวะแวดล้อม

-ใช้การป้องกันการกัดกร่อนแบบคาโทด

9.Erosion Corrosion เกิดขึ้นจากความเร็วของสารที่กัดกร่อนมากระแทกผิวหน้าของชิ้นงาน ทำให้เกิดการสึกกร่อนอย่างรวดเร็ว

การป้องกัน

-เลือกใช้วัสดุที่มีความต้านทานการกัดกร่อนแบบนี้สูง

-ออกแบบทิศทางการไหลของสารละลายให้เหมาะสม

-เปลี่ยนสภาวะแวดล้อมของโลหะ โดยลดปริมาณออกซิเจนในสารละลาย หรือเติมสารยับยั้ง แต่ค่าใช้จ่ายจะสูง

## 2.6 การป้องกันการกัดกร่อน<sup>1</sup>

การป้องกันการกัดกร่อนโดยทั่วไป อาจทำได้โดยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

1.การเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนให้กับวัสดุ เช่น การเคลือบผิวของภาชนะบรรจุ

2.การขจัดสิ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมให้ลดลง หรือหมดไป

3.การออกแบบป้องกัน และการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสม

-การป้องกันการกัดกร่อนโดยปรับสภาวะแวดล้อม แบ่งได้เป็น

1.การขจัดองค์ประกอบที่เร่งการกัดกร่อน เช่น การขจัดความชื้น อากาศ ความร้อน และค่า pH

2.การใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน

-การแยกโลหะออกจากสภาวะแวดล้อมเพื่อป้องกันการกัดกร่อน

โลหะที่สามารถถูกกัดกร่อนได้ง่าย จะทำการป้องกันการกัดกร่อนโดยการเคลือบผิว ซึ่งแบ่งเป็นการเคลือบผิวด้วยโลหะ สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

-การป้องกันโดยใช้ไฟฟ้า

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

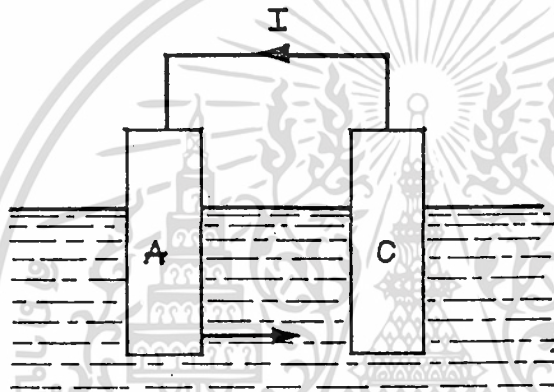
1.การป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้ไฟฟ้าแบบอาโนดิก

เป็นการป้องกันการกัดกร่อนโดยอาศัยหลักการใช้กระแสไฟฟ้าจากภายนอก ทำให้โลหะที่ต้องการป้องกันเป็นอาโนด และเกิดฟิล์มป้องกันบนผิวของอาโนดเพื่อลดอัตราการกัดกร่อนให้น้อยลง กระแสไฟฟ้าที่ใช้ทำให้เกิดฟิล์มบนผิวโลหะจะสูง แต่เมื่อเกิดฟิล์มแล้วกระแสไฟฟ้าที่ใช้รักษาฟิล์มจะลดลง มีค่าต่ำมาก

การป้องกันการกัดกร่อนแบบนี้ ไม่สามารถใช้ได้กับโลหะทุกชนิด เพราะโลหะบางชนิดเท่านั้นที่เกิดฟิล์มบนผิวได้ เช่น เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) โครเมียม (Cr) ทิตาเนียม (Ti) และ โคบอล (Co)

## 2. การป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้ไฟฟ้าแบบคาโทดิก

การป้องกันการกัดกร่อน จะทำโดยให้โลหะที่ต้องการป้องกันการกัดกร่อนทำตัวเปรียบเสมือนเป็นคาโทด ดังรูปที่ 2.5 A คือ อานอดที่เข้ามารวมในวงจร I คือ กระแสที่มีทิศทางป้องกัน และ C คือ คาโทด การกัดกร่อนของโลหะ ถ้าค่าของกระแสเพียงพอ จะไม่มีส่วนใดส่วนหนึ่งของโลหะต้องกลายเป็นอานอด และถูกกัดกร่อนไปเลย ตามตารางที่ 2.1 จะเป็นค่าศักย์ไฟฟ้าที่เพียงพอในการป้องกันโลหะแต่ละชนิด



รูปที่ 2.5 แสดงทิศทางการไหลของกระแสจากอานอด (A) ไปยังคาโทด (C) เมื่อเกิดการกัดกร่อนของโลหะ<sup>1</sup>

## 2.7 การป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน

สารยับยั้งการกัดกร่อน (corrosion inhibitor)<sup>4,7,9,13</sup> เป็นสารเคมีที่ช่วยลดอัตราการกัดกร่อน โดยเติมลงไปในระบบ ในความเข้มข้นที่เหมาะสม โดยไม่ทำให้ความเข้มข้นของสารกัดกร่อนในระบบเปลี่ยนแปลงไป

สารยับยั้งการกัดกร่อน (corrosion inhibitor) จะใช้มากในระบบต่อไปนี้<sup>13</sup>

1. ในระบบที่มีการใช้น้ำในช่วง pH = 5-9 เช่น ระบบน้ำหล่อเย็นในอุตสาหกรรม
2. ในสารละลายกรด ที่ใช้ในการทำความสะอาดโลหะ (pickling) เช่น การกำจัดสนิม
3. ขบวนการกลั่นน้ำมัน ในผลิตภัณฑ์น้ำมันชั้นที่ 1 และ 2

ตัวอย่างสารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ใน 3 ระบบนี้ ดังตารางที่ 2.3

## ตารางที่ 2.3 สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ใช้ในอุตสาหกรรม<sup>4</sup>

| Environment                        | Sample Inhibitors   |
|------------------------------------|---|
| <b>Waters</b>                      |   |
| Potable water                      | CaCO <sub>3</sub> deposition, silicates, polyphosphates, zinc salts   |
| Recirculating cooling water        | Chromate, nitrate at 300–500 ppm<br>calcium polyphosphates at 15–37 ppm<br>silicates at 20–40 ppm   |
| Automotive coolants                | Nitrite, benzoate, borax, phosphate<br>sodium mercaptobenzothiazole, benzotriazole  |
| Steam condensates                  | Neutralizers: ammonia, morpholine, cyclohexamine, benzylamine<br>long chain aliphatic amines such as octdecylamine at 1–3 ppm                               |
| Brines and seawater                | Refrigeration brines: chromates, 2000–3300 ppm<br>diluted seawater: sodium nitrite, 3–10%<br>hot desalting brines: mixed chromate and phosphate, 50–100 ppm |
| <b>Acid Pickling Solutions</b>     |   |
| Sulfuric acid                      | Phenylthiourea, di-ortho-tolyl-thiourea, mercaptans, sulfides, 0.003–0.01%  |
| Hydrochloric acid                  | Pyridine, quinoline, various amines, decylamine, phenylthiourea, dibenzylsulfoxides   |
| <b>Oil Production and Refining</b> |   |
| Primary and secondary recovery     | Fatty imidazolines, various amines including primary amine, diamines, amido-amines, oxyethylated primary amines, alkyl pyridines, quaternized amines        |
| Refining                           | Imidazoline and derivatives   |

Compiled from Mercer<sup>14</sup>

การแบ่งประเภทของสารยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibitor Classifications) สามารถแบ่งได้หลายลักษณะดังต่อไปนี้<sup>1,13,17</sup>

**1.Safe or dangerous inhibitors** สารยับยั้งการกัดกร่อนจะต้องมีประสิทธิภาพที่ความเข้มข้นต่ำ ซึ่งถ้าความเข้มข้นของสารยับยั้งไม่เหมาะสม ก็อาจจะทำให้เป็นสารยับยั้งที่เป็นอันตรายได้ เช่น เกิด pitting หรือบางกรณีอาจทำให้เกิดความเสียหายมากกว่าไม่ใช้สารยับยั้งเลย

**2.Anodic or cathodic inhibitors** การแบ่งในลักษณะนี้จะมีพื้นฐานมาจากการเกิดโพลาไรเซชัน (Polarization) ของปฏิกิริยาที่แอโนด เช่น การแตกตัวของโลหะ (metal dissolution) หรือป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะและคาโทด เช่น ปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (near-neutral solutions) หรือ การเกิดไฮโดรเจน (acid solution)

3.Oxidising or non-oxidising inhibitors เป็นการแบ่งสารยับยั้งการกัดกร่อนโดยใช้ความสามารถในการเกิดออกไซด์ฟิล์มของโลหะ (passivation on the metal) คือ non-oxidising inhibitors จะมีการละลายของออกซิเจนในสารละลายในการเกิดออกไซด์ฟิล์ม

4.Organic or inorganic inhibitors จะแบ่งโดยอาศัยลักษณะทางเคมีของสารยับยั้ง  
-สารยับยั้งที่เป็นสารอินทรีย์ในธรรมชาติ เช่น แทนนิน เจลาติน ผงแป้ง และกลุ่มน้ำตาลโมเลกุลใหญ่ หรือสารประกอบไนโตรเจน ออกซิเจน และกำมะถัน ซึ่งจะเข้ากับผิวของโลหะ เกิดเป็นฟิล์มป้องกัน

-สารยับยั้งที่เป็นสารอนินทรีย์ จะเป็นพวกเกลือของกรด โครเมต ฟอสเฟต ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะทำให้เกิดฟิล์ม หรือเกิด passivation ที่ผิว ป้องกันการกัดกร่อนได้

ตัวอย่างประเภทของสารเคมีในการเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน<sup>13</sup>

ในระบบบำบัดน้ำ (water treatment) จะมีทั้งการควบคุมปริมาณอากาศและ pH โดยในระบบจะมีการขจัดก๊าซโดยใช้เครื่องมือ หรือสารเคมีในการควบคุมการกัดกร่อน เช่น โซเดียมซัลไฟด์ หรือ ไฮดรอกไซด์

การควบคุม pH เช่น การใช้ alkaline เช่น caustic soda ,lime และ soda ash

ในสารละลายในช่วงที่เป็นกลาง (near neutral) สารยับยั้งที่ใช้เป็นประเภท anodic โดยทั่วไปใช้ในการปรับปรุง หรือเสริมแรง ของออกไซด์ฟิล์มของโลหะและอัลลอยด์ หรือการใช้ polyphosphates silicates, zinc ions, tannins และ soluble oils ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของ cathodic ที่มีผลต่อปฏิกิริยาที่แอโนด

สารยับยั้งประเภท cathodic จะมีข้อเสียที่น้อยกว่าประเภท anodic ในการป้องกันโลหะ แต่โดยทั่วไปประเภท cathodic จะมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าในการลดอัตราการกัดกร่อน

ในสภาวะที่เป็นกรดอาจจะไม่เกิดออกไซด์ฟิล์มที่ผิวของโลหะ ดังนั้นสารยับยั้งต้อง adsorb หรือ เกิดพันธะโดยตรงกับผิวของโลหะ หรือเกิด overpotential ของไฮโดรเจนไอออน ซึ่งโดยทั่วไปสารยับยั้งจะเป็นสารอินทรีย์ ที่ประกอบด้วยอะตอมของไนโตรเจน ซัลเฟอร์ หรือ ออกซิเจน ที่มีคู่อิเล็กตรอนอิสระ

และโดยมากจะใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนเพียงตัวเดียว แต่ก็จะมีการใช้สารยับยั้งมากกว่า 1 ตัว เพราะการใช้สารยับยั้งเพียงตัวเดียวมีข้อจำกัดของประสิทธิภาพในการป้องกันโลหะ ซึ่งอาจจะมีโลหะมากกว่า 1 ตัวในระบบ และการใช้สารยับยั้งที่มีทั้ง anodic และ cathodic จะมีประโยชน์มากกว่า ในการใช้สารยับยั้งตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป เรียกว่า “synergised” treatments

หลักการทั่วไปในการป้องกันโดยใช้สารยับยั้งการกัดกร่อน คือ สารยับยั้งที่มีประสิทธิภาพกับโลหะชนิดหนึ่ง อาจจะไม่ีประสิทธิภาพกับโลหะชนิดอื่น ดังตารางที่ 2.4 หรือสารยับยั้ง อาจจะถูกเรียกว่า “polarity reversal” คือผิวของโลหะจะต้องสะอาด ไม่มีสิ่งสกปรกอยู่ ปราศจาก น้ำมัน และผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน ซึ่งจะมีผลต่อความเข้มข้นของสารยับยั้งที่ใช้ นอกจากนี้ ยังจะขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม ทั้งอุณหภูมิในระบบ ค่า pH โดยการใช้สารยับยั้งในการป้องกันการกัดกร่อนจะต้องมีความเข้มข้นที่ต่ำ

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อน<sup>13</sup>

General guide to the effectiveness of various inhibitors in the near-neutral pH range

| Metal                          | Inhibitor |                     |                     |           |            |                      |                      |
|--------------------------------|-----------|---------------------|---------------------|-----------|------------|----------------------|----------------------|
|                                | Chromates | Nitrites            | Benzoates           | Barates   | Phosphates | Silicates            | Tannins              |
| Mild steel                     | Effective | Effective           | Effective           | Effective | Effective  | Reasonably effective | Reasonably effective |
| Cast iron                      | Effective | Effective           | Ineffective         | Variable  | Effective  | Reasonably effective | Reasonably effective |
| Zinc and zinc alloys           | Effective | Ineffective         | Ineffective         | Effective | —          | Reasonably effective | Reasonably effective |
| Copper and copper alloys       | Effective | Partially effective | Partially effective | Effective | Effective  | Reasonably effective | Reasonably effective |
| Aluminium and aluminium alloys | Effective | Partially effective | Partially effective | Variable  | Variable   | Reasonably effective | Reasonably effective |
| Lead-tin soldered joints       | —         | Aggressive          | Effective           | —         | —          | Reasonably effective | Reasonably effective |

การควบคุมโดยสารยับยั้งสามารถพิจารณาประสิทธิภาพได้จากการวิเคราะห์ทางเคมี และการประยุกต์ใช้เทคนิคที่เรียกว่า linear (resistance) polarization<sup>13</sup>

## 2.8 การใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้าในการศึกษาอัตราการกัดกร่อน

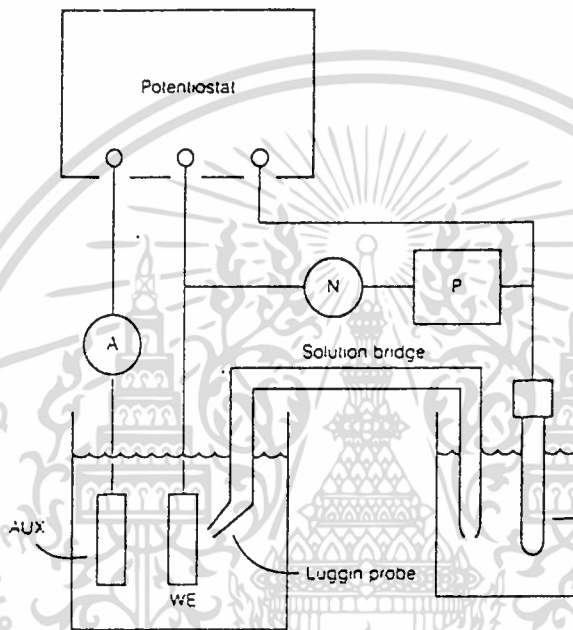
การศึกษาการกัดกร่อนโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า หลักการสำคัญเกี่ยวข้องกับ Polarization curve, Corrosion potential ( $E_{corr}$ ), Corrosion current ( $I_{corr}$ ) และ Tafel Region เทคนิคในการตรวจวัด จัดเป็นเทคนิคโวลแทมเมตรี (Voltammetry) โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับศักย์ไฟฟ้า เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้จะมีโลหะตัวอย่างเป็นขั้วทำงาน และขั้วอ้างอิงที่ใช้เป็นขั้วคาโธดลิเทียม (SCE) การติดตามค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสในวงจร ทำได้โดยการต่อขั้วที่ 3 โดยใช้ขั้วพัตินัม

ในการศึกษาการกัดกร่อนโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า มีเทคนิคที่สำคัญ คือ

1. เทคนิคการควบคุมกระแสที่ป้อน แล้ววัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้ หรือเปลี่ยนแปลงไป
2. เทคนิคการควบคุมศักย์ไฟฟ้าที่ป้อน แล้ววัดค่ากระแสที่ได้หรือเปลี่ยนแปลงไป

การเปลี่ยนแปลงของกระแสเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้า จะแสดงออกมาเป็น Polarization curve ซึ่งจะทราบค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน ช่วงของการเกิด passive และ depassive และบอกให้ทราบถึงลักษณะของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นได้

ในการวัด polarization ของปฏิกิริยาสามารถทำได้โดยการใช้เครื่อง Potentiostat<sup>6</sup> สามารถแสดงออกมาเป็น polarization curve วงจรของเครื่อง potentiostat จะเป็นดังรูปที่ 2.6 และลักษณะของเครื่องมือในการทดสอบการกัดกร่อนแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 วงจรของเครื่อง potentiostat<sup>4</sup>

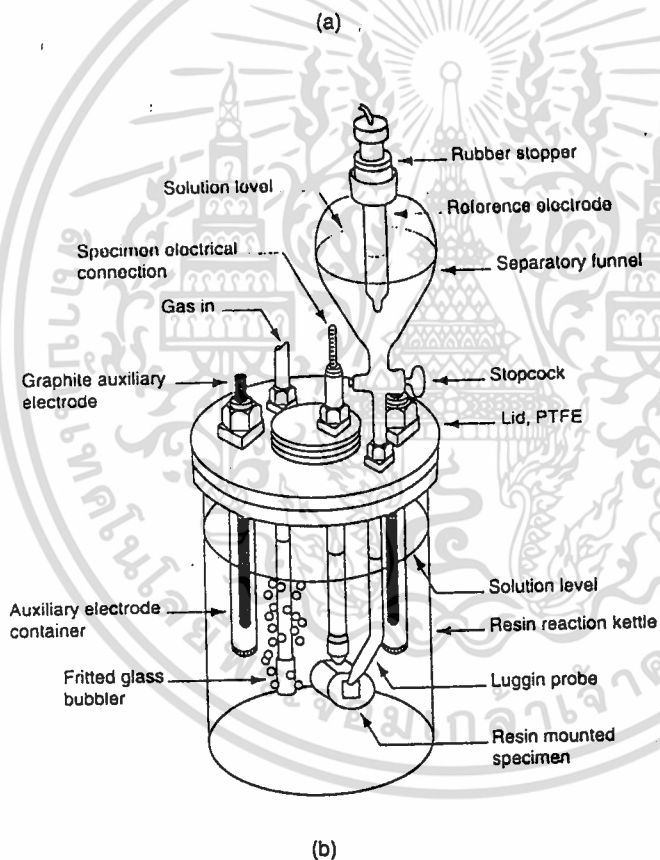
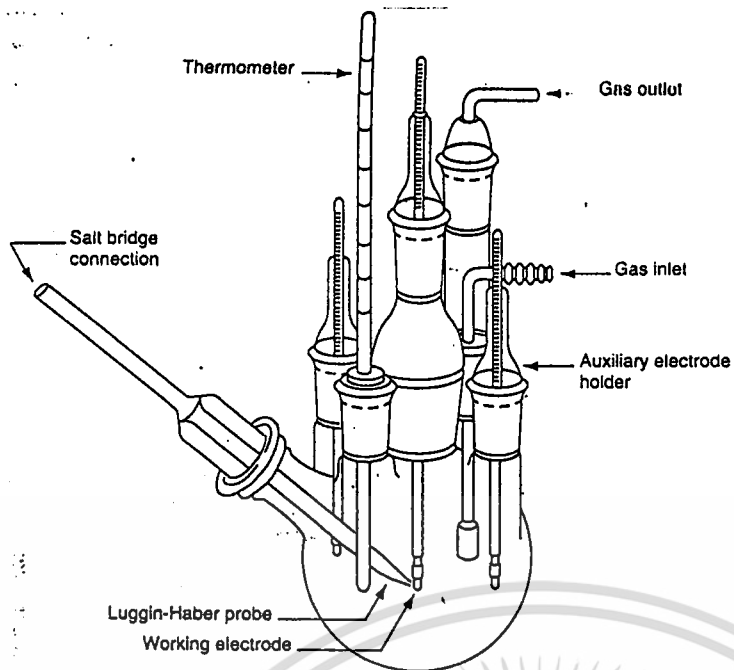
รายละเอียดของเทคนิคในการใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้าในการศึกษาอัตราการกัดกร่อน ได้แก่ ASTM G-3<sup>14</sup> และการศึกษาการวัด polarization และการใช้ potentiostat ในการวัดได้แก่ ASTM G-5<sup>15</sup>

การวัด Polarization resistance( $R_p$ ) เป็นค่าที่ได้จากเทคนิคที่เรียกว่า Linear Polarization ซึ่งเป็นเทคนิคที่ทำได้โดยควบคุม overvoltage ที่เกิดจากการกัดกร่อน และกระแสที่ให้เข้าไปเป็นส่วนโดยตรงกับกระแสที่เกิดการกัดกร่อน( $i_{appl}$ ,  $i_{corr}$ ) โดยที่  $R_p$  จะเป็นความชันของกราฟระหว่างกระแสกับศักย์ไฟฟ้าที่วัดในช่วงของศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการกัดกร่อน<sup>4,16</sup> ดังรูปที่ 2.8

$$\text{ซึ่งจะได้ว่า} \quad R_p = \frac{\Delta E}{i_{appl}} = B/i_{corr} \quad \dots(2.15)$$

$R_p$  คือ Polarization resistance       $B$  คือ Stern-Geary constant =  $b/2.303$

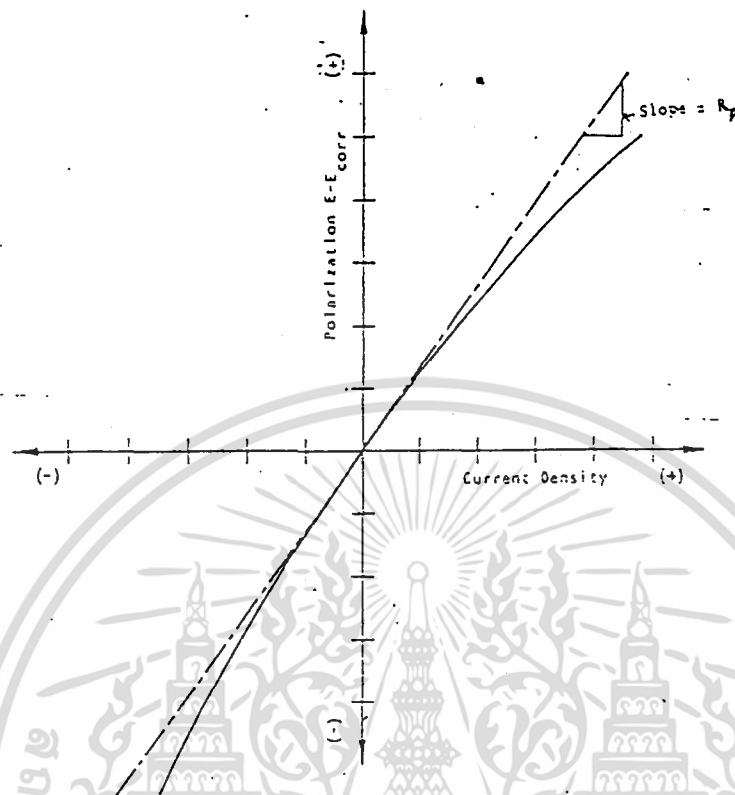
$b$  = activation controlled Tafel slope       $\Delta E$  คือ  $E - E_{corr}$



Electrochemical polarization cell designs: (a) commercially available model, (b) custom design using off-the-shelf components and minimal glass blowing. (From D. A. Jones and A. J. P. Paul, Hydro-metallurgical Reactor Design and Kinetics, R. G. Bautista, R. J. Wesley, and G. W. Warren, eds., *THS-AIME*, Warrendale, PA, p. 293, 1987. Reprinted by permission The Metallurgical Society.)

### รูปที่ 2.7 รูปแสดงเครื่องมือในการทดสอบการกัดกร่อน<sup>4</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



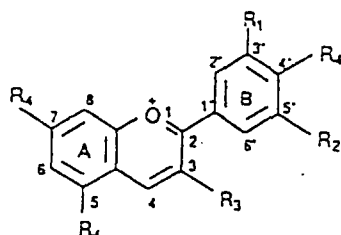
รูปที่ 2.8 Hypothetical Linear Polarization Plot<sup>14</sup>

จากเทคนิคนี้ เราสามารถใช้ในการเปรียบเทียบความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของสารยับยั้งการกัดกร่อนได้ โดยระบบที่มีค่า  $R_p$  มาก แสดงว่าโลหะนั้นสามารถเกิดฟิล์มบาง (Passive film) ได้ง่าย

## 2.9 สารประกอบแอนโทไซยานิน

แอนโทไซยานิน (anthocyanins)<sup>11</sup> เป็นสารที่สกัดได้จากส่วนประกอบของพืชที่มีสีแดงและม่วง เป็นสารประกอบที่มีสีขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน คือ มีสีแดงเมื่ออยู่ในสารละลายกรด มีสีม่วงเมื่ออยู่ในสารละลายที่เป็นกลาง และมีสีน้ำเงินเมื่ออยู่ในสารละลายเบส

แอนโทไซยานิน (anthocyanins)<sup>10</sup> หรือ flavanoids เป็นไกลโคไซด์ (glycosides) ของอนุพันธ์ของ polyhydroxy หรือ polymethoxy ของ 2-phenylbenzopyrylium หรือ flavylium salts ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 The flavylum cation.  $R_1$  and  $R_2$  are OH or  $OCH_3$ ;  $R_3$  is a glycosyl or H; and  $R_4$  is OH or glycosyl<sup>10</sup>

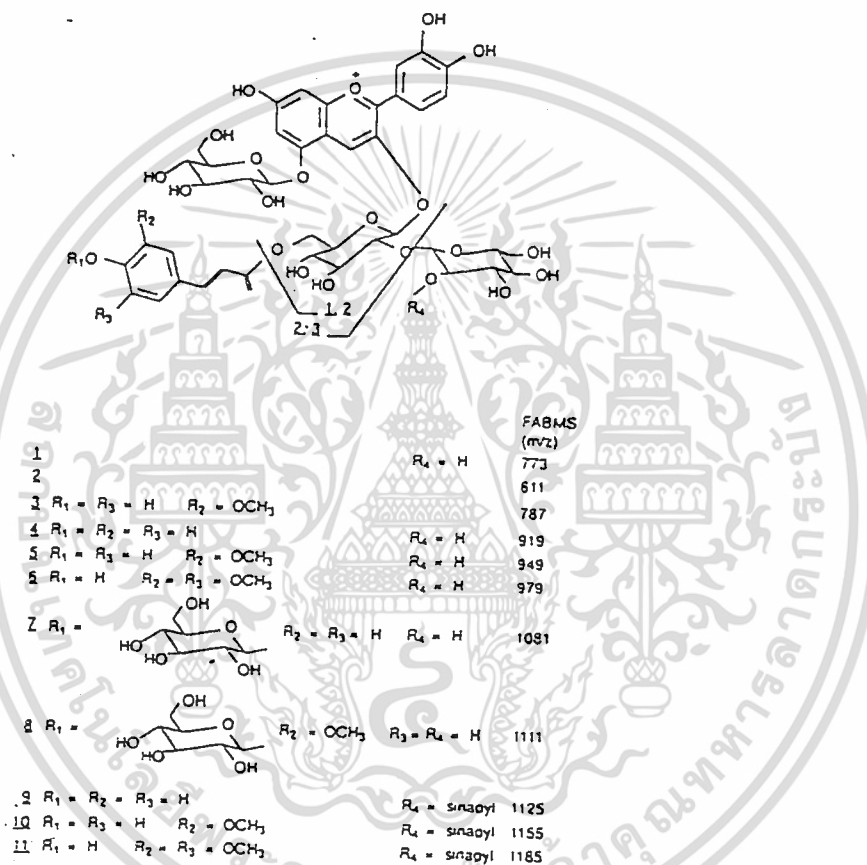
สารประกอบแอนโทไซยานิน เป็นสารประกอบแอนโทไซยานิดินที่มีโมเลกุลของน้ำตาลมาเกาะ ซึ่งสารประกอบแอนโทไซยานินมีได้หลายรูปแบบ แตกต่างกันที่จำนวนหมู่ไฮดรอกซิล และ/หรือ จำนวนหมู่เมทอกซีในโมเลกุล รวมถึงชนิดของน้ำตาลที่มาเกาะอยู่ด้วย สารประกอบแอนโทไซยานิดินโดยทั่วไปสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงสารประกอบแอนโทไซยานิดิน<sup>10</sup>

| Name                       | Substitution pattern |     |    |     |     |     |     | Color      |
|----------------------------|----------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|------------|
|                            | 3                    | 5   | 6  | 7   | 3'  | 4'  | 5'  |            |
| Apigeninidin (Ap)          | H                    | OH  | H  | OH  | H   | OH  | H   | Orange     |
| Aurantinidin (Au)          | OH                   | OH  | OH | OH  | H   | OH  | H   | Orange     |
| Capensinidin (Cp)          | OH                   | OMe | H  | OH  | OMe | OH  | OMe | Bluish-red |
| Cyanidin (Cy)              | OH                   | OH  | H  | OH  | OH  | OH  | H   | Orange-red |
| Delphinidin (Dp)           | OH                   | OH  | H  | OH  | OH  | OH  | OH  | Bluish-red |
| Europinidin (Eu)           | OH                   | OMe | H  | OH  | OMe | OH  | OH  | Bluish-red |
| Hirsutinidin (Hs)          | OH                   | OH  | H  | OMe | OMe | OH  | OMe | Bluish-red |
| 6-Hydroxycyanidin (6 OHCy) | OH                   | OH  | OH | OH  | OH  | H   |     | Red        |
| Luteolinidin (Lt)          | H                    | OH  | H  | OH  | OH  | OH  | H   | Orange     |
| Malvidin (Mv)              | OH                   | OH  | H  | OH  | OMe | OMe | OMe | Bluish-red |
| 5-Methylcyanidin (5-Mcy)   | OH                   | OMe | H  | OH  | OH  | H   |     | Orange-red |
| Pelargonidin (Pg)          | OH                   | OH  | H  | OH  | H   | OH  | H   | Orange     |
| Peonidin (Pn)              | OH                   | OH  | H  | OH  | OMe | OH  | H   | Orange-red |
| Perunidin (Pr)             | OH                   | OH  | H  | OH  | OMe | OH  | OH  | Bluish-red |
| Pulsellidin (Pl)           | OH                   | OMe | H  | OH  | OH  | OH  | OH  | Bluish-red |
| Rosinidin (Rs)             | OH                   | OH  | H  | OMe | OMe | OH  | H   | Red        |
| Tricinidin (Tr)            | H                    | OH  | H  | OH  | OH  | OH  | OH  | Red        |

สารประกอบแอนโทไซยานินสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะได้ และได้มีการศึกษาถึงสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอนโทไซยานินกับดีบุก พบว่าสามารถเกิด cathodic depolarization<sup>12</sup> และสารประกอบเชิงซ้อนของแอนโทไซยานินกับโลหะ เมื่อเคลือบบนโลหะ ตัวอย่าง พบว่าสารประกอบเชิงซ้อน สามารถป้องกันการกัดกร่อนของโลหะได้<sup>8</sup>

ในโครงการพิเศษ สารประกอบแอนโทไซยานินที่นำมาทำการศึกษา ได้แก่ สารประกอบแอนโทไซยานินในกะหล่ำปลีสีม่วง (red cabbage) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของสารประกอบแอนโทไซยานินในกะหล่ำปลีสีม่วง<sup>10</sup>

จากลักษณะโครงสร้างของสารประกอบแอนโทไซยานิน และสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อน เราจึงนำมาใช้ในการศึกษาสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ

## บทที่ 3

### การวิจัยและการดำเนินงาน

#### 3.1 วัสดุและเคมีภัณฑ์

|        |                          |                   |              |
|--------|--------------------------|-------------------|--------------|
| 3.1.1  | กะหล่ำปลีสีม่วง          |                   |              |
| 3.1.2  | กรดซिटริก                | บริษัท Merck      | เกรตวิเคราะห |
| 3.1.3  | เมทานอล                  | บริษัท J.T.Baker  | เกรตวิเคราะห |
| 3.1.4  | คลอโรฟอร์ม               | บริษัท J.T.Baker  | เกรตวิเคราะห |
| 3.1.5  | กรดไนตริก 65%            | บริษัท Merck      | เกรตวิเคราะห |
| 3.1.6  | โซเดียมคลอไรด์           | บริษัท Carlo Erba | เกรตวิเคราะห |
| 3.1.7  | โซเดียมคาร์บอเนต         | บริษัท Carlo Erba | เกรตวิเคราะห |
| 3.1.8  | โซเดียมไฮดรอกไซด์        | บริษัท Eka Nobel  | เกรตวิเคราะห |
| 3.1.9  | โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต | บริษัท Carlo Erba | เกรตวิเคราะห |
| 3.1.10 | อะซิโตน                  | บริษัท J.T.Baker  | เกรตวิเคราะห |
| 3.1.11 | ฟีนอล์ฟทาลีน             |                   |              |

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.2.1 แผ่นเหล็ก St 37
- 3.2.2 เครื่องทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Potentiostat/GPES/PGSTAT10)
- 3.2.3 ชุดทดสอบการกัดกร่อน (Flat Cell)
- 3.2.4 ขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl)
- 3.2.5 เครื่องตัดโลหะ
- 3.2.6 เครื่องชั่งขึ้นงาน
- 3.2.7 กระดาษทราย SiC เบอร์ 200,320,500,600,800,1200
- 3.2.8 เครื่องวัดพีเอช (pH Meter)
- 3.2.9 เครื่องกรองแบบลดความดัน
- 3.2.10 เครื่องระเหยตัวทำละลาย
- 3.2.11 กระดาษกรองเบอร์ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 3.3.1 การสกัดสารประกอบแอนโทไซยานินจากกะหล่ำปลีสีม่วง

-เตรียมสารละลายกรดซิตริก/เมทานอล 5% W/V โดยชั่งกรดซิตริก 50 กรัมละลายในเมทานอล 1000 ลบ.ซม.

-นำกะหล่ำปลีสีม่วงหั่นละเอียด 150 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ 1000 ลบ.ซม. เติมสารละลายกรดซิตริก/เมทานอล 5% W/V ลงไป 200 ลบ.ซม. ทำการปั่นกวนด้วยมอเตอร์ความเร็ว 500 รอบ/นาที

-ปิดบีกเกอร์ด้วยพาราฟิล์ม นำไปแช่ในตู้เย็น ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

-นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบลดความดัน

-นำสารละลายที่ได้จากการกรองนำไปปรับปริมาตรด้วยสารละลายกรดซิตริก/เมทานอล 5% W/V จนครบ 500 ลบ.ซม.

-นำสารละลายที่ได้จากการปรับปริมาตรไประเหยเอาตัวทำละลายออก จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปทำการสกัดด้วยคลอโรฟอร์ม นำชั้นคลอโรฟอร์มทิ้งไป เก็บสารละลายที่ได้ในขวดสีชา และนำไปเก็บในตู้เย็น

#### 3.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการป้องกันการกักตัวของสารประกอบแอนโทไซยานินที่สกัดได้จากกะหล่ำปลีสีม่วงโดยใช้เป็นสารยับยั้งการกักตัวของ

##### 3.3.2.1 การเตรียมชิ้นงานตัวอย่าง

-ตัดแผ่นเหล็ก (St 37) ด้วยเครื่องตัดเหล็ก

-นำแผ่นเหล็กมาขัดด้วยกระดาษทราย SiC เบอร์ 200,320,500,600,800 และ 1200 ตามลำดับ จนผิวของชิ้นงานเรียบเสมอกัน

-นำชิ้นงานที่ขัดเรียบร้อยแล้วล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วทำให้แห้งด้วยอะซิโตน

##### 3.3.2.2 การเตรียมสารละลาย

-เตรียมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร โดยปีเปตกรดไนตริก 65% มา 1.731 ลบ.ซม. ใส่ลงในน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตร 250 ลบ.ซม. ทำการหาความเข้มข้นที่แน่นอนโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์มา 0.4 กรัม ละลายน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตร 100 ลบ.ซม. ซึ่งหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยสารละลาย

โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (KHP) เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร โดยชั่ง KHP มา 2.042 กรัม ละลายน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตร 100 ลบ.ซม. โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์

-เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร โดยชั่งโซเดียมคลอไรด์ 1.4611 กรัม ละลายน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตร 250 ลบ.ซม.

-วัดพีเอชของสารละลายกรดไนตริกและสารละลายโซเดียมคลอไรด์

### 3.3.2.3 การทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานตัวอย่าง ในสารละลายกรดไนตริก

-นำสารละลายจากข้อ 3.3.1 มาครั้งละ 0,0.5,1,2,3,4 ลบ.ซม. แต่แต่ละครั้งเติมลงในสารละลายกรดไนตริก ปริมาตร 250 ลบ.ซม.

-วัดพีเอชของสารละลาย

-นำแผ่นเหล็กใส่ลงในชุดทดสอบการกัดกร่อน (Flat Cell) ใส่สารละลายที่เตรียมได้ลงในชุดทดสอบ

-ต่อขั้วอ้างอิงซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ ขั้วทำงาน และขั้วแพตินัม เข้ากับ Dummy Cell ของเครื่อง Potentiostat

-ป้อนค่าศักย์ไฟฟ้า โดยศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เริ่มที่ -0.25 โวลต์ถึง 1.6 โวลต์ โดยเทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ Open-circuit

-เมื่อทดสอบเสร็จจากกราฟที่ได้ ทำการคำนวณหาอัตราการกัดกร่อน ได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) Polarization resistance ( $R_p$ ) และอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate)

### 3.3.2.4 การทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานตัวอย่าง ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

-นำสารละลายที่ได้จากข้อ 3.3.1 มาครั้งละ 0,0.5,1,2,3,4 ลบ.ซม. ทำการปรับพีเอชของสารละลายด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 1% W/V โดยชั่งโซเดียมคาร์บอเนตมา 1 กรัม ละลายในน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตร 100 ลบ.ซม. จนสารละลายเป็นสีน้ำเงิน (พีเอชประมาณ 7.5) วัดพีเอชของสารละลาย

-นำสารละลายที่ได้เติมลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 250 ลบ.ซม.

-วัดพีเอชของสารละลาย

-ทำการทดสอบต่อเช่นเดียวกับการใช้สารละลายกรดไนตริก

3.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของสารประกอบแอนโทไซยานินที่สกัดได้จากกะหล่ำปลีสีม่วงโดยการเคลือบลงบนแผ่นเหล็ก

-นำสารละลายที่ได้จากข้อ 3.3.1 ทำการปรับพีเอชด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต 1% W/V จนได้สารละลายสีน้ำเงิน (พีเอชประมาณ 7.5)

-วัดพีเอชของสารละลาย

-นำสารละลายใส่ลงในเพลตที่มีแผ่นเหล็กวางอยู่ ปิดฝา ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

-นำแผ่นเหล็กมาทำการทดสอบการกัดกร่อนเช่นเดียวกับวิธีข้างต้น ในสารละลายกรดไนตริก และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมล/ลิตร



## บทที่ 4 ผลการวิจัย

### 4.1 ผลการทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนของสารประกอบแอนโทไซยานินที่สกัดได้จากกะหล่ำปลีสีม่วง

#### 4.1.1 ผลการทดสอบการกัดกร่อนในการใช้เป็นส่วนยับยั้งการกัดกร่อน

pH ของ anthocyanin ก่อนปรับ 2.551

pH ของ anthocyanin หลังปรับ 7.537

**ตารางที่ 4.1** ตารางแสดงผลการทดสอบการกัดกร่อนในการใช้เป็นส่วนยับยั้งการกัดกร่อนในสารละลายกรดไนตริก

| ชนิดของสารละลาย  | ปริมาตรของ anthocyanin (ml) | pH    | E <sub>corr</sub> (V) | R <sub>p</sub> (Ohm) | Corrosion rate (mm/year) |
|------------------|-----------------------------|-------|-----------------------|----------------------|--------------------------|
| HNO <sub>3</sub> | 0                           | 1.025 | -1.765                | 1.07*10 <sup>3</sup> | 0.552                    |
|                  | 0.5                         | 1.023 | -0.252                | 1.92*10 <sup>6</sup> | 0.205                    |
|                  | 1                           | 1.051 | -0.477                | 1.13*10 <sup>6</sup> | 0.168                    |
|                  | 2                           | 1.096 | -0.750                | 1.75*10 <sup>6</sup> | 0.241                    |
|                  | 3                           | 1.155 | -0.437                | 8.76*10 <sup>6</sup> | 0.133                    |
|                  | 4                           | 1.168 | -0.186                | 4.43*10 <sup>7</sup> | 0.125                    |

**ตารางที่ 4.2** ตารางแสดงผลการทดสอบการกัดกร่อนในการใช้เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

| ชนิดของสารละลาย | ปริมาตรของ anthocyanin (ml) | pH    | Ecorr (V) | Rp (Ohm)          | Corrosion rate (mm/year) |
|-----------------|-----------------------------|-------|-----------|-------------------|--------------------------|
| NaCl            | 0                           | 5.034 | -0.846    | $7.12 \cdot 10^4$ | 4.816                    |
|                 | 0.5                         | 6.072 | -1.918    | $3.04 \cdot 10^6$ | 4.784                    |
|                 | 1                           | 6.924 | -1.963    | $1.07 \cdot 10^7$ | 4.546                    |
|                 | 2                           | 7.242 | -0.278    | $2.71 \cdot 10^7$ | 4.215                    |
|                 | 3                           | 7.470 | -1.570    | $3.68 \cdot 10^7$ | 4.263                    |
|                 | 4                           | 8.280 | -3.246    | $4.28 \cdot 10^7$ | 4.788                    |

จากอัตราการกัดกร่อนที่ได้จากการทดลองสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพในการเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน (% inhibitor efficiency) ได้จาก

$$P = 100(1 - W_1/W_2) \quad \dots(4.1)$$

- เมื่อ P คือ เปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพในการเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน
- $W_1$  คือ อัตราการกัดกร่อนเมื่อมีสารยับยั้งการกัดกร่อน
- $W_2$  คือ อัตราการกัดกร่อนเมื่อไม่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน

**ตารางที่ 4.3** ตารางแสดงผลของประสิทธิภาพในการเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนในสารละลายกรดไนตริก

| ชนิดของสารละลาย  | ปริมาตรของ anthocyanin (ml) | % inhibitor efficiency(P) |
|------------------|-----------------------------|---------------------------|
| HNO <sub>3</sub> | 0                           | 0                         |
|                  | 0.5                         | 62.862                    |
|                  | 1                           | 69.565                    |
|                  | 2                           | 56.340                    |
|                  | 3                           | 75.906                    |
|                  | 4                           | 77.355                    |

**ตารางที่ 4.4** ตารางแสดงผลของประสิทธิภาพในการเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์

| ชนิดของสารละลาย | ปริมาตรของ anthocyanin (ml) | % inhibitor efficiency(P) |
|-----------------|-----------------------------|---------------------------|
| NaCl            | 0                           | 0                         |
|                 | 0.5                         | 0.624                     |
|                 | 1                           | 5.613                     |
|                 | 2                           | 12.474                    |
|                 | 3                           | 11.434                    |
|                 | 4                           | 0.416                     |

#### 4.1.2 ผลทดสอบการกัดกร่อนเมื่อเคลือบลงบนแผ่นเหล็ก

pH ของ anthocyanin หลังปรับ

7.500

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงผลการทดสอบในการเคลือบแผ่นเหล็กด้วยสารประกอบแอนโทไซยานิน

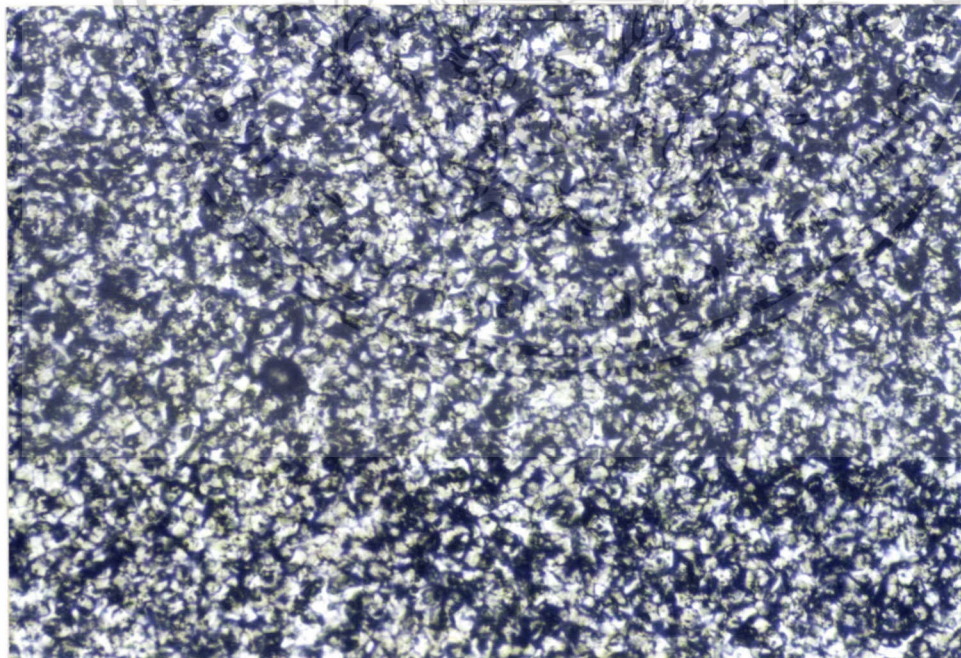
| ชนิดของสารละลาย  | Ecorr<br>(V) | Rp<br>(Ohm)          | Corrosion rate<br>(mm/year) |
|------------------|--------------|----------------------|-----------------------------|
| HNO <sub>3</sub> | -1.765       | 9.11*10 <sup>7</sup> | 0.476                       |
| NaCl             | -2.762       | 7.88*10 <sup>8</sup> | 0.426                       |



## 4.2 รูปแบบของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในสภาวะต่างๆ

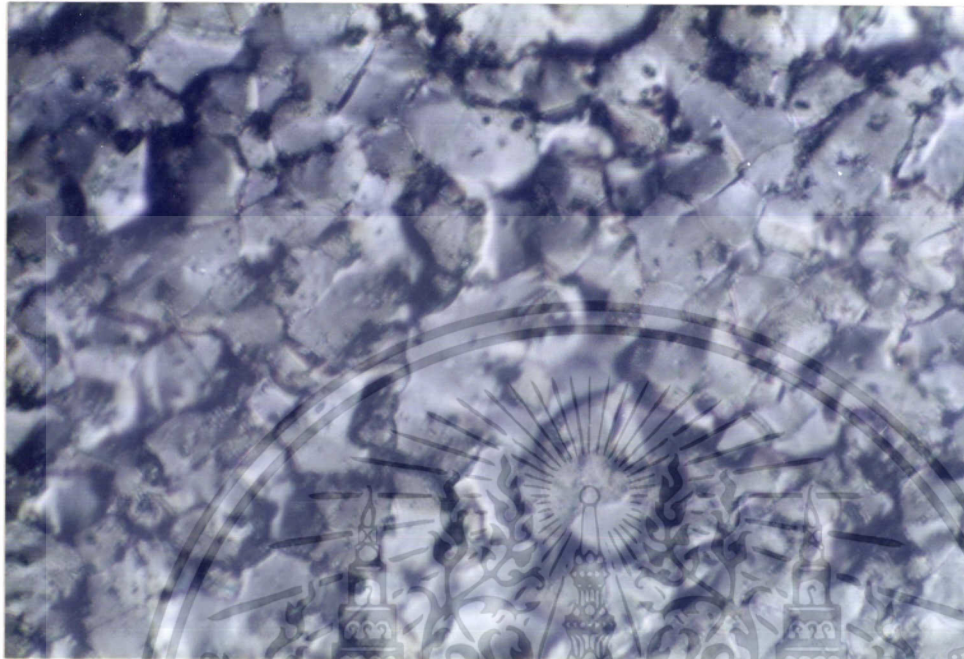


รูปที่ 4.1 ผิวนเหล็ก (St 37) ที่ผ่านการขัดทำความสะอาด  
(กำลังขยาย 10 เท่า)

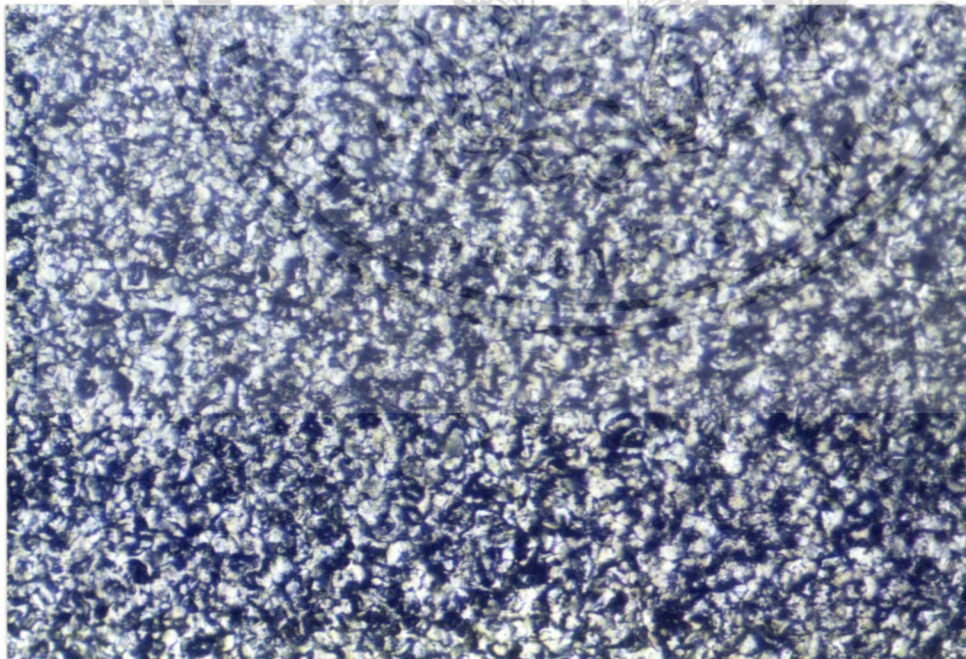


รูปที่ 4.2 การกัดกร่อนแบบทั่วไป (Uniform corrosion) ของเหล็ก  
ในสารละลายกรดไนตริก (กำลังขยาย 10 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

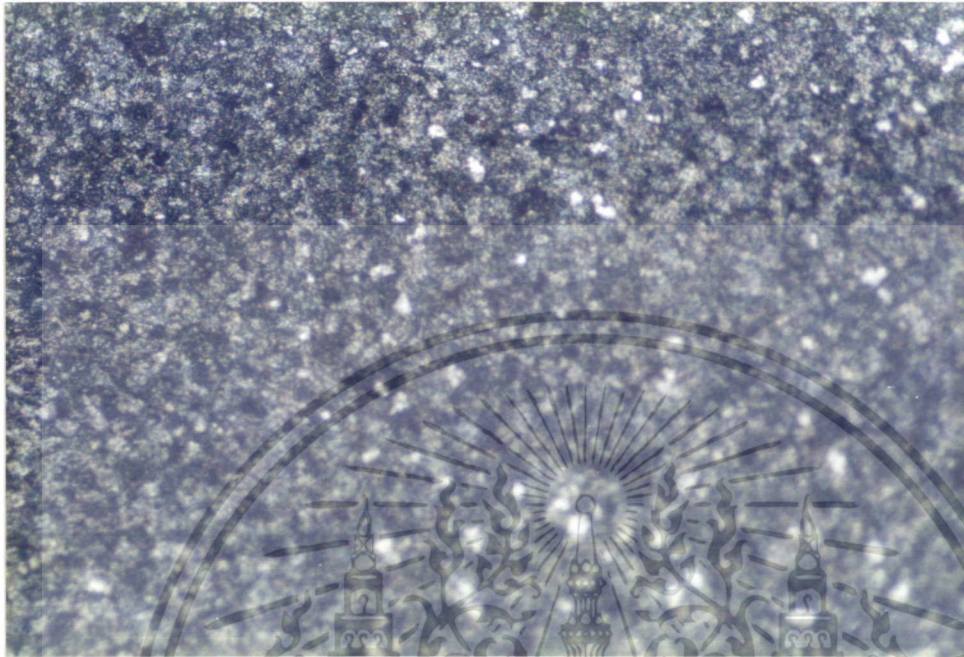


รูปที่ 4.3 การกัดกร่อนแบบทั่วไป (Uniform corrosion) ของเหล็ก  
ในสารละลายกรดไนตริก (กำลังขยาย 50 เท่า)

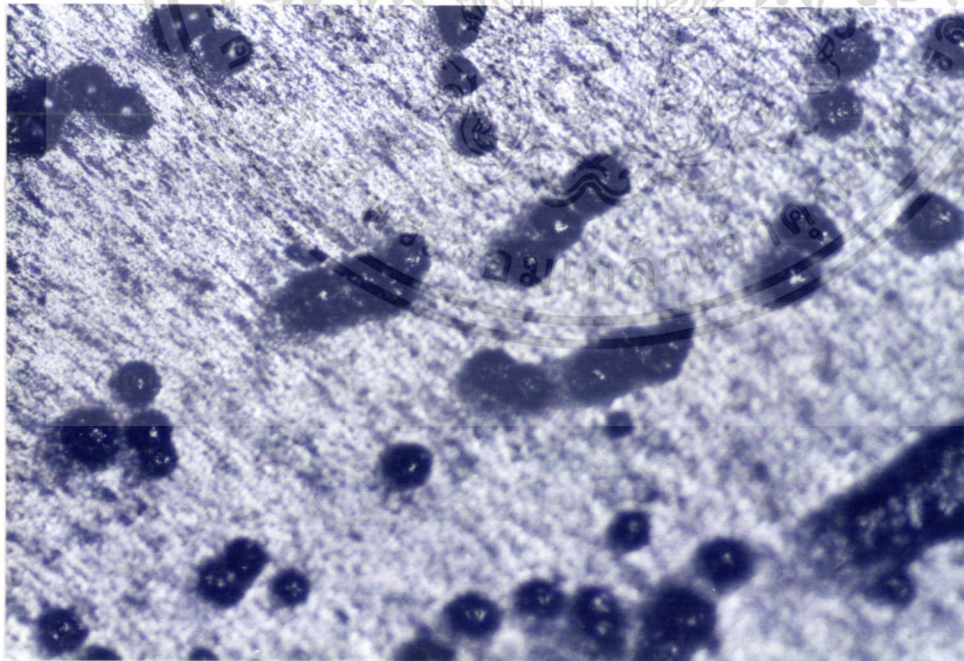


รูปที่ 4.4 การกัดกร่อนแบบทั่วไป (Uniform corrosion) ของเหล็กที่เคลือบด้วย

สารประกอบแอนโทไซยานิน (กำลังขยาย 10 เท่า)  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 การกัดกร่อนแบบทั่วไป (Uniform corrosion) ของเหล็กในสารละลายกรดไนตริก เดิมสารประกอบแอนโทไซยานิน (กำลังขยาย 10 เท่า)



รูปที่ 4.6 การกัดกร่อนแบบจุด (Pitting corrosion) ของเหล็กในสารละลาย

โซเดียมคลอไรด์ (กำลังขยาย 10 เท่า)

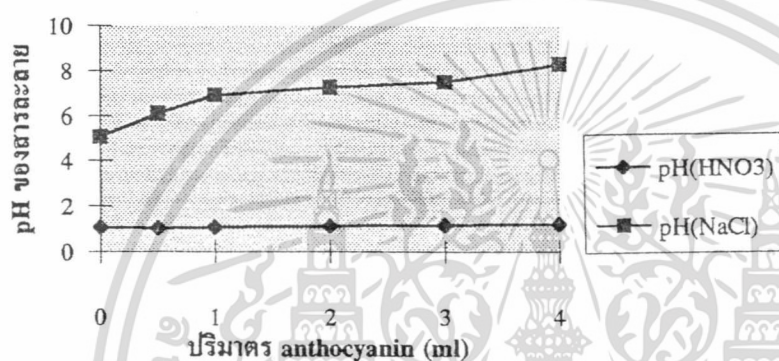
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและวิจารณ์

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

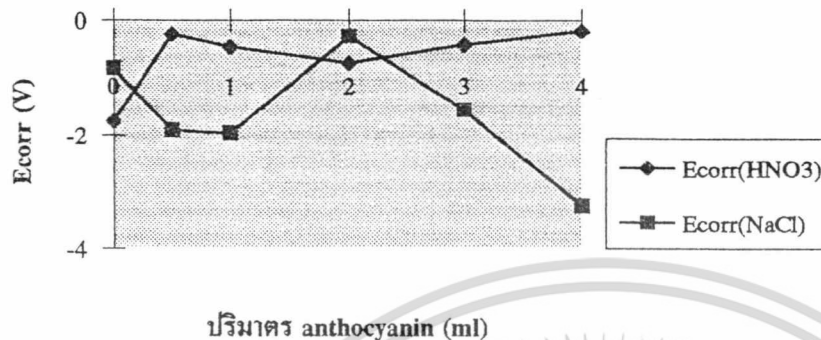
##### 5.1.1 สรุปค่าพีเอชของสารละลาย



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลาย กับปริมาตรของสารประกอบแอนโทไซยานิน

จากการทดลอง สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 5.1 คือ เมื่อปริมาตรของสารประกอบแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้น ค่าพีเอชของสารละลายเมื่อนำไปผสมกับสารละลายกรดไนตริก และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แต่ในกรณีที่ผสมในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ต้องทำการปรับพีเอชของสารประกอบแอนโทไซยานินด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตก่อน ซึ่งค่าพีเอชของสารละลาย มีค่าประมาณ 7.5 โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) จะอยู่ในรูปของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) เมื่อผสมสารประกอบแอนโทไซยานินที่ผ่านการปรับพีเอช ลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีค่าพีเอชประมาณ 5 ซึ่งค่าพีเอชนี้ สามารถทำให้โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ซึ่งอยู่ในรูปของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) สามารถแตกตัวได้คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) กับไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) จึงทำให้ค่าพีเอชของสารละลายสูงขึ้น

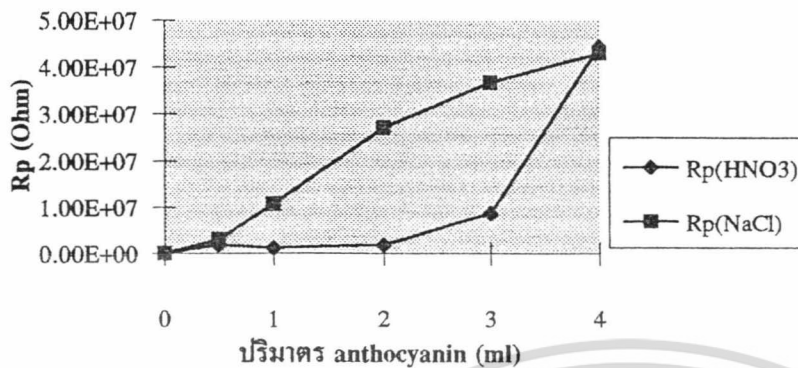
5.1.2 สรุปผลการป้องกันการกัดกร่อนเมื่อใช้เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน  
-สรุปค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ )



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน( $E_{corr}$ ) กับปริมาณของสารประกอบแอนโทไซยานิน

จากการทดสอบ สรุปได้ดังรูปที่ 5.2 คือ เมื่อทดสอบในสารละลายกรดไนตริก พบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของสารประกอบแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้น แต่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์พบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนมีแนวโน้มที่จะลดลง เนื่องจากสารประกอบแอนโทไซยานินในสารละลายกรด จะอยู่ในรูปของ flavylium cation (สีแดง) สามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะตัวอย่าง จึงทำให้โลหะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนได้ช้า แต่เมื่อทำการปรับพีเอชของสารประกอบแอนโทไซยานินเมื่อใช้ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พีเอชของสารละลายสูงขึ้น สารประกอบแอนโทไซยานินจะอยู่ในรูปของ ionized anhydrobase (สีน้ำเงิน) มากกว่าในรูปของ flavylium cation (สีแดง) ซึ่งสารประกอบแอนโทไซยานินจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะตัวอย่างได้ไม่ดี จึงทำให้โลหะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนไป ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนจึงลดลง แสดงว่า สารประกอบแอนโทไซยานินสามารถป้องกันการกัดกร่อนในสารละลายกรดไนตริกได้ดีกว่าในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โดยสารประกอบแอนโทไซยานินจะทำให้เหล็กเกิดการกัดกร่อนที่ช้าลงในสารละลายกรดไนตริก

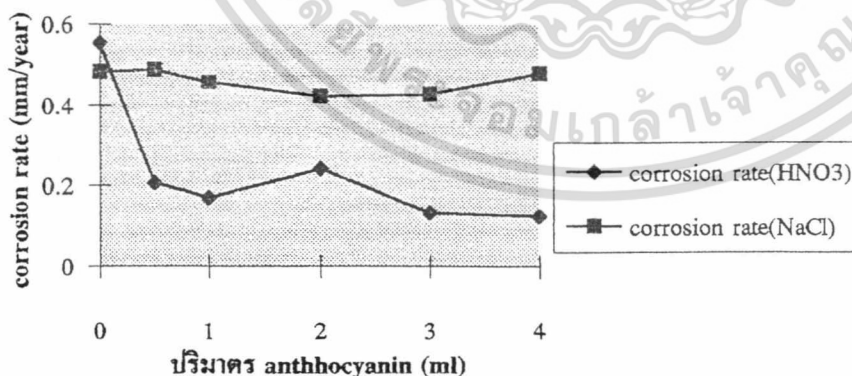
-สรุปค่า Polarization resistance (Rp) ที่ได้จากการกัดกร่อน



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Polarization resistance(Rp) กับปริมาณของสารประกอบแอนโทไซยานิน

จากการทดสอบ สรุปดังรูปที่ 5.3 พบว่าในสารละลายกรดไนตริก และโซเดียมคลอไรด์ ค่า Rp จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของสารประกอบแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้น ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสารประกอบแอนโทไซยานินจะทำให้เกิดฟิล์มบาง (passive film) บนผิวเหล็กที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน

-สรุปอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) และประสิทธิภาพในการเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibitor efficiency)



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการกัดกร่อน(Corrosion rate) กับปริมาณของสารประกอบแอนโทไซยานิน

จากการทดสอบสรุปได้ดังรูปที่ 5.4 คือ อัตราการกัดกร่อนของเหล็กในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์มีค่าคงที่ และสูงกว่าในสารละลายกรดไนตริก เมื่อปริมาตรของสารประกอบแอนโทไซยานินที่ใช้เพิ่มขึ้น สามารถสรุปได้เช่นเดียวกับกรณีของค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากการกัดกร่อนคือ เหล็กจะเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ แต่จะเกิดการกัดกร่อนที่ช้าในสารละลายกรดไนตริก

และจากอัตราการกัดกร่อนที่ได้ เมื่อนำไปพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนโดยดูจาก %inhibitor efficiency พบว่า ประสิทธิภาพในการเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาตรของสารประกอบแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้น

### 5.1.3 สรุปผลการป้องกันการกัดกร่อนเมื่อเคลือบสารประกอบแอนโทไซยานินลงบนเหล็ก

จากค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) และอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) พบว่ามีแนวโน้มในการเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย เช่นเดียวกับการไม่เติมสารประกอบแอนโทไซยานินลงในสารละลายที่ทดสอบ แต่จากค่า  $R_p$  ที่ได้ แสดงว่าอาจเกิดฟิล์มบางเกิดขึ้นบนผิวเหล็ก จึงทำให้ค่า  $R_p$  มีค่าสูง และจะมีความทนทานต่อการกัดกร่อน

## 5.2 สรุปผลและวิจารณ์

5.2.1 เมื่อปริมาณของสารประกอบแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน ( $E_{corr}$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าสารประกอบแอนโทไซยานินจะทำให้เกิดการกัดกร่อนที่ช้าลงเมื่อใช้ในสารละลายกรดไนตริก

5.2.2 จากค่า Polarization resistance ( $R_p$ ) จะทำให้ทราบถึงความสามารถในการทนทานต่อการกัดกร่อนของเหล็กในสารละลาย จากการทดสอบจะแสดงให้เห็นว่าสารประกอบแอนโทไซยานินจะช่วยทำให้เหล็กมีความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากค่า Polarization resistance ( $R_p$ ) มีค่าสูง

5.2.3 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กที่เกิดขึ้นในสารละลายกรดไนตริกมีค่าสูงกว่าในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ แต่จะมีค่าลดลงเมื่อใช้สารประกอบแอนโทไซยานินในการเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน สำหรับในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ อัตราการกัดกร่อนจะมีค่าสูง เนื่องจากสารละลายที่ใช้ทดสอบต้องทำการปรับพีเอชด้วยสารละลายไฮเดียมคาร์บอเนต ทำให้พีเอชของสารละลายสูงขึ้น สารประกอบแอนโทไซยานินอยู่ในรูปของ ionized anhydrobase (สีน้ำเงิน) มากกว่าในรูปของ flavylum cation (สีแดง) จึงไม่ช่วยในการป้องกันการกัดกร่อน

5.2.4 จากการทดสอบในการเคลือบโลหะด้วยสารประกอบแอนโทไซยานิน พบว่า สารประกอบแอนโทไซยานินจะช่วยให้เกิดฟิล์มบนผิวหน้าของเหล็ก และฟิล์มที่เกิดขึ้นมีความทนทานต่อการกัดกร่อน เนื่องจากค่า Polarization resistance ( $R_p$ ) มีค่าสูง

5.2.5 การกัดกร่อนที่เกิดขึ้น มีลักษณะเป็นการกัดกร่อนแบบทั่วไป (Uniform corrosion) และเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นฟิล์มบาง (passive film) จะเกิดการแตกออก ทำให้เกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่ได้ เช่น การกัดกร่อนแบบจุด (Pitting corrosion) แต่เมื่อใช้สารประกอบแอนโทไซยานินในการป้องกันการกัดกร่อนพบว่า การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นจะลดลง

5.2.6 จากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า สารประกอบแอนโทไซยานินมีสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็ก (St 37) โดยมีสมบัติเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 เพื่อความถูกต้องในการทดสอบควรมีการใส่ก๊าซออกซิเจน ทำการควบคุมอุณหภูมิขณะทำการทดลอง ทำความสะอาดชิ้นงานให้สะอาด ชัดผิวของชิ้นงานที่ทดสอบให้เรียบเสมอกัน และทดสอบชิ้นงานทันที ที่ทำความสะอาดแล้ว เพื่อป้องกันการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากผลของสภาวะเหล่านี้

5.3.2 ควรแยกสารประกอบแอนโทไซยานิน จากสารที่สกัดได้จากกะหล่ำปลีสีม่วง เพื่อศึกษาสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากสารประกอบแอนโทไซยานินโดยตรง

5.3.3 ควรศึกษาถึงเสถียรภาพของสารประกอบแอนโทไซยานินที่สกัดได้ ที่มีผลต่อสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อน

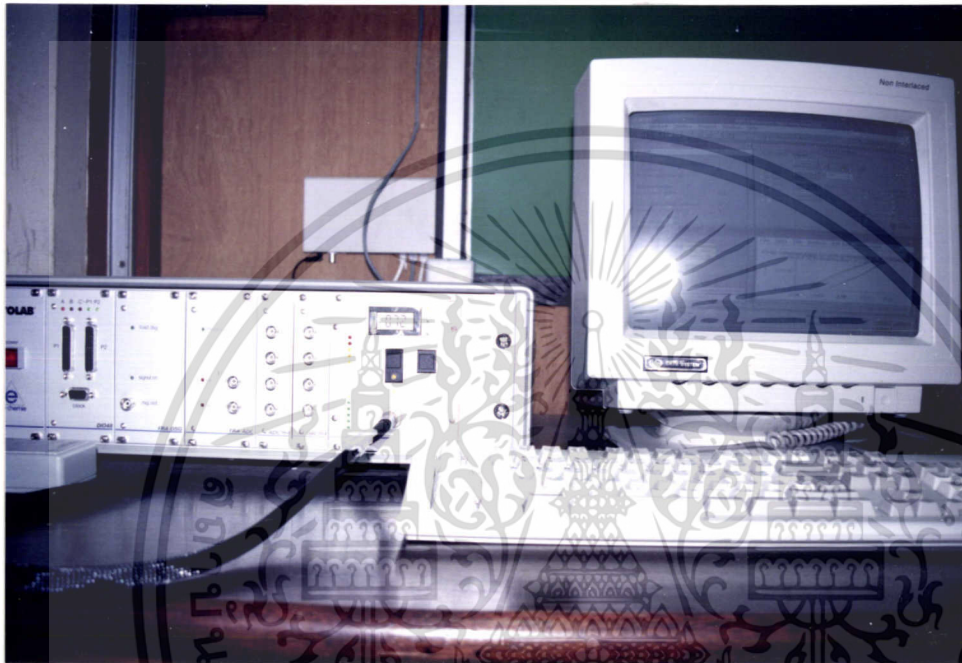
5.3.4 ทำการพิจารณาถึงค่าศักย์ไฟฟ้าของการใช้งานให้อยู่ในช่วงของการเกิด passive film ของเหล็กในสภาวะต่างๆ



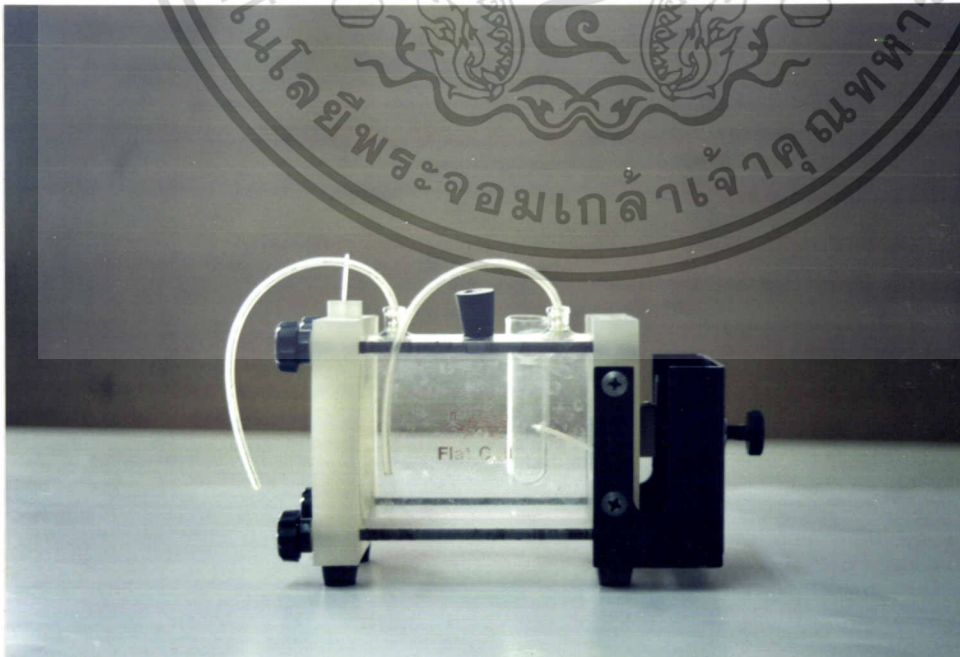
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ภาพเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง



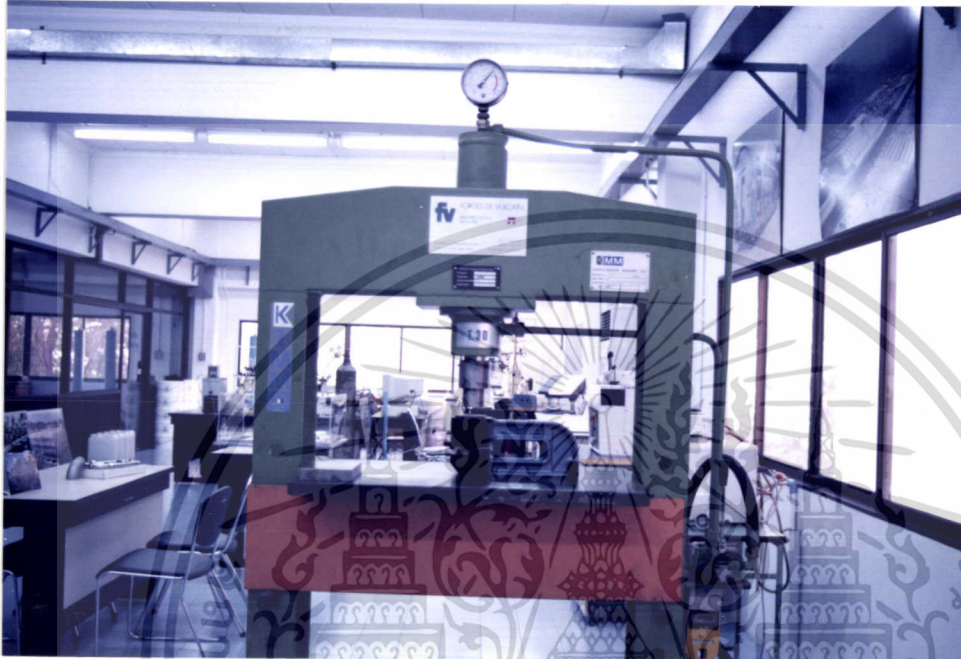
รูปที่ 1ก เครื่องทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Potentiostat/GPES/PGSTAT10)



รูปที่ 2ก ชุดทดสอบการกัดกร่อน(Flat Cell)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ภาคผนวก ก (ต่อ)



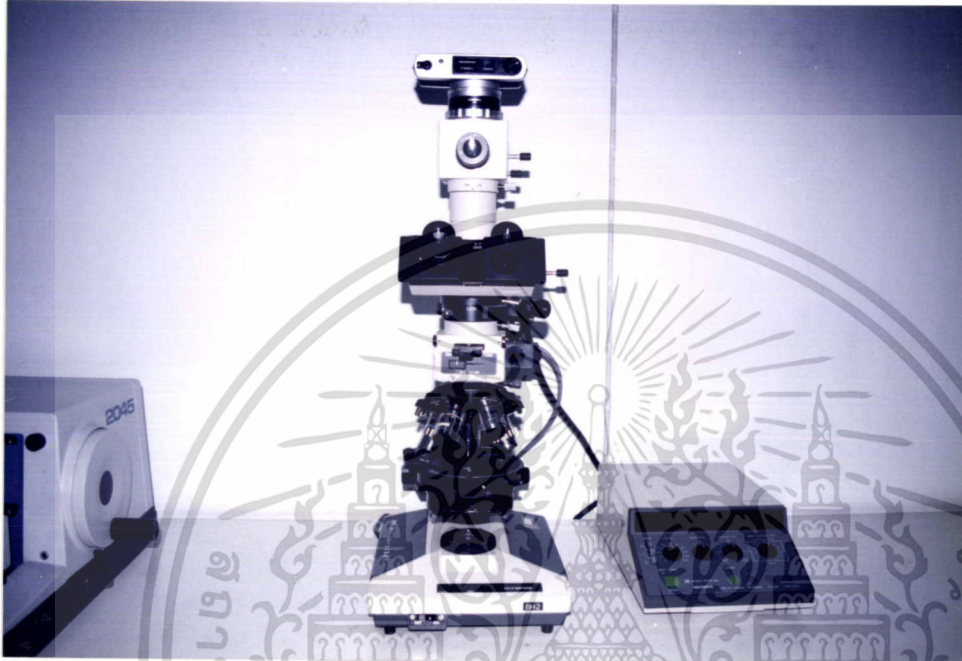
รูปที่ 3ก เครื่องตัดโลหะ



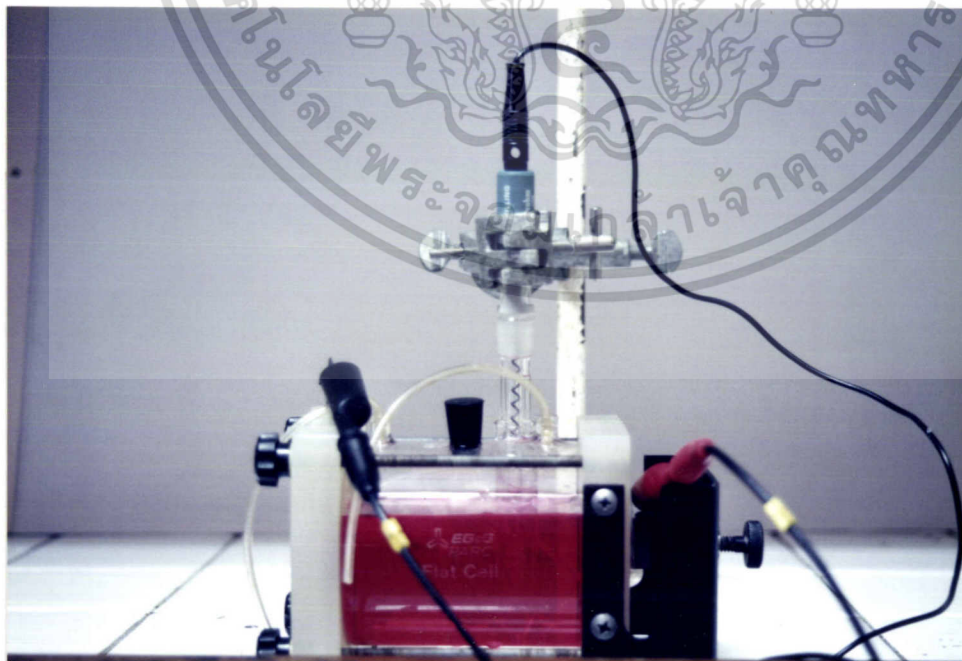
รูปที่ 4ก เครื่องขัดชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก (ต่อ)

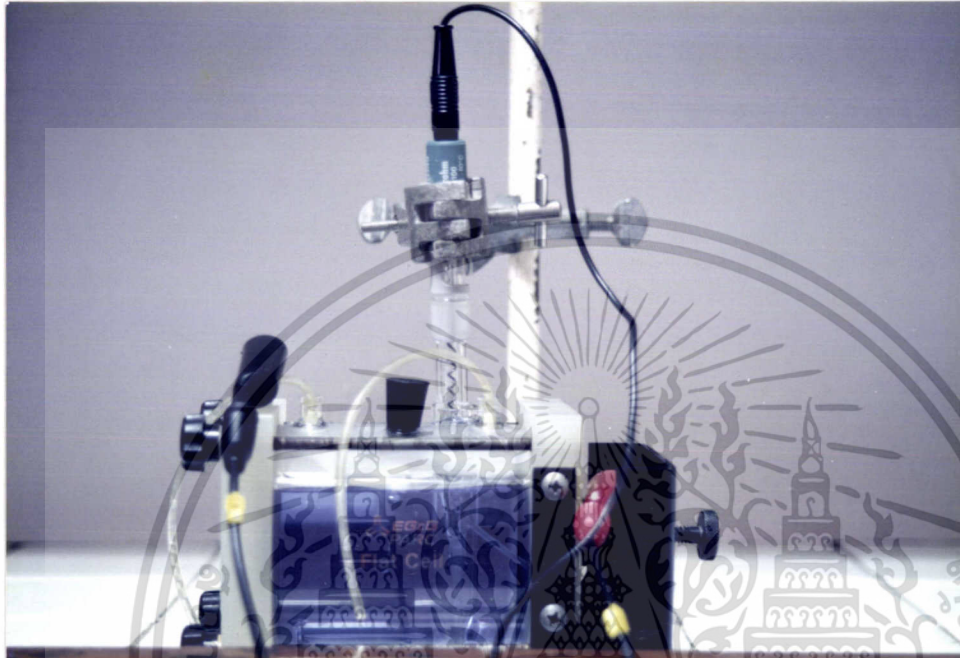


รูปที่ 5ก กล้องไมโครสโคป(microscope) ถ่ายภาพชิ้นงาน



รูปที่ 6ก การทดสอบการกัดกร่อนของสารประกอบแอนโทไซยานินในสารละลายกรด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก (ต่อ)

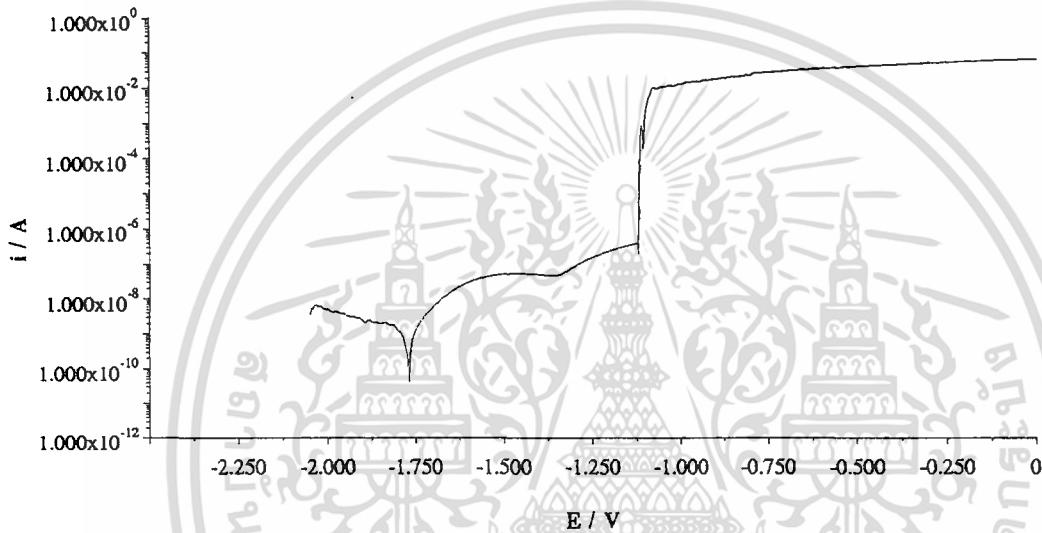


รูปที่ 7ก การทดสอบการกักความร้อนของสารประกอบแอนโทไซยานิน  
ในสารละลายไซเดียมคลอไรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### Iron in 0.1 M HNO<sub>3</sub> Corrosion rate analysis

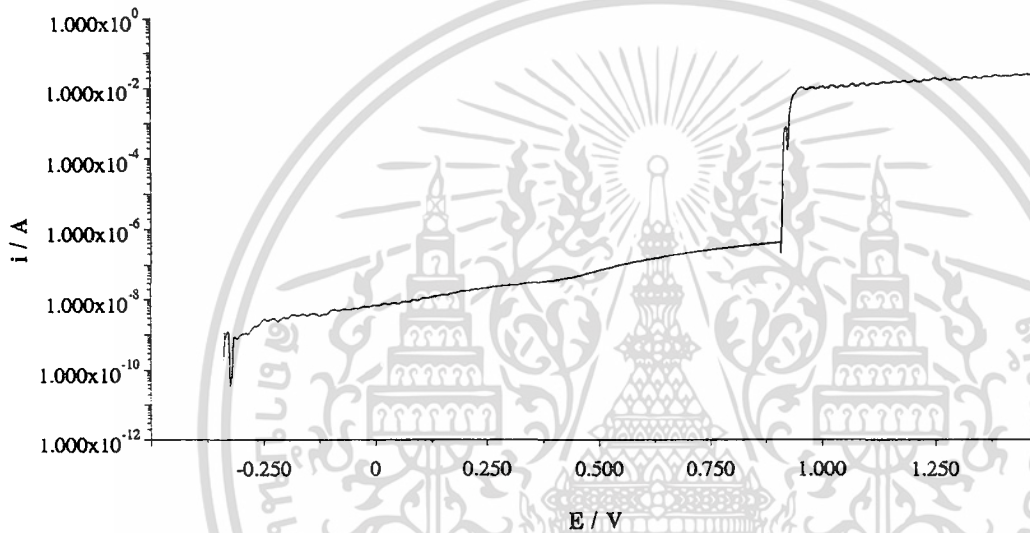


รูปที่ 1ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็ก ใน HNO<sub>3</sub>

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

### Iron in 0.1 M HNO<sub>3</sub>+Anthocyanin

#### Corrosion rate analysis

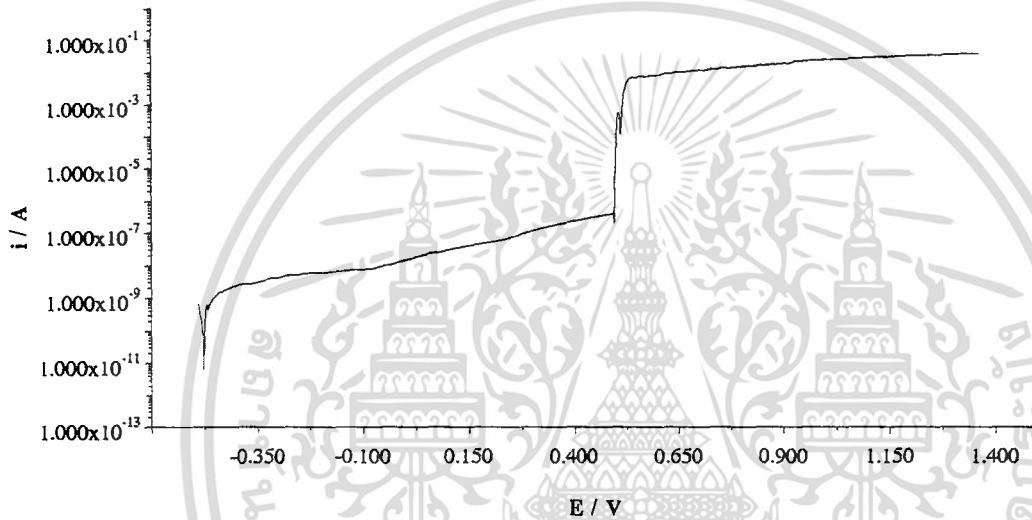


รูปที่ 2ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กใน HNO<sub>3</sub>  
เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 0.5 ml

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

### Iron in 0.1 M HNO<sub>3</sub>+Anthocyanin

#### Corrosion rate analysis

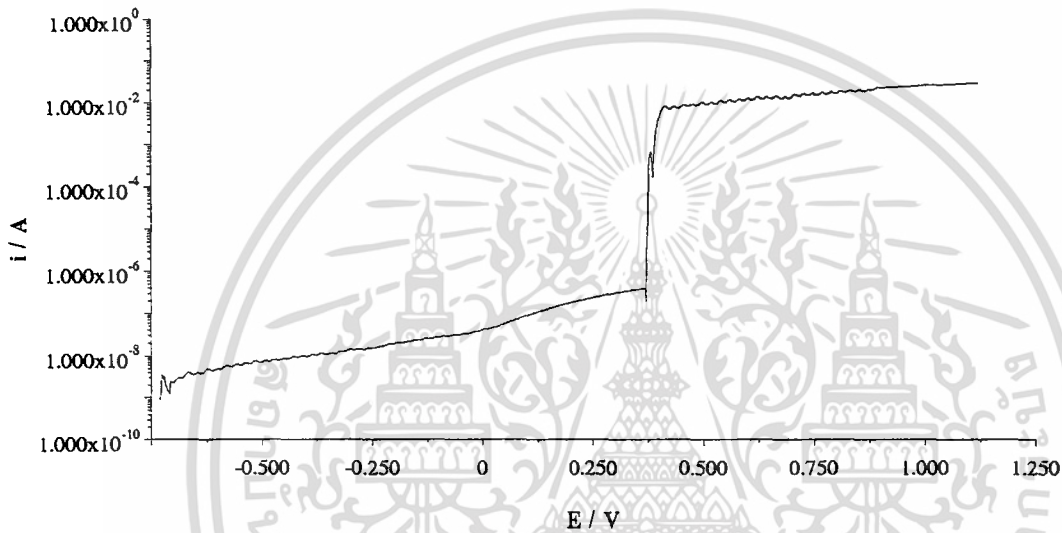


รูปที่ 3ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กใน HNO<sub>3</sub>  
เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 1.0 ml

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

### Iron in 0.1 M HNO<sub>3</sub>+Anthocyanin

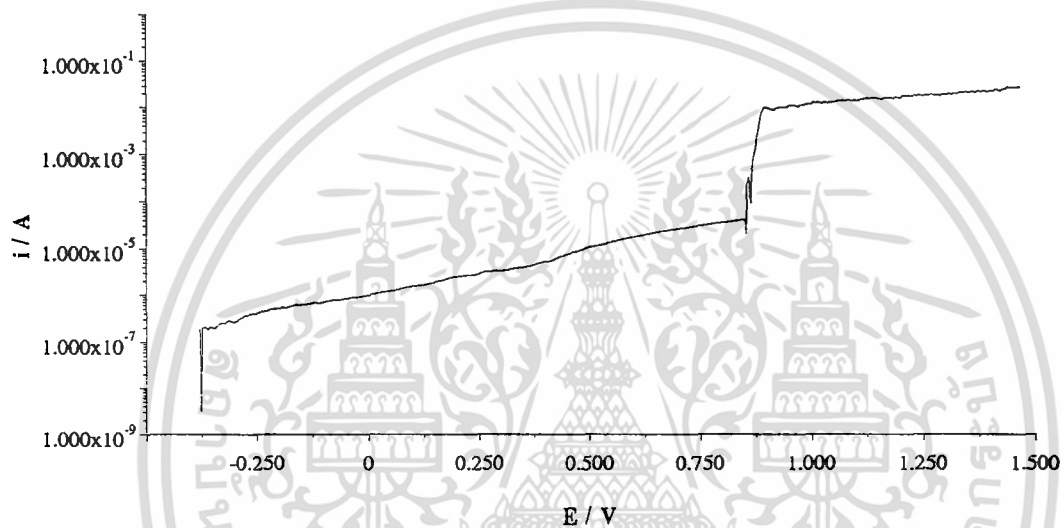
#### Corrosion rate analysis



รูปที่ 4ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กใน HNO<sub>3</sub>  
เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 2.0 ml

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

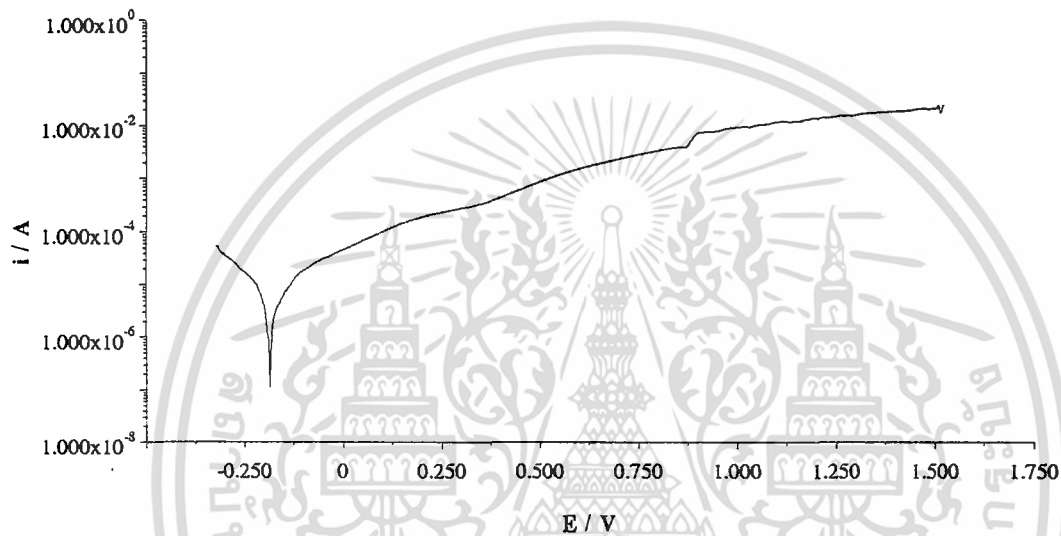
### Iron in 0.1 M HNO<sub>3</sub>+Anthocyanin Corrosion rate analysis



รูปที่ 5ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กใน HNO<sub>3</sub>  
เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 3.0 ml

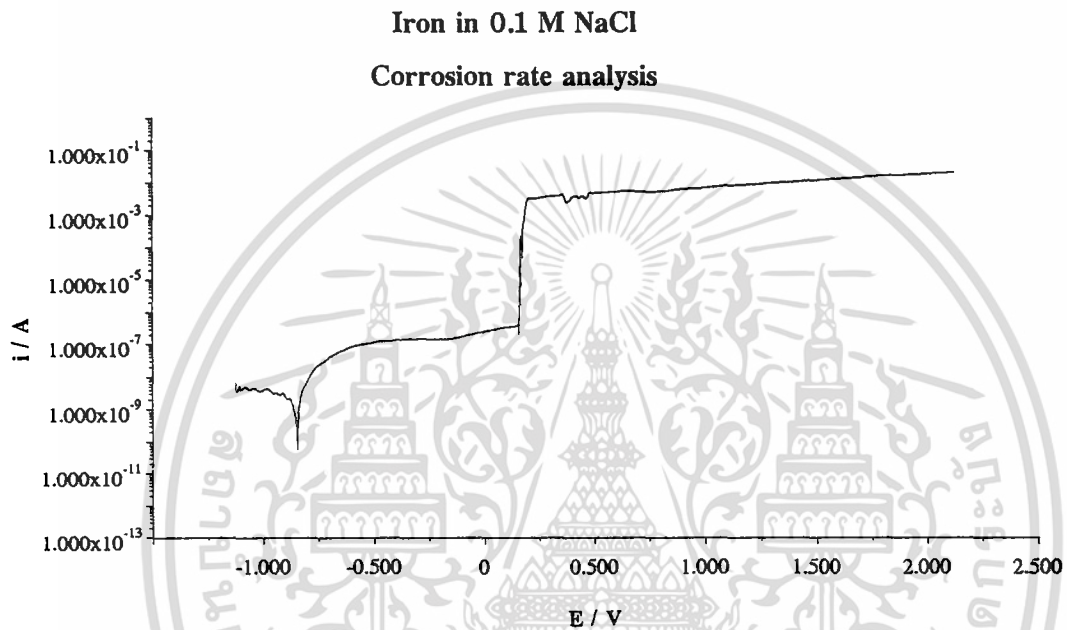
## ภาคผนวก ข (ต่อ)

### Iron in 0.1 M HNO<sub>3</sub>+Anthocyanin Corrosion rate analysis



รูปที่ 6ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กใน HNO<sub>3</sub>  
เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 4.0 ml

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

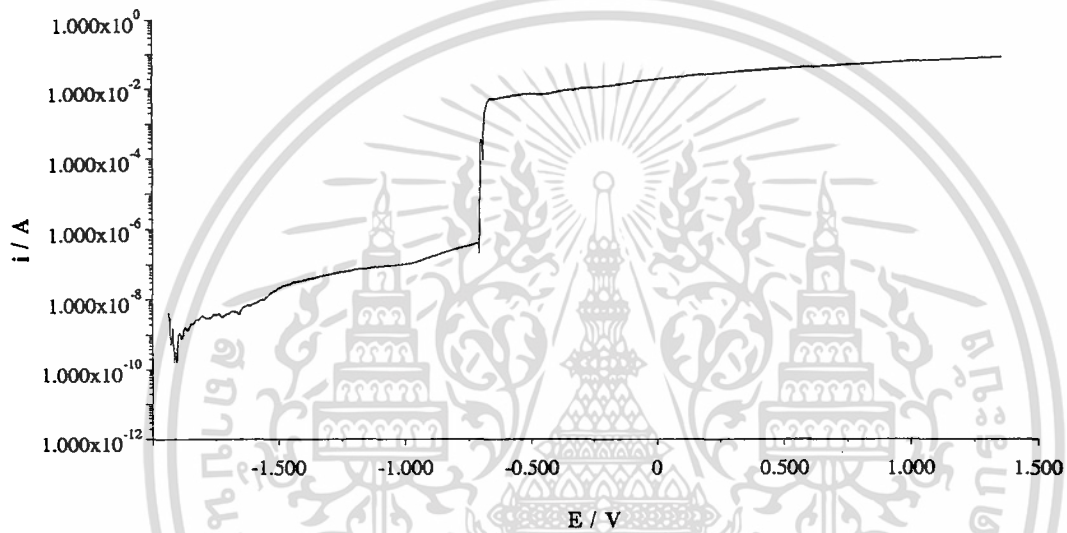


รูปที่ 7ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็ก ใน NaCl

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

Iron in 0.1 M NaCl + anthocyanin

Corrosion rate analysis

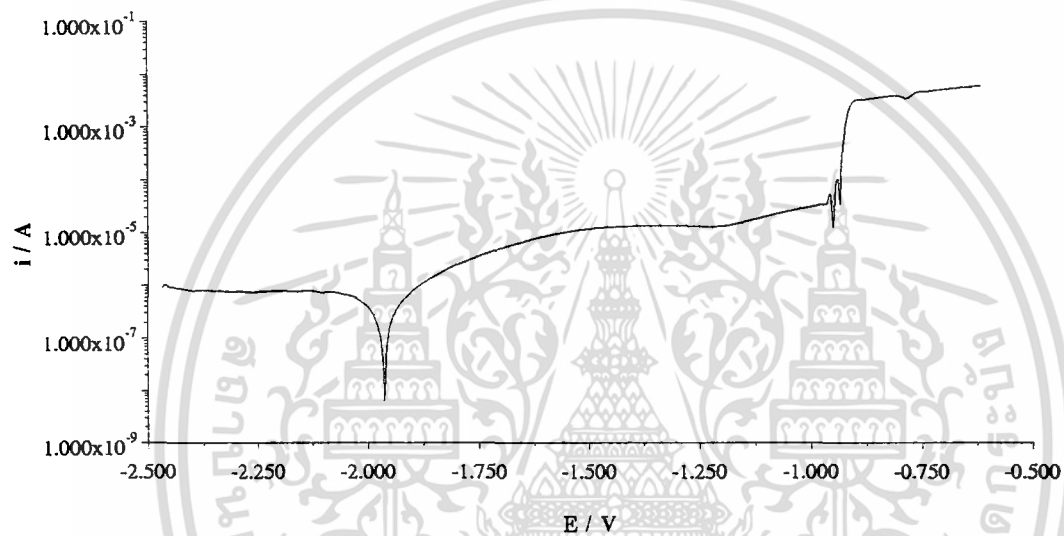


รูปที่ 8ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็ก ใน NaCl  
เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 0.5 ml

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

Iron in 0.1 M NaCl + anthocyanin

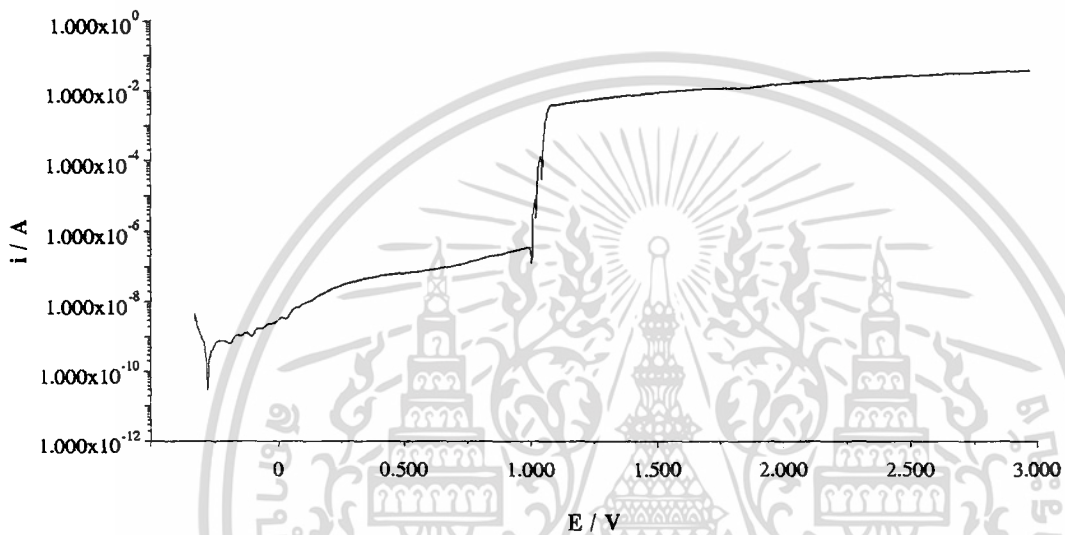
Corrosion rate analysis



รูปที่ 9 ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็ก ใน NaCl  
เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 1.0 ml

ภาคผนวก ข (ต่อ)

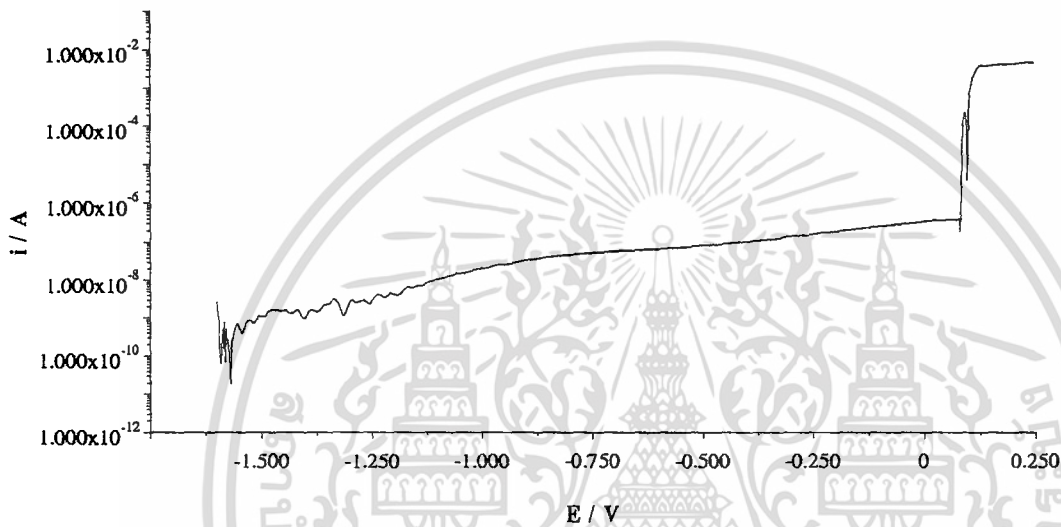
Iron in 0.1 M NaCl + anthocyanin  
Corrosion rate analysis



รูปที่ 10x Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็ก ใน NaCl  
เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 2.0 ml

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

### Iron in 0.1 M NaCl+Anthocyanin Corrosion rate analysis

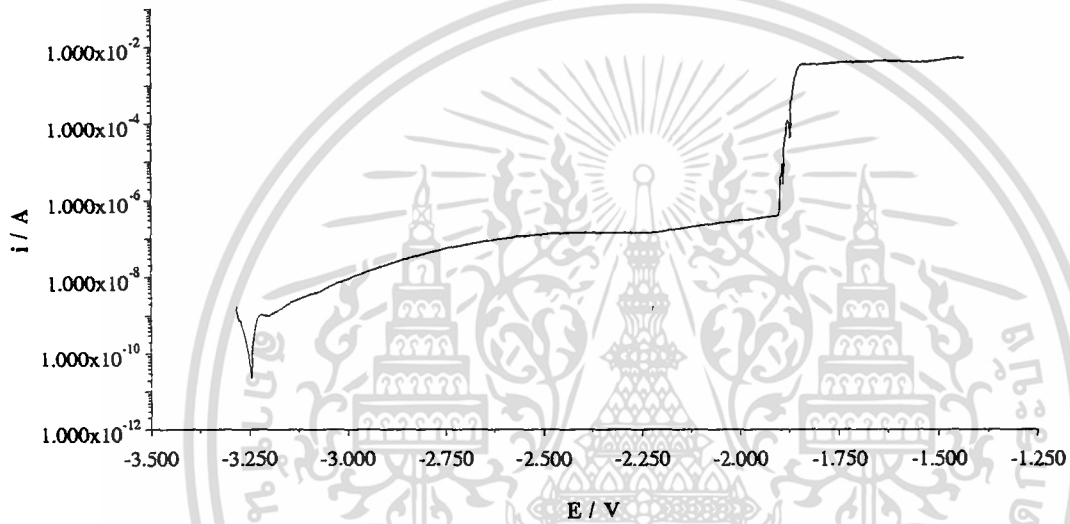


รูปที่ 11ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็ก ใน NaCl  
เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 3.0 ml

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

Iron in 0.1 M NaCl + anthocyanin

Corrosion rate analysis

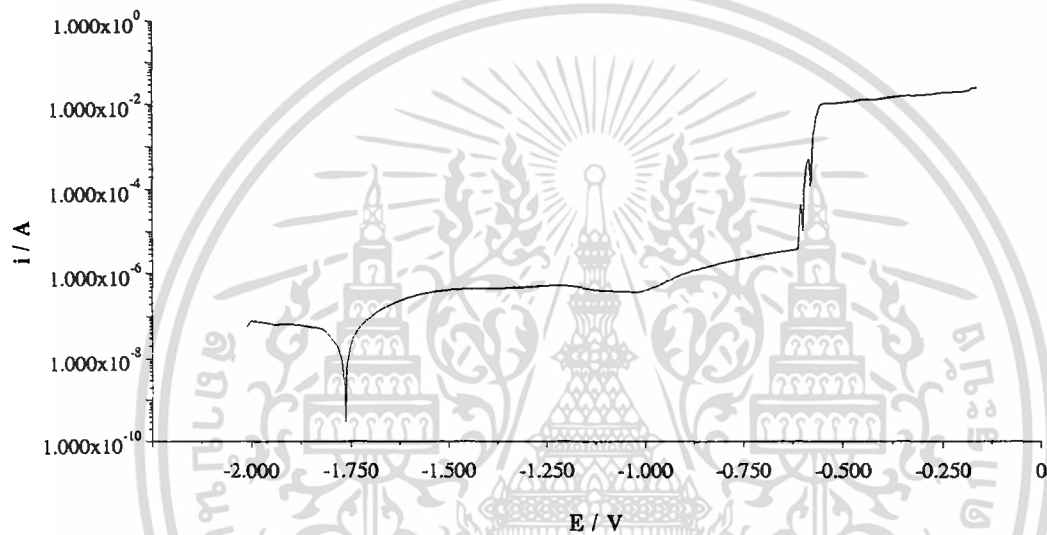


รูปที่ 12ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็ก ใน NaCl  
เติมสารประกอบแอนโทไซยานิน 4.0 ml

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

### Iron coat anthocyanin in 0.1 M HNO<sub>3</sub>

#### Corrosion rate analysis

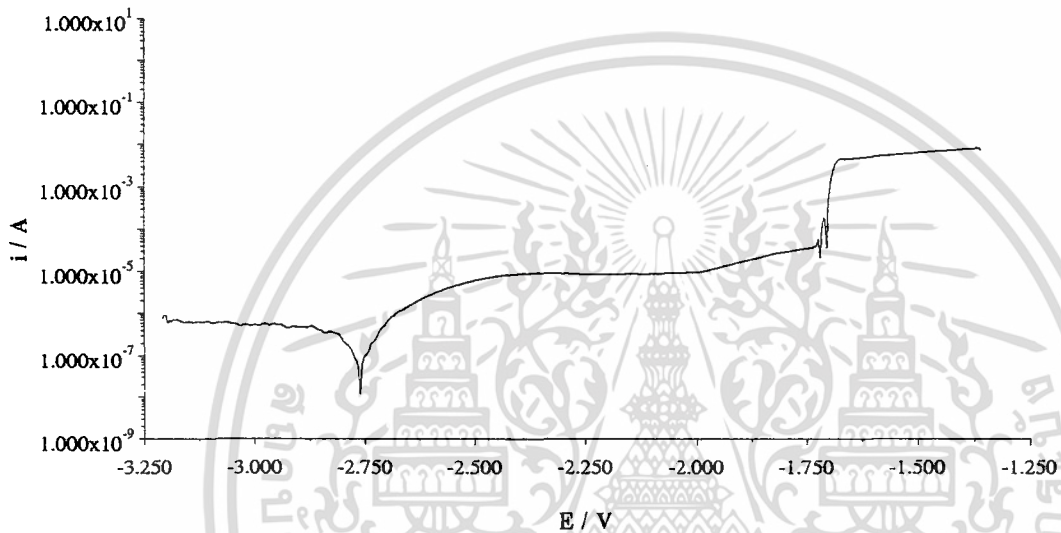


รูปที่ 13 ข Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กที่  
แช่ในสารประกอบแอนโทไซยานิน 24 ชั่วโมง ใน HNO<sub>3</sub>

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

### Iron coat anthocyanin in 0.1 M NaCl

#### Corrosion rate analysis



รูปที่ 14x Polarization curve ของการกัดกร่อนของเหล็กที่  
แช่ในสารประกอบแอนโทไซยานิน 24 ชั่วโมง ใน NaCl

## เอกสารอ้างอิง

- 1.กัญญา ตระกูล.,เทคโนโลยีการกัดกร่อน,พิมพ์ครั้งที่ 2,เอ็กซ์เพรส มีเดีย,กรุงเทพฯ,2534
- 2.ศิริลักษณ์ นิรัฐจรรยา.,การกัดกร่อนของโลหะและโลหะผสม,ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม,คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- 3.Alexandru T.B.,Antonie D.,Genadii N.D.,Gerhard W.F.,Alla V.K.,Valerii V.K.,Werner S.,  
“Pyrylium salts:Syntheses,Reactions,and Physical Properties”,**Advance in Heterocyclic Chemistry Supplement 2**, Academicpress,NewYork,1982.
- 4.Denny A J.,**Principle and Prevention of corrosion**,2<sup>nd</sup> ed. Maxwell Publishing.,1991.
- 5.Fontana M.G.,**Corrosion Engineering**,3<sup>rd</sup> ed. McGraw-Hill,NewYork,1986.
- 6.Fraunhofer J.A. and Banks C.H.,**Potentiostat and its Applications**, 1<sup>st</sup> ed.,London Butterworths,Hungary,1972.
- 7.Herbert H.U. and Winston R.R.,**Corrosion and Corrosion Control**,3<sup>rd</sup> ed.,John Wiley&Sons,1991.
- 8.Kazuo,H.,Kenichi,M. and Hisayoshi,K.,“Corrosion-Preventive Coating with Anthocyanin Complex for Metal Sheets” J.P. 07 18,467 20 Jan 1995.
- 9.Loto A.,“The Effect of Inhibitors on the Corrosion of Mild Steel in Acidic and Sea-Water Environments” **Corrosion Prevention and Control**,39(1992)119.
- 10.Mazza G. and Miniati E.,**Anthocyanins in Fruits,Vetgetable,and Grains**, CRC Press,Inc.,1993.
- 11.Ray Q.B. and William E.M.,**Organic Chemistry**,3<sup>rd</sup> ed.,1961.
- 12.Salt F.W. and Thomas J.G.N.,“The Anaerobic Corrosion of Tin in Anthocyanin Solutions and Fruit Syrups” **Journal of Applied Chemistry**,7(1957)231-238.
- 13.Sheir L.L., Jarman R.A. and Burstein B.T., **Corrosion**,Vol 2.Butterwort Heinmann 1991.
- 14.Standard Practice for Conventional Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing,**Standard Method G 3-89**,Annual Book of ASTM Standards.

15. Standard Reference for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements, **Standard Method G 5-94**, Annual Book of ASTM Standards.

16. Standard Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing, **Standard Method G 15-93**, Annual Book of ASTM Standards.

17. William S. T., "Inhibition of Pitting Corrosion" **U.S. 4,240,925**.

