

รายงานฉบับสมบูรณ์

การศึกษาสารหน่วงการกัดกร่อนจากสารธรรมชาติ

The Study of Green Compounds as Corrosion Inhibitors

รหัสโครงการ

F-31-103-14-01

หัวหน้าโครงการ ดร. มณฑนา จริยาบูรณ์

1 กุมภาพันธ์ 2556

รายงานฉบับสมบูรณ์

การศึกษาสารหน่วงการกัดกร่อนจากสารธรรมชาติ

The Study of Green Compounds as Corrosion Inhibitors

รหัสโครงการ

F-31-103-14-01

รายนามคณะผู้วิจัย

ดร. มัณฑนา จริญญาบุรณ์

หน่วยงาน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

วันเริ่มต้นโครงการ 1 มิถุนายน 2553

วันสิ้นสุดโครงการ 31 พฤษภาคม 2555

ตรวจสอบการพิมพ์แล้ว :

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก
ศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ปีงบประมาณที่ได้รับทุน

ปีงบประมาณ 2553

บทคัดย่อ

ได้ทำการศึกษาผลของสารสกัดฟ้าทะลายโจรและชาที่มีต่อพฤติกรรมการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ด้วยวิธีการหาค่าหนักที่หายไปและการตรวจสอบทางเคมีไฟฟ้า รวมทั้งศึกษาพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สารสกัดทั้งสองชนิดให้ผลไปในทำนองเดียวกัน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดทั้งสองชนิดจะทำให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารสกัดทั้งสองชนิดเท่ากับ 1 g/l จะได้ประสิทธิภาพในการป้องกันสูงสุดที่ 96% ซึ่งตรงกับอัตราการกัดกร่อนที่ 0.4 mm/year จากการทดสอบด้วยวิธีโพเทนชิโอสแตติกสโพรไวเซชันแสดงให้เห็นว่า สารสกัดทั้งสองชนิดเป็นสารสกัดประเภทแอนอดิก ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสดงให้เห็นว่า พื้นผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหลังจากที่จุ่มลงในสารละลายกรดที่มีสมบัติกัดกร่อนที่มีส่วนผสมของสารสกัดอยู่ด้วยจะได้รับการปกป้อง เนื่องจากการดูดซับของสารสกัดผ่านอะตอมออกซิเจน การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนได้แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการป้องกันจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นการบอกเป็นนัยว่าการดูดซับของสารสกัดเป็นแบบกายภาพ

คำสำคัญ: สารหน่วงการกัดกร่อน การกัดกร่อน สารสกัดธรรมชาติ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

Abstract

The effect of *Andrographis paniculata* (Burm.f.) Wall.ex Nees and Tea Extracts on the corrosion behavior of low C-steel in 0.1 M HCl was investigated using weight loss and electrochemical measurements. Surface morphology was studied using scanning electron microscope (SEM). Both extracts showed similar results. The inhibition efficiency of both *Andrographis paniculata* (Burm.f.) Wall.ex Nees and Tea Extracts increased with an increase in extract concentrations. At 1 g/l of both extracts, they showed maximum inhibition efficiency of 96% corresponding to a corrosion rate of 0.4 mm/year. Potentiodynamic polarization measurements revealed that both extracts predominantly acted as anodic inhibitors. SEM micrographs showed that low C-steel surfaces immersed in corrosive acid solution containing the extracts were protected due to an adsorption of the extracts through oxygen atoms. The effect of temperatures on the corrosion inhibition efficiency of both extracts revealed that the efficiency decreased with an increase in the temperatures suggesting the physical adsorption of the extracts.

Keywords: corrosion inhibitor, corrosion, natural extract, low C-steel

สารบัญเรื่อง

	หน้า
1. บทนำ	1
2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
3. การทบทวนวรรณกรรม	2
4. การออกแบบการวิจัย	9
5. ขอบเขตของการวิจัย	9
6. ระเบียบวิธีวิจัย	10
7. ขั้นตอนวิธีการวิจัย	10
8. ผลวิจัย	13
9. สรุปผล	30
10. ปัญหาและอุปสรรค	30
11. บรรณานุกรม	31
12. ประวัติผู้วิจัย	34

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 โครงสร้างหลักของสารสกัดที่ได้จากต้นหยีน้ำ (Pongamia Pinnata)	6
ภาพที่ 2 โครงสร้างหลักของสารสกัดที่ได้จากต้น Lawsonia (ช้าย) และกลไกการเกิดพันธะกับโลหะ (ขวา)	6
ภาพที่ 3 ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรไลซ์แทนนิน	7
ภาพที่ 4 ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของคอนเดนส์แทนนิน	8
ภาพที่ 5 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพของแทนนินในสารสกัด ก. ฟัทะลายใจร ข. ใบชา	13
ภาพที่ 6 กราฟมาตรฐานของกรดแทนนิก	14
ภาพที่ 7 ภาพถ่ายจุลทรรศน์ของพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหลังจากจุ่มในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มีและมีสารสกัดฟัทะลายใจรที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก. ไม่มีสารสกัด ข. 0.05 g/l ค. 0.1 g/l ง. 0.3 g/l จ. 0.5 g/l และ ง. 1.0 g/l	16
ภาพที่ 8 ภาพถ่ายจุลทรรศน์ของพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหลังจากจุ่มในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มีและมีสารสกัดใบชาที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก. ไม่มีสารสกัด ข. 0.05 g/l ค. 0.1 g/l ง. 0.3 g/l จ. 0.5 g/l และ ง. 1.0 g/l	17
ภาพที่ 9 กราฟการดูดซับของแสงเมียร์ของสารสกัดฟัทะลายใจร	18
ภาพที่ 10 กราฟการดูดซับของแสงเมียร์ของสารสกัดใบชา	19
ภาพที่ 11 กราฟแอดิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มีและมีสารสกัดฟัทะลายใจรที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	20
ภาพที่ 12 กราฟแอดิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มีและมีสารสกัดใบชาที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	20
ภาพที่ 13 กราฟแคโทดิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มีและมีสารสกัดฟัทะลายใจรที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	21
ภาพที่ 14 กราฟแคโทดิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มีและมีสารสกัดใบชาที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	22

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 15 อีวานส์ไดอะแกรมแสดงการเพิ่มขึ้นของศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะเมื่อมีการเติมสารหน่วงการกัดกร่อนประเภทแอนโอดิก	23
ภาพที่ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนของสารสกัดฟ้าทะลายโจร (□) และสารสกัดใบชา (○) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยที่ความเข้มข้นของสารสกัด คือ 1 g/l	24
ภาพที่ 17 กราฟแอนดิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และมีสารสกัดฟ้าทะลายโจรที่ความเข้มข้น 1 g/l	25
ภาพที่ 18 กราฟแอนดิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และมีสารสกัดฟ้าใบชาที่ความเข้มข้น 1 g/l	26
ภาพที่ 19 กราฟแคโทดิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และมีสารสกัดฟ้าทะลายโจรที่ความเข้มข้น 1 g/l	27
ภาพที่ 20 กราฟแคโทดิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และมีสารสกัดใบชาที่ความเข้มข้น 1 g/l	27
ภาพที่ 21 กราฟอาร์เรเนียสของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มีการเติมสารสกัด (○) มีการเติมสารสกัดฟ้าทะลายโจรเข้มข้น 1 g/l (□) และสารสกัดใบชาเข้มข้น 1 g/l (◇)	29

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สรุปข้อมูลของการศึกษาสารหน่วงการกัดกร่อนจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ	4
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1018	10
ตารางที่ 3 ร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนของสารสกัดและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มีและมีสารสกัดที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	15
ตารางที่ 4 ร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนของสารสกัดและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ	24
ตารางที่ 5 เปรียบเทียบร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนระหว่างสารสกัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้กับสารสกัดธรรมชาติที่มีอยู่ในเชิงพาณิชย์	30

1. บทนำ

อุตสาหกรรมหลาย ๆ อุตสาหกรรมในประเทศไทย ตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้า อุตสาหกรรมรถยนต์ เป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้โลหะเป็นวัสดุโครงสร้างหรือใช้โลหะเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ ต่างประสบกับปัญหาการกัดกร่อนอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้เมื่อโลหะมีการสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการกัดกร่อน ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ หรือเกิดการชำรุดของโครงสร้างต่าง ๆ ในโรงงาน นั่นหมายถึง ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของวัสดุที่เสื่อมลง ตลอดจนการเพิ่มอัตราเสี่ยงต่อชีวิตของผู้ประกอบการในโรงงานอุตสาหกรรม

การใช้สารหน่วงการกัดกร่อน (Corrosion Inhibitors) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพวิธีหนึ่งที่ใช้ในการลดอัตราการกัดกร่อนของโลหะที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เอื้ออำนวยต่อการเกิดการกัดกร่อน เช่น ในสภาวะที่เป็นกรดอย่างรุนแรง โดยที่สารหน่วงการกัดกร่อนได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับ acid pickling, acid cleaning, acid descaling, water pipes, extraction and processing of oil and gas, water treatment และ heat-exchange equipment (Benabdellah *et al.*, 2006; Rozenfeld, 1981)

สารหน่วงการกัดกร่อนที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ สารหน่วงการกัดกร่อนประเภทอินทรีย์ (Organic Corrosion Inhibitors) ที่มีไนโตรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์หรือพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล ตัวอย่างเช่น เอมีน (amines) ไพรีดีน (pyridines) ไธโอไซยาเนต (thiocyanates) และสารหน่วงการกัดกร่อนประเภทอนินทรีย์ (Inorganic Corrosion Inhibitors) ตัวอย่างเช่น โครเมต (chromate) ไดโครเมต (dichromate) ไนไตรท์ (nitrite) (Fontana, 1987; Rozenfeld, 1981) อย่างไรก็ตามเนื่องจากความมีพิษและอันตรายที่เกิดจากสารสังเคราะห์เหล่านี้ ทำให้มีการจำกัดปริมาณการใช้หรือการห้ามใช้สารหน่วงการกัดกร่อนที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมในประเทศต่าง ๆ (Bethécourt *et al.*, 1998; Matsushita, 2004) ดังนั้นการศึกษาและพัฒนาสารหน่วงการกัดกร่อนที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงมีความสำคัญและเป็นที่ต้องการมากยิ่งขึ้นต่ออุตสาหกรรมต่าง ๆ

ในต่างประเทศได้มีการศึกษาและวิจัยกันอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับการนำสารสกัดจากพืชและสมุนไพรมาใช้เป็นสารหน่วงการกัดกร่อน ซึ่งสารที่สกัดได้จากพืชนี้จัดเป็นสารหน่วงการกัดกร่อนประเภทอินทรีย์ (Organic Inhibitors) ตัวอย่างของสารที่สกัดได้จากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้เป็นสารหน่วงการกัดกร่อนได้ ได้แก่ สารประเภทแทนนิน (tannin) ยูจีนอล (eugenol) และ ลอร์โซน (lawsone) เป็นต้น (Chaieb *et*

al., 2005; El-Etre et al., 2005; Martinez and Stagljar, 2003) โดยที่สารประเภทแทนนินเป็นสารกลุ่มที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีประสิทธิภาพในความต้านทานการกัดกร่อนที่ค่อนข้างสูง

เป็นที่น่าเสียดายว่า ปัจจุบันประเทศไทยยังคงพึ่งพาเทคโนโลยีทางด้านสารหน่วงการกัดกร่อนจากต่างประเทศทำให้เราขาดความรู้ทางด้านเทคโนโลยีสารหน่วงการกัดกร่อน ดังนั้นถ้าเราสามารถที่จะผลิตสารหน่วงการกัดกร่อนได้เองจากพืชที่มีอยู่ในประเทศไทย จะทำให้เราสามารถลดต้นทุนการนำเข้าสารหน่วงการกัดกร่อนจากต่างประเทศ รวมไปถึงการสร้างองค์ความรู้ให้เกิดขึ้นภายในประเทศพร้อมทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าของพืชภายในประเทศอีกด้วย

จากเหตุผลข้างต้นทำให้มีความสนใจที่จะศึกษาการใช้สารสกัดจากพืชที่มีสารแทนนินและเป็นพืชที่มีอยู่ในประเทศไทย เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารหน่วงการกัดกร่อน พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับสารสกัดธรรมชาติที่มีอยู่ในเชิงพาณิชย์

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ศึกษาการนำสารสกัดจากพืชที่มีอยู่ในประเทศไทยในกลุ่มของแทนนินมาใช้เป็นสารหน่วงการกัดกร่อนเพื่อสำรวจความเป็นไปได้ในการนำไปสู่โอกาสในเชิงพาณิชย์ในอนาคต
2. ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสกัดจากพืชที่มีต่อประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารหน่วงการกัดกร่อน
3. ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพของสารหน่วงการกัดกร่อนที่สกัดจากพืช
4. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารหน่วงการกัดกร่อนที่สกัดจากพืชในโครงการนี้กับสารสกัดธรรมชาติที่มีอยู่ในเชิงพาณิชย์

3. การทบทวนวรรณกรรม

สารหน่วงการกัดกร่อน (Corrosion Inhibitor) คือ สารที่เติมลงไปในช่วงเวลาเล็กน้อยแล้วสามารถลดอัตราการกัดกร่อนของโลหะได้ เราสามารถแบ่งประเภทของสารหน่วงการกัดกร่อนได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ สารหน่วงการกัดกร่อนอินทรีย์ (Organic Corrosion Inhibitor) และสารหน่วงการกัดกร่อนอนินทรีย์ (Inorganic Corrosion Inhibitor)

ตัวอย่างของสารหน่วงการกัดกร่อนอินทรีย์ ได้แก่ benzotriazole, hydrazine, bis-(2-hydroxyethyl) isotridecyloxypropylamine, 2-benzothiazoleethiol เป็นต้น (Ash and Ash, 2001)

ตัวอย่างของสารหน่วงการกัดกร่อนอนินทรีย์ ได้แก่ phosphonate, molybdate, sodium nitrite, sulfite, chromate, silicate เป็นต้น (Ash and Ash, 2001)

ส่วนใหญ่จะพบว่าสารหน่วงการกัดกร่อนที่เป็นสารเคมีจะมีความเป็นพิษและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมค่อนข้างมาก ทำให้มีการจำกัดปริมาณการใช้หรือยกเลิกการใช้สารหน่วงการกัดกร่อนบางประเภท โดยเฉพาะประเทศในแถบยุโรป ดังนั้นสารสกัดธรรมชาติซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่มีความเป็นพิษ และสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นสารหน่วงการกัดกร่อนได้ เนื่องจากสมบัติของการเป็นสารหน่วงการกัดกร่อนประเภทอินทรีย์ที่ดี คือ โครงสร้างโมเลกุลของสารหน่วงการกัดกร่อนจำเป็นต้องมีอะตอมของ N, O หรือ S เพื่อให้มีความสามารถในการดูดซับหรือเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับพื้นผิวของโลหะได้ (El-Etre *et al.*, 2005) ซึ่งสารสกัดธรรมชาติโดยทั่วไปจะประกอบด้วยโครงสร้างที่มีอะตอมของ N, O หรือ S อยู่แล้ว (Li *et al.*, 2005; Satapathy *et al.*, 2009)

ตารางที่ 1 แสดงสรุปข้อมูลของสารสกัดจากธรรมชาติที่มีสมบัติในการเป็นสารหน่วงการกัดกร่อนได้ โดยที่ประสิทธิภาพในการหน่วงการกัดกร่อนหรือร้อยละในการป้องกันการกัดกร่อน (%IE) จะแตกต่างกันออกไปขึ้นกับ ชนิดของสารสกัดที่ได้ โลหะที่ใช้ทดสอบ สารละลายที่ใช้ทดสอบ เป็นต้น ตัวอย่างเช่น สารสกัดจากใบกระเพรา (*Ocimum sanctum*) มีค่าประสิทธิภาพในการหน่วงการกัดกร่อนของโลหะ Mild Steel ใน 0.5 N HCl ถึง 98.67% (Kumpawat *et al.*, 2010) ต้นกระดุกไก่ขาว (*Justicia gendarussa*) มีสารพอลิฟีนอลอยด์ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการหน่วงการกัดกร่อนของโลหะถึง 93% (Satapathy *et al.*, 2009) ต้นไต้ใบ (*Phyllanthus amarus*) มีความสามารถในการยับยั้งการกัดกร่อนของโลหะ Mild Steel ใน 1 M, 2 M, 5 M HCl และ H_2SO_4 ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนถึง 94.1% (Okafor *et al.*, 2008)

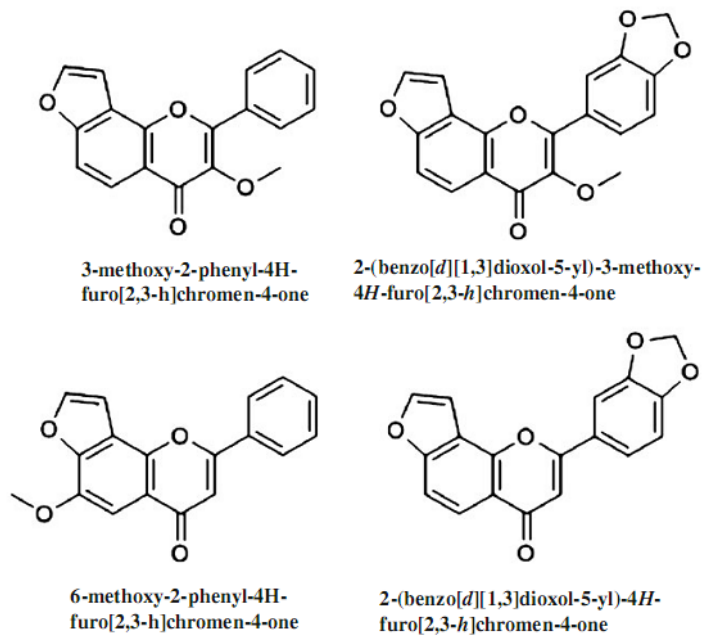
ตารางที่ 1 สรุปข้อมูลของการศึกษาสารหน่วงการกัดกร่อนจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ

ปี	พืช	สารละลายที่ใช้สกัด	สารสกัดที่ได้	สารละลายที่ใช้ทดสอบ	โลหะที่ใช้ทดสอบ	%IE	เอกสารอ้างอิง
2012	<i>Spondis mombin L.</i>	0.5 M H ₂ SO ₄	Ascorbic Acid Riboflavin Thiamine Nicotinic acid	0.5 M H ₂ SO ₄	Al	95.1	(Obi-Egbedi <i>et al.</i> , 2012)
2010	<i>Ocimum sanctum</i> (Holy Basil)	-	-	0.5 N HCl	Mild Steel	98.67	(Kumpawat <i>et al.</i> , 2010)
2010	Vanillin	-	Vanillin	3.0 M H ₃ PO ₄	Steel	80.7	(Li <i>et al.</i> , 2010)
2010	<i>Pongamia pinntana</i>	H ₂ O	-	1 M HCl	Mild steel	98	(Singh <i>et al.</i> , 2010)
2010	<i>Aloe vera</i>	-	Aloin Aloe emodin	2 M HCl	Zn	60.7	(Abiola and James, 2010)
2009	<i>Justicia gendarussa</i>	H ₂ O	Alkaloids Flavonoids	1 M HCl	Mild Steel	93	(Satapathy <i>et al.</i> , 2009)
2008	<i>Phyllanthus amarus</i>	2M , 5M H ₂ SO ₄	Alkaloids Flavonoids	1 M , 2 M , 5 M HCl และ H ₂ SO ₄	Mild steel	94.1	(Okafor <i>et al.</i> , 2008)
2007	<i>Rhizophora apiculata</i>	70% aqueous acetone	Catechin Epicatechin Epigallocatechin Epicatechin gallate	0.5 M HCl	Steel	92.1	(Rahim <i>et al.</i> , 2007)
2006	<i>Mentha pulegium</i>	-	Pennyroyal oil R-(+)-Pulegone	1 M HCl	Steel	78	(Bouyanzer <i>et al.</i> , 2006)
2006	<i>Ammi visnaga</i>	H ₂ O	Khellin and Visnagin	2 M HCl	SX 316 steel	99.30	(El-Etre, 2006)
2006	<i>Artemisia herba alba</i>	H ₂ O	Artemisia oil	2 M H ₃ PO ₄	steel	74	(Benabdellah <i>et al.</i> , 2006)
2005	Henna (Lawsonia)	H ₂ O	Tannin and Lawsone	0.1 M HCl	C-Steel Ni Zn	95.78 88.77 76.19	(El-Etre <i>et al.</i> , 2005)
2005	<i>Coptis chinensis</i>	-	Berberine	1 M H ₂ SO ₄	Mild steel	97.7	(Li <i>et al.</i> , 2005)
2004	<i>Tamarix articulata</i>	H ₂ O	Gallic acid Ellagic acid Flavandiol	0.1 M NaCl	Cu	93.2	(Mabrou <i>et al.</i> , 2004)
2004	<i>Nypa fruticans Wurmb</i>	-	Nitrogenous compounds +	HCl	Mild Steel	75.11	(Orubite <i>et al.</i> , 2004)

			tannin				
2003	Chestnut	-	Ellagic acid Gallic acid	2 M HCl	Low C-Steel	-	(Martinez and Stagljjar, 2003)
2003	<i>Opuntia ficus</i> Mill	-	Polysaccharide	2 M HCl	Al	96	(El-Etre, 2003)
2001	Mimosa	-	Tannin	0.1 M , 0.2 M H ₂ SO ₄	Low C-Steel	-	(Martinez and Stern, 2001)
2000	Radiata pine bark Black acacia	-	Tannin	3-5 wt% NaCl	Steel	-	(Matamala <i>et al.</i> , 2000)
2000	Trefoil flower honey	-	-	High saline water	C-Steel	43.42	(El-Etre and Abdallah, 2000)
1999	<i>Azadirachta indica</i>	H ₂ O	Limonoids r-hydroxybutenolide side chain nimocin meldenindiol	3% NaCl	Mild Steel	86.1	(Quraishi <i>et al.</i> , 1999)
1999	<i>Punica granatum</i>	H ₂ O	Tannin, sugar	3% NaCl	Mild Steel	79.2	(Quraishi <i>et al.</i> , 1999)
1999	<i>Momordica charantia</i>	H ₂ O	Proteins carbohydrates fiber	3% NaCl	Mild Steel	82.4	(Quraishi <i>et al.</i> , 1999)
1998	Natural honey	-	-	0.5 M HCl	Cu	89	(El-Etre, 1998)

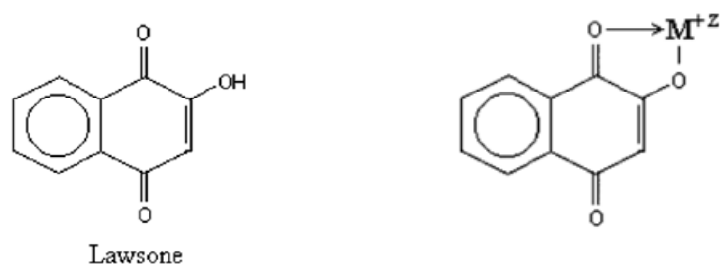
กลไกการป้องกันการกัดกร่อนของสารหน่วงการกัดกร่อนของสารสกัดจากธรรมชาติ มี 2 กลไกหลัก คือ

1. การดูดซับของสารหน่วงการกัดกร่อนกับผิวของโลหะด้วยแรงทางกายภาพ เป็นลักษณะของการดูดซับของโมเลกุลที่มีเข้าไปเกาะที่พื้นผิวของโลหะ โดยเกิดการดูดซับของสารหน่วงการกัดกร่อนผ่านอะตอมของไนโตรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ ทำให้เกิดการขัดขวางกระบวนการถ่ายโอนมวลและประจุที่บริเวณพื้นผิวของโลหะ จึงทำให้สามารถลดอัตราการกัดกร่อนได้ (El-Etre *et al.*, 2005; Satapathy *et al.*, 2009) ตัวอย่างเช่น ต้น Pongamia Pinnata หรือมีชื่อไทยเรียกว่า หยีน้า สารสกัดจากต้นหยีน้ามีประสิทธิภาพในการหน่วงการกัดกร่อนถึง 98% เนื่องจากเกิดการดูดซับของสารสกัดกับพื้นผิวของโลหะผ่านอะตอมของออกซิเจน และฟอสฟอรัสของวงอะโรมาติก ภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างของสารสกัดจากต้นหยีน้า (Singh *et al.*, 2011)



ภาพที่ 1 โครงสร้างหลักของสารสกัดที่ได้จากต้นหยีน้ำ (*Pongamia Pinnata*) (Singh *et al.*, 2011)

2. การดูดซับของสารหน่วงการกักร่อนกับผิวของโลหะด้วยแรงทางเคมี นั้นคือ เกิดการสร้างพันธะระหว่างสารหน่วงการกักร่อนกับพื้นผิวของโลหะ ตัวอย่างเช่น พืชในกลุ่มต้นเทียน (*Lawsonia*) มีรายงานว่ากลไกการหน่วงการกักร่อนเป็นการเกิดพันธะระหว่างสารสกัดกับไอออนของโลหะก่อน ดังแสดงในภาพที่ 2 แล้วค่อยเกิดการดูดซับลงบนพื้นผิว ทำให้พื้นผิวโลหะถูกกักร่อนน้อยลง (El-Etre *et al.*, 2005)

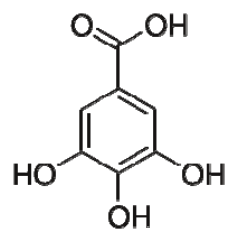


ภาพที่ 2 โครงสร้างหลักของสารสกัดที่ได้จากต้น *Lawsonia* (ชาฮาย) และกลไกการเกิดพันธะกับโลหะ (ขวา) (El-Etre *et al.*, 2005)

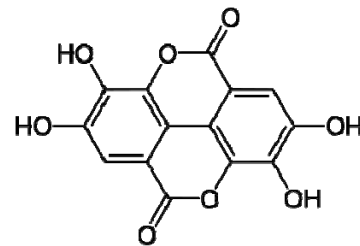
จากตารางที่ 1 พบว่าแทนนิน (tannin) เป็นหนึ่งในสารสกัดจากธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารหน่วงการกัดกร่อน แทนนินเป็นสารพอลิฟีนอลิกที่มีโมเลกุลใหญ่และโครงสร้างซับซ้อน มีสถานะเป็นกรดอ่อน รสฝาด เป็นสารให้ความฝาดในพืช พบได้ในใบพืชหลายชนิด เป็นสารที่แยกทำให้บริสุทธิ์ได้ยาก เพราะไม่ตกผลึก พบได้ในรูปอิสระและพวกกัลลูโคไซด์ และคุณสมบัติของแทนนินจะขึ้นกับชนิดและขนาดของโมเลกุล แทนนินสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด (กฤษณพันธ์, 2536) คือ

1. ไฮโดรไลซ์แทนนิน (Hydrolysable tannin)

ไฮโดรไลซ์แทนนิน (Hydrolysable tannin) หรือ แกลโลแทนนิน (Gallo tannin) หรือ ไพโร-แกลโลแทนนิน (Pyrogallo Tannin) เป็นสารเอสเทอร์ที่เกิดจากน้ำตาล หรือ สารกลุ่มโพลีฟีนอล แทนนินชนิดนี้เป็นสารที่สามารถถูกแยกออกเป็นโมเลกุลเล็กๆ ได้ด้วยกรด หรือ เอนไซม์แทนเนส (tannase) พบมากในส่วนใบ ผัก และส่วนที่ปูดออกมาจากปกติ สารในกลุ่มประเภทไฮโดรไลซ์แทนนินที่สำคัญ ได้แก่ Gallic acid, Ellagic acid ดังแสดงตัวอย่างสารประเภทแทนนินในภาพที่ 3



Gallic acid

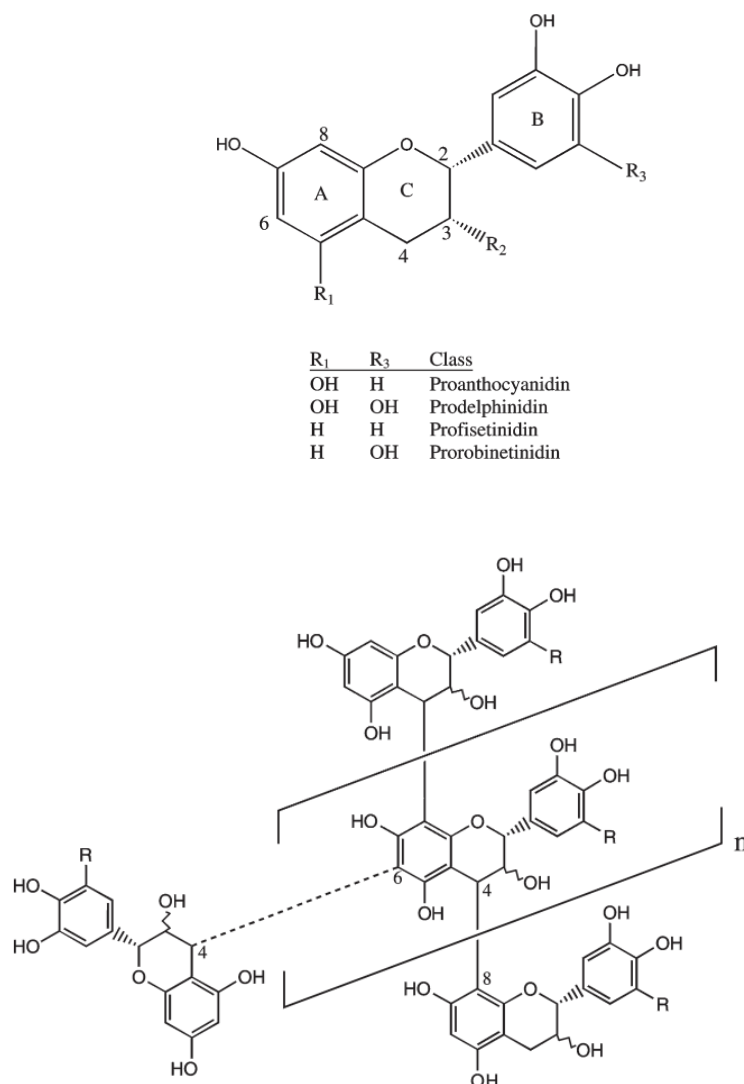


Ellagic acid

ภาพที่ 3 ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของไฮโดรไลซ์แทนนิน (Mabroure *et al.*, 2004)

2. คอนเดนส์แทนนิน (Condensed tannin)

คอนเดนส์แทนนิน (Condensed tannin) หรืออาจเรียกว่า คาเทชิน (Catechin) หรือ โปรแอนโทไซยานิน (Proanthocyanin) พบได้ในส่วนเปลือกต้น และแก่นไม้เป็นส่วนใหญ่ มีสูตรโครงสร้างเกี่ยวข้องกับสารพอลิฟลาโวนอยด์ เป็นโพลิเมอร์ของ Flavans โดยเกิดจากโมเลกุลของ flavan – 3 – ol จับกันผ่านพันธะคาร์บอน – คาร์บอน โดยส่วนใหญ่จะจับกันที่ตำแหน่ง 4-8 หรือ 4-6 ดังแสดงในภาพที่ 4 และเป็นสารที่ไม่สามารถถูกย่อยได้ด้วยกรดหรือเอนไซม์



ภาพที่ 4 ตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของคอนเดนส์แทนนิน (Schofield *et al.*, 2001)

จากตารางที่ 1 พบว่าในการสกัดสารออกจากพืชสามารถทำได้โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ น้ำ หรือ ตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำกับตัวทำละลายอินทรีย์ เนื่องจากน้ำเป็นหนึ่งในตัวทำละลายที่สามารถนำมาใช้ในการสกัดแทนนินออกจากพืชได้ และสารสกัดแทนนินที่ได้จากการใช้น้ำสกัดได้แสดงให้เห็นถึงการมีประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารหน่วงการกักต่อนได้ค่อนข้างดี (El-Etre *et al.*, 2005; Mabroure *et al.*, 2004; Quraishi *et al.*, 1999; Satapathy *et al.*, 2009) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้น้ำมาเป็นตัวทำละลายในการสกัดสารแทนนินออกจากพืช ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวก ราคาถูก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยจะใช้น้ำมา

สกัดสารแทนนินออกจากพืชไทย 2 ชนิด ได้แก่ ฟ้าทะลายโจรและใบชา เนื่องจากเป็นพืชที่หาง่าย มีราคาถูก และเป็นพืชที่มีสารแทนนินในปริมาณสูง (Vijaya et al., 2008; Wheeler, 1979)

4. การออกแบบการวิจัย

เพื่อให้ได้ข้อมูลการวิจัย การวิจัยจะทำตามลำดับขั้นตอนต่อไปนี้

1. ค้นคว้าและสืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสารหน่วงการกัดกร่อนจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกพืช เช่น พืช/สมุนไพรที่มีอยู่ในประเทศไทยที่สามารถนำมาใช้เป็นสารหน่วงการกัดกร่อนได้
2. เลือกพืช/สมุนไพรที่มีในประเทศไทย ที่มีแนวโน้มเป็นสารหน่วงการกัดกร่อนที่มีประสิทธิภาพมาทำการสกัด
3. ศึกษาวิธีการสกัดที่เหมาะสมกับพืชที่เลือกนำมาใช้ในโครงการนี้
4. เลือกชนิดของโลหะและสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของสารหน่วงการกัดกร่อน โดยคำนึงถึงประโยชน์ในการนำไปต่อยอดและการพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรม
5. สกัดจากพืชที่ได้จะถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงการกัดกร่อน และหาสภาวะที่ดีที่สุดในการใช้งาน เช่น ความเข้มข้นของสารสกัดที่เหมาะสม อุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งาน
6. เปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารหน่วงการกัดกร่อนที่สกัดจากพืชที่ได้จากโครงการวิจัยนี้กับสารสกัดธรรมชาติที่มีอยู่ในเชิงพาณิชย์

5. ขอบเขตของการวิจัย

1. งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำสารสกัดแทนนินจากพืช เช่น สมุนไพรในประเทศมาใช้เป็นสารหน่วงการกัดกร่อน อย่างไรก็ตามเนื่องจากสารแทนนินมีอยู่ในพืชไทยมากมายหลายชนิด และด้วยเวลาที่จำกัดในการทำโครงการวิจัยนี้ ดังนั้น ในโครงการวิจัยนี้จึงได้เลือกพืชเพียง 2 ชนิดที่มีสารแทนนินอยู่ในปริมาณมากพอสมควรและหาได้ง่าย ได้แก่ ใบชาเขียวและฟ้าทะลายโจร มาศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการที่จะนำมาใช้เป็นสารหน่วงการกัดกร่อน
2. การทดสอบประสิทธิภาพของสารหน่วงการกัดกร่อน ผู้วิจัยได้เลือกที่จะทำการทดสอบกับโลหะประเภท C-steel เนื่องจากโลหะประเภทนี้เป็นโลหะที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ค่อนข้างมาก เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเลียม อุตสาหกรรมโรงไฟฟ้า เพื่อที่จะให้โครงการวิจัยนี้สามารถนำไปต่อยอดเพื่อประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต

3. สภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการทดสอบการกัดกร่อนในโครงการวิจัยนี้ คือ สารละลายกรด เนื่องจากสารละลายกรดได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม เช่น acid pickling, acid cleaning, acid descaling นอกจากนั้นแล้วยังเป็นสารละลายที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนด้วยอัตราเร็วที่สูง

4. ศึกษาตัวแปรทางด้านผลของความเข้มข้นของสารกัดแทนนินและผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพของสารกัดแทนนิน เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดในการทำงานของสารหน่วงการกัดกร่อน

5. ผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหน่วงการกัดกร่อนระหว่างสารแทนนินที่สกัดจากพืชไทยและสารสกัดธรรมชาติที่มีอยู่ในเชิงพาณิชย์อยู่แล้ว เพื่อสำรวจถึงความเป็นไปได้ของนำสารสกัดแทนนินจากพืชไทยไปใช้เป็นสารหน่วงการกัดกร่อนในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคต

6. ระเบียบวิธีวิจัย

ทฤษฎีที่เป็นไปได้ของการลดอัตราการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการใช้สารแทนนินเป็นสารหน่วงการกัดกร่อนมีอยู่ 2 ทฤษฎี ได้แก่ การดูดซับของสารแทนนินบนพื้นผิวโลหะ ส่งผลให้เกิดชั้นบนโลหะและขัดขวางกระบวนการละลายของโลหะ และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำระหว่างแทนนินกับไอออนของโลหะบนพื้นผิว ทำให้ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่พื้นผิวของโลหะ

7. ขั้นตอนวิธีการวิจัย

7.1 โลหะและการเตรียมพื้นผิว

ในงานวิจัยนี้โลหะที่ใช้ทดสอบคือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (AISI 1018) ที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร โดยจะทำการตัดชิ้นโลหะให้มีขนาด 6 cm x 6 cm สำหรับการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีการหาค่าหนักที่หายไป และขนาด 2 cm x 2 cm สำหรับการทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า จากนั้นนำแผ่นชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายขัดโลหะจนถึงกระดาษทรายเบอร์ 4000 ทำความสะอาดด้วยอะซิโตนและเป่าให้แห้ง องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1018 ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ AISI 1018

ธาตุ	C	Si	Mn	P	S	อื่น ๆ	Fe
ร้อยละโดยน้ำหนัก	0.14-0.19	0.15-0.35	0.40-0.80	0.040	0.040	0.30Cr	ที่เหลือ

7.2 พืชที่ใช้ทดสอบและการเตรียมสารสกัด

พืชที่ใช้ในการทดสอบในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด ได้แก่ ฟ้าทะลายโจรและใบชาเขียว ซึ่งพืชแห้งแต่ละชนิดมา 5 กรัม จากนั้นนำไปต้มในน้ำกลั่นปริมาตร 200 cm³ ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำมากรองและระเหยน้ำออกเพื่อให้ได้สารสกัดเข้มข้นปริมาณ 5 กรัม จากนั้นเตรียมสารสกัดให้มีความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้ 0.05 g/l 0.1 g/l 0.3 g/l 0.5 g/l และ 1.0 g/l โดยใช้สารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M เป็นตัวทำละลาย

7.3 การวิเคราะห์แทนนิน

7.3.1 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

การมีอยู่ของแทนนินในสารสกัด จะทำการวิเคราะห์โดยนำสารสกัดเข้มข้นผสมกับน้ำกลั่นปริมาตร 5 cm³ ในหลอดทดลอง จากนั้นเติมผง FeCl₃ แล้วเขย่าให้เข้ากัน สีของของผสมจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้มถ้ามีไฮโดรไลซ์แทนนิน และจะเป็นสีเขียวถ้าในสารละลายมีคอนเดนส์แทนนิน (Evans, 1996)

7.3.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ

งานวิจัยนี้จะใช้วิธี Folin-Ciocalteu (Mueller-Harvey, 2001) ในการหาปริมาณแทนนินที่มีอยู่ในสารสกัด วิธี Folin-Ciocalteu เป็นวิธีที่ใช้ในการปริมาณของสารประกอบฟีนอลโดยรวม โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 760 nm ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์และใช้กรดแทนนิกเป็นตัวแทนในการสร้างกราฟมาตรฐาน

7.4 การทดสอบประสิทธิภาพของสารสกัดในการทำหน้าที่เป็นสารหน่วงการกัดกร่อน

7.4.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นที่มีต่อประสิทธิภาพของสารสกัด

7.4.1.1 การหาน้ำหนักที่หายไป

นำชิ้นโลหะที่ผ่านการเตรียมพื้นผิวเรียบร้อยแล้วมาชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปจุ่มในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มีและไม่มีสารสกัดอยู่ที่มีความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 0.05 g/l 0.1 g/l 0.3 g/l 0.5 g/l และ 1.0 g/l ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยกำหนดให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสเท่ากับ 16 cm² หลังจากนั้นนำแผ่นตัวอย่างไปทำความสะอาดเพื่อกำจัดผลิตภัณฑ์ที่ติดอยู่ที่ผิวของชิ้นงานโดยการขัดถูด้วยจุกยาง ล้างด้วยน้ำกลั่น ตามด้วยอะซิโตน เป่าให้แห้งและนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง คำนวณหาร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนจากน้ำหนักที่หายไปของโลหะ

ร้อยละการป้องกันการกัดกร่อน (% Inhibition Efficiency) สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรดังแสดงในสมการ (1)

$$\% \text{ Inhibition Efficiency (\%IE)} = \frac{W_o - W}{W_o} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ W_o คือ น้ำหนักของโลหะที่หายไปเมื่อไม่มีการเติมสารสกัด

W คือ น้ำหนักของโลหะที่หายไปเมื่อมีการเติมสารสกัด

อัตราการกัดกร่อน (Corrosion Rate, mm/year) สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรดังแสดงในสมการ (2)

$$\text{Corrosion Rate (mm/year)} = \frac{87.6W}{DAT} \quad (2)$$

โดยที่ W คือ น้ำหนักของโลหะที่หายไป (mg)

D คือ ความหนาแน่นของโลหะ (g/cm^3)

A คือ พื้นที่ผิวสัมผัส (cm^2)

T คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ (hr)

การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชิ้นโลหะหลังการทดสอบ ทำโดยการสังเกตและถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, Hitachi S2500)

7.4.1.2 การวัดทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิกโพลาไรเซชัน (Potentiodynamic Polarization)

เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบเป็นเซลล์ชนิด 3 ขั้ว ประกอบด้วย ขั้วอ้างอิง (reference electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ ขั้วไฟฟ้าช่วย (auxiliary electrode) เป็นแท่งแพลทินัม และขั้วไฟฟ้าใช้งาน (working electrode) คือแผ่นโลหะเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่มีพื้นที่ผิวสัมผัส 1 cm^2 ขั้วไฟฟ้าทั้งสามจะต่อเข้ากับเครื่องโพเทนชิโอสแตทกัลวานอสแตท (Potentiostat/Galvanostat, AUTOLAB PGSTAT302N) เพื่อใช้ในการวัดกราฟแอโนดิกและแคโทดิกโพลาไรเซชัน สารละลายที่ใช้ทดสอบ คือ สารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มีและมีส่วนกัดที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 0.05 g/l 0.1 g/l 0.3 g/l 0.5 g/l และ 1.0 g/l โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

7.4.2 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพของสารสกัด

อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของสารสกัด ได้แก่ 27 °C (อุณหภูมิห้อง) 30 °C 45 °C และ 60 °C โดยจะทำการทดสอบประสิทธิภาพที่ความเข้มข้นของสารสกัด 1 g/l และทดสอบด้วยวิธีการหาน้ำหนักที่หายไปและการวัดทางเคมีไฟฟ้าตามที่กล่าวไว้ข้างต้น

7.4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชากับสารสกัดธรรมชาติที่มีอยู่ในเชิงพาณิชย์

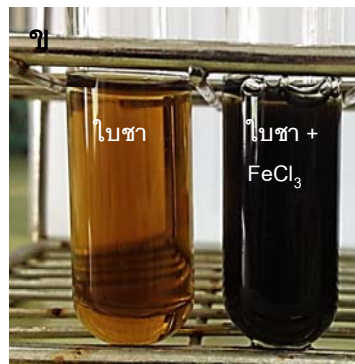
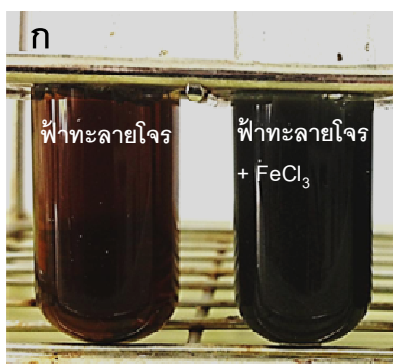
ได้เลือกสารสกัดธรรมชาติที่มีอยู่ในเชิงพาณิชย์มา 1 ชนิดเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับสารสกัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ความเข้มข้นของสารสกัดที่ใช้ในการทดสอบ คือ 1 g/l ทำการทดสอบด้วยวิธีการหาน้ำหนักที่หายไปที่อุณหภูมิห้อง

8. ผลวิจัย

8.1 การวิเคราะห์แทนนิน

8.1.1 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

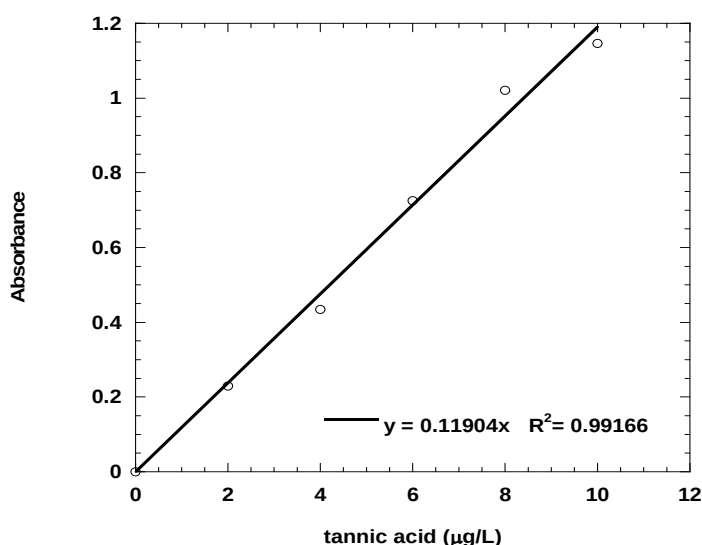
ภาพที่ 5ก และ ข แสดงผลการทดสอบเชิงคุณภาพของการมีอยู่ของแทนนินในสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชา ตามลำดับ โดยสารสกัดทั้งสองชนิดให้ผลเหมือนกัน นั่นคือ หลังจากเติมผง FeCl_3 ลงในสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชา พบว่าสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้ม ซึ่งแสดงถึง การมีแทนนินประเภทไฮโดรไลซ์



ภาพที่ 5 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพของแทนนินในสารสกัด ก. ฟ้าทะลายโจร ข. ใบชา

8.1.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ

ภาพที่ 6 แสดงกราฟมาตรฐานของกรดแทนนิก ที่ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 760 nm กราฟมาตรฐานที่ได้เป็นกราฟเส้นตรง มีค่า $R^2 = 0.9917$ และสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้เป็น $y = 0.119x$ และได้ใช้กราฟนี้ในการคำนวณหาปริมาณของแทนนินในสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชา จากการทดลองพบว่าสารสกัดฟ้าทะลายโจรเข้มข้น 1 g/l มีปริมาณแทนนินอยู่ 4.9 ± 0.37 ppm ส่วนสารสกัดใบชาเข้มข้น 1 g/l มีปริมาณแทนนินอยู่ 3.3 ± 0.16 ppm



ภาพที่ 6 กราฟมาตรฐานของกรดแทนนิก

8.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นที่มีต่อประสิทธิภาพของสารสกัด

8.2.1 การศึกษาด้วยการหาน้ำหนักที่หายไป

ตารางที่ 3 แสดงร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนของสารสกัดและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหลังจากจุ่มใน 0.1 M HCl ที่มีความเข้มข้นของสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชาต่าง ๆ กัน พบว่าสารสกัดจากฟ้าทะลายโจรและใบชาให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดจาก 0 g/l ไปเป็น 1 g/l จะทำให้อัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำลดลงและร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน นั้นแสดงถึง ความสามารถในการเป็นสารหน่วงการกัดกร่อนของสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชา พบว่าร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนจะเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชาจาก 0.5 g/l ไปเป็น 1 g/l โดยที่ประสิทธิภาพของสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชาจะดีที่สุดเมื่อใช้สารสกัดที่มีความเข้มข้น 1.0 g/l จะให้ค่าร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนได้มากถึง 96.3% ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการกัดกร่อน 0.4 mm/year และเป็นอัตราการกัดกร่อนที่ลดลงประมาณ 28 เท่า เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้เติมสารสกัดจากฟ้าทะลายโจรและใบชา และถือได้ว่าเป็น

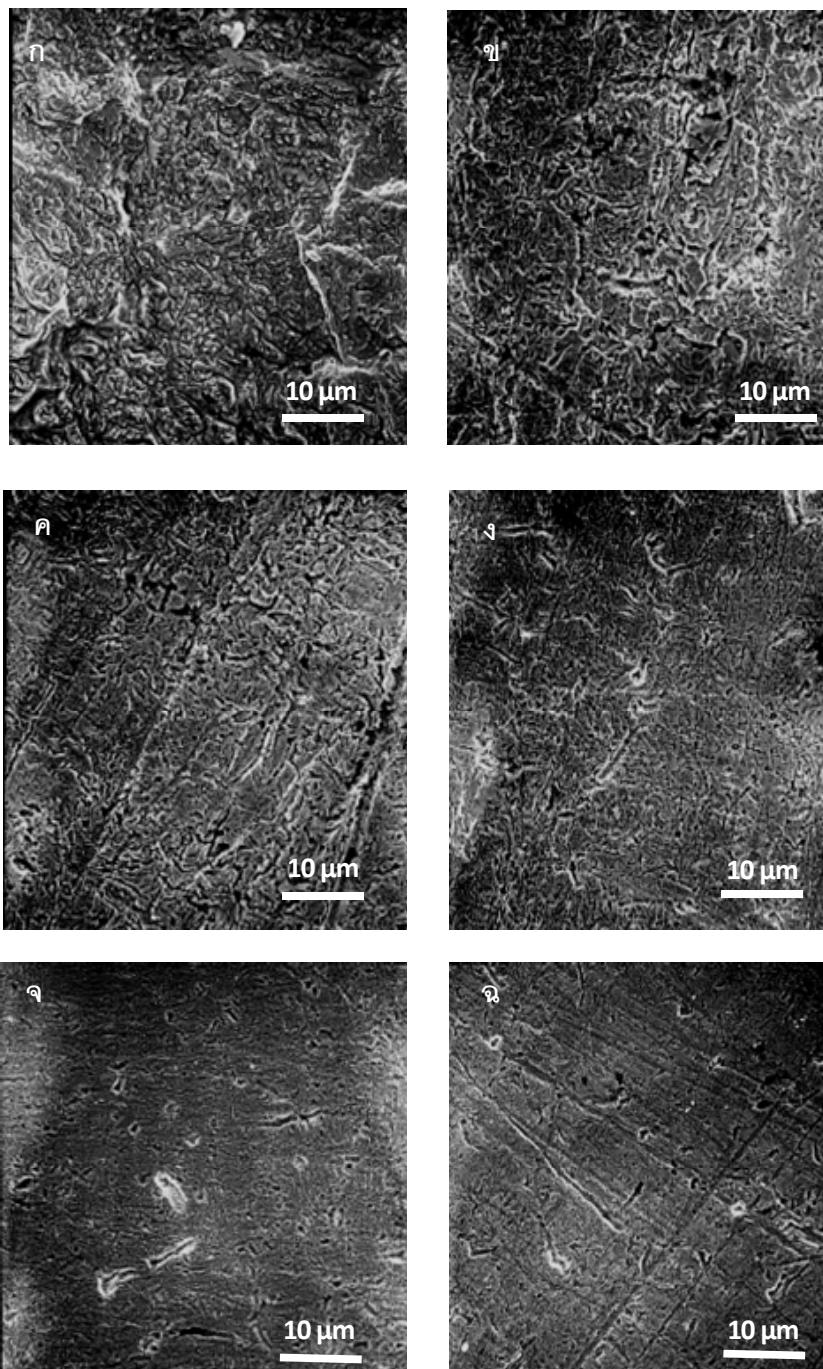
โลหะที่มีความต้านทานการกัดกร่อนดี (Fontana, 1987) ผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับปริมาณแทนนินที่มีอยู่ในสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชา นั่นคือ ปริมาณแทนนินของสารสกัดทั้ง 2 ประเภทไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 3 ร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนของสารสกัดและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มีและมีสารสกัดที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

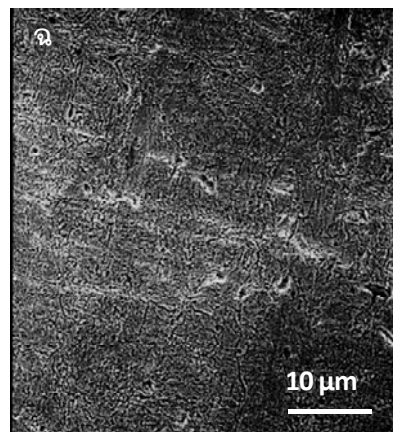
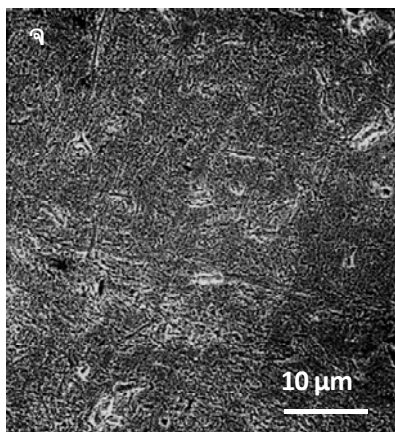
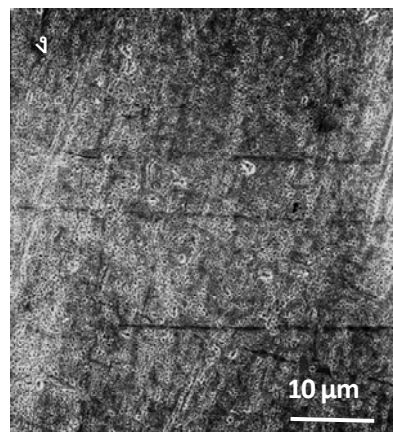
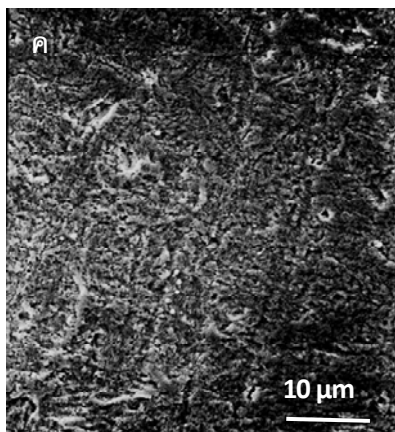
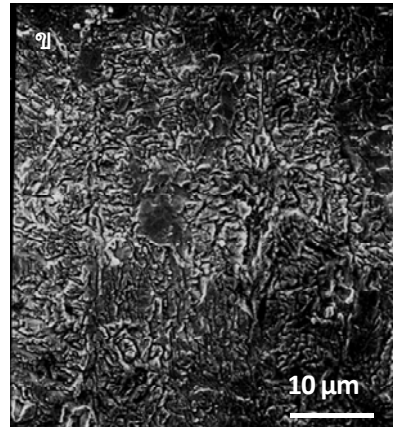
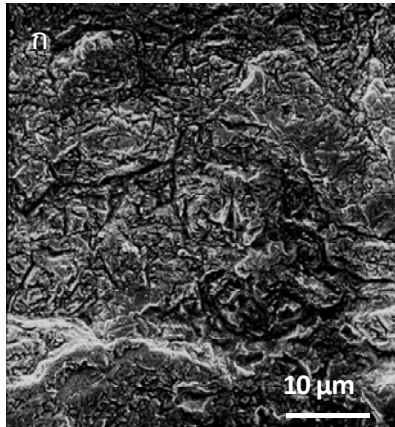
ความเข้มข้น ของสารสกัด (g/l)	ร้อยละการป้องกันการกัดกร่อน (%IE)		อัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate, mm/year)	
	ฟ้าทะลายโจร	ใบชา	ฟ้าทะลายโจร	ใบชา
0	-	-	11.4 ± 0.59	
0.05	79.1 ± 5.45	91.9 ± 1.21	1.6 ± 0.47	0.9 ± 0.10
0.1	88.6 ± 7.55	94.3 ± 1.53	1.3 ± 0.77	0.6 ± 0.13
0.3	93.8 ± 0.58	95.3 ± 0.94	0.7 ± 0.04	0.5 ± 0.09
0.5	95.2 ± 0.63	95.7 ± 0.54	0.5 ± 0.06	0.5 ± 0.04
1.0	96.3 ± 0.70	96.3 ± 0.36	0.4 ± 0.07	0.4 ± 0.02

ภาพที่ 7 และ ภาพที่ 8 แสดงภาพถ่ายจุลทรรศน์ของพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหลังจากจุ่มลงในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยในสารละลายมีสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชาที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่าพื้นผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำกรณีที่ไม่มีการเติมสารสกัดจะมีความขรุขระมาก ดังแสดงในภาพ 7ก และ 8ก ซึ่งแสดงถึงเกิดการกัดกร่อนมาก ส่วนพื้นผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่จุ่มในสารละลายกรดที่มีการเติมสารสกัดทั้งจากฟ้าทะลายโจรและใบชา พบว่าจะมีความขรุขระน้อยกว่า และพื้นผิวจะมีความเรียบมากขึ้นหรือการกัดกร่อนน้อยลงเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชา ดังแสดงในภาพ 7ข-7ฉ และ 8ข-8ฉ ตามลำดับ

การลดลงของอัตราการกัดกร่อนเมื่อมีการเติมสารสกัดจากฟ้าทะลายโจรและใบชาเป็นผลสืบเนื่องมาจากการดูดซับของแทนนินบนพื้นผิวของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ทำให้เกิดเป็นชั้นป้องกันบาง ๆ บนพื้นผิวของเหล็ก ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันบนพื้นผิวของเหล็กเกิดได้ยากขึ้น ทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง (Li *et al.*, 2010; Martinez and Stern, 2001; Satapathy *et al.*, 2009)

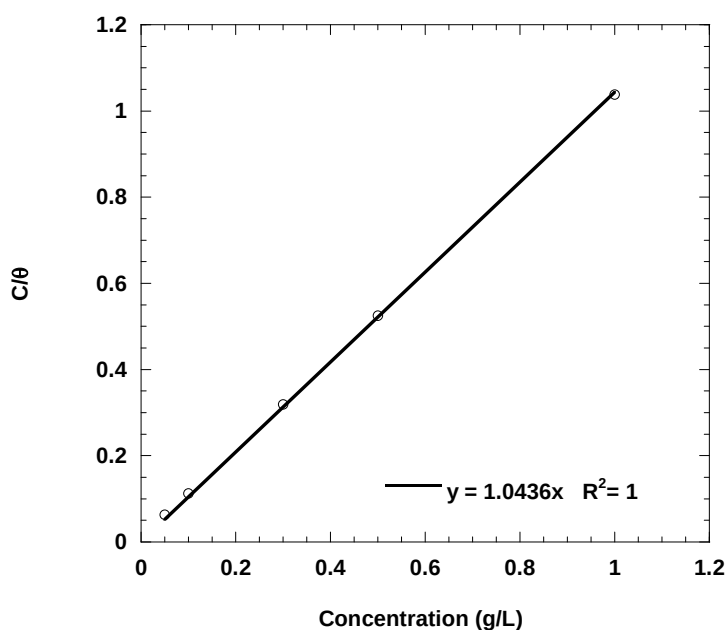


ภาพที่ 7 ภาพถ่ายจุลทรรศน์ของพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหลังจากจุ่มในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มีและมีสารสกัดฟ้าทะลายโจรที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก. ไม่มีสารสกัด ข. 0.05 g/l ค. 0.1 g/l ง. 0.3 g/l จ. 0.5 g/l และ ฉ. 1.0 g/l

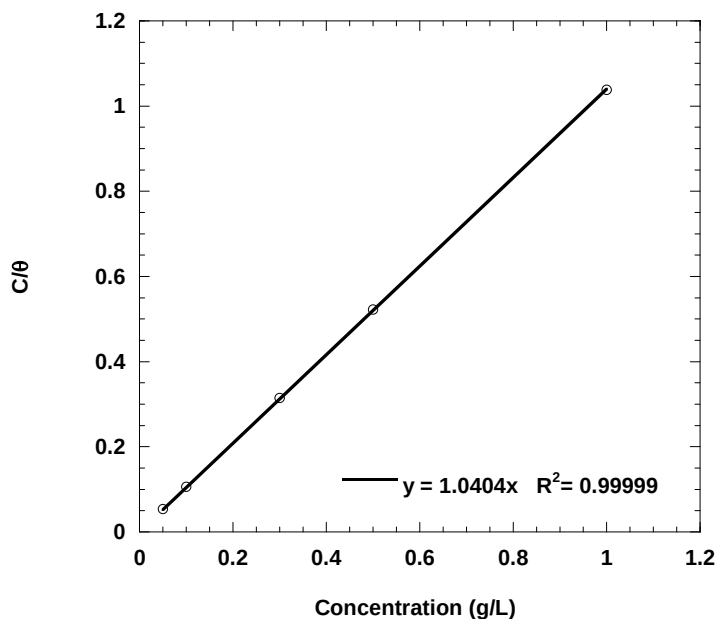


ภาพที่ 8 ภาพถ่ายจุลทรรศน์ของพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหลังจากจุ่มในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มีและมีสารสกัดใบชาที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก. ไม่มีสารสกัด ข. 0.05 g/l ค. 0.1 g/l ง. 0.3 g/l จ. 0.5 g/l และ ฉ. 1.0 g/l

จากการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการปกคลุมพื้นผิวของสารสกัดฟ้าทะลายโจรและสารสกัดใบชาที่ดูดซับบนโลหะ (surface coverage, θ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก %IE/100 (Bayol *et al.*, 2007; Behpour *et al.*, 2012; da Rocha *et al.*, 2010) และความเข้มข้นของสารสกัด (C) ดังแสดงในภาพที่ 9 และ 10 ตามลำดับ ทำให้ทราบว่าการดูดซับของแทนนินจากฟ้าทะลายโจรและใบชาเป็นไปตามสมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) เพราะเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 9 และ 10 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ตามสมการการดูดซับของแลงเมียร์ของสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชา จะพบว่าได้กราฟเส้นตรงที่มีค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 1 และ 0.9999 ตามลำดับ และมีค่าความชันใกล้เคียงกับ 1 จากข้อกำหนดของสมการการดูดซับของแลงเมียร์ทำให้ทราบว่าการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว โมเลกุลของสารสกัดที่ดูดซับบนพื้นผิวโลหะจะเข้าไปครอบครองพื้นที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งเท่านั้น และโมเลกุลของสารสกัดจะไม่มีแรงกระทำระหว่างกัน (Ali *et al.*, 2003; da Rocha *et al.*, 2010)



ภาพที่ 9 กราฟการดูดซับของแลงเมียร์ของสารสกัดฟ้าทะลายโจร

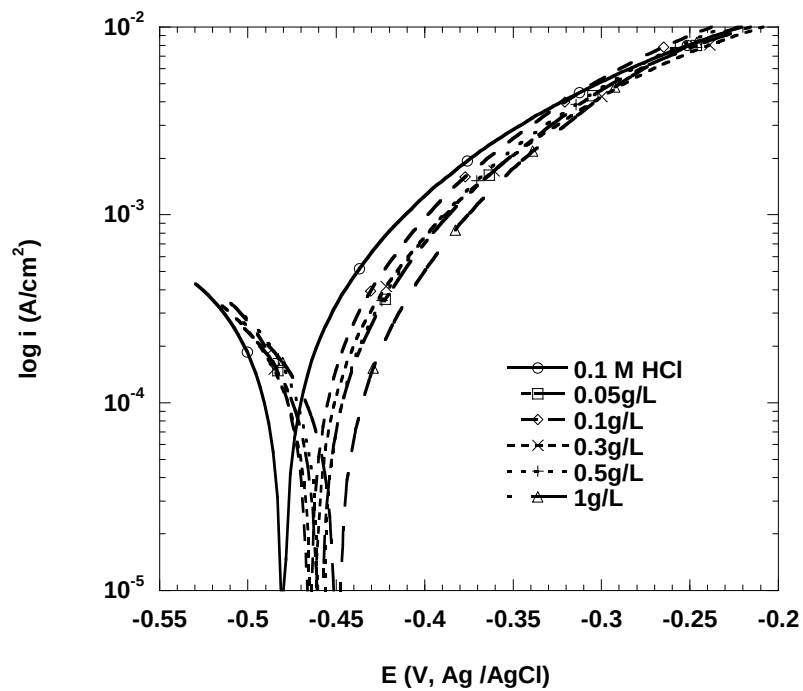


ภาพที่ 10 กราฟการดูดซับของแสงเมียร์ของสารสกัดใบชา

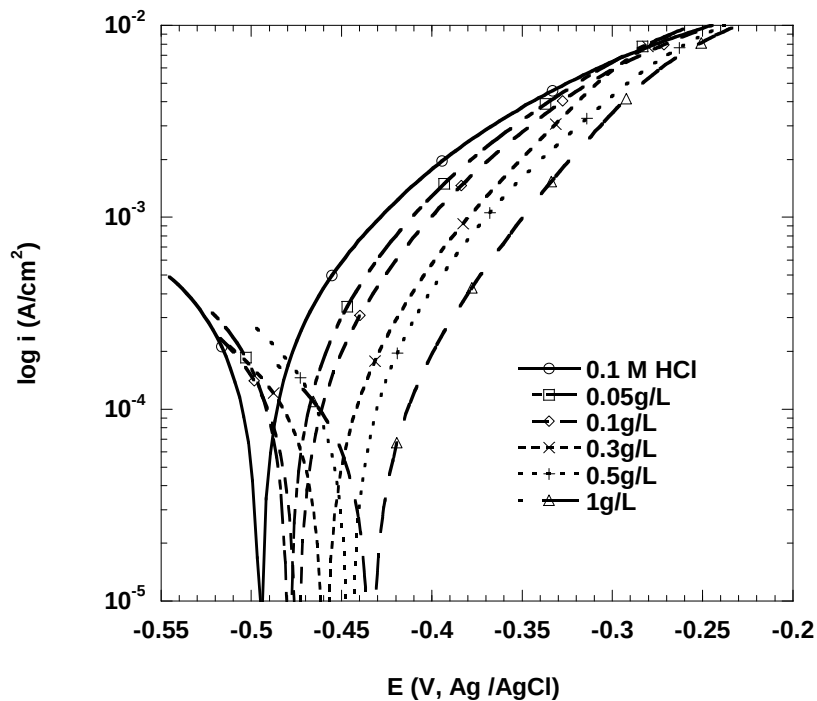
นอกเหนือไปจากกลไกในการป้องกันการกัดกร่อนตามที่กล่าวไว้ข้างต้น แทนนินสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนบวกของโลหะได้ และสารประกอบเชิงซ้อนนี้จะอยู่บนพื้นผิวของโลหะเพื่อขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันที่พื้นผิวของโลหะ (Martinez and Stagliar, 2003; Quraishi, 1999) อย่างไรก็ตาม การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนนี้เกิดขึ้นในสภาวะที่เป็นเบสเท่านั้น (El-Etre *et al.*, 2005) เนื่องจากสารละลายที่ใช้ในการทดสอบในงานนี้เป็นสารละลายกรด ทำให้การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแทนนินและไอออนบวกของโลหะจึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้

8.2.2 การศึกษาด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

ภาพที่ 11 และ 12 แสดงกราฟแอโนดิกโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ทำการทดสอบในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มีและมีสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชาที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ (0.05 g/l 0.1 g/l 0.3 g/l 0.5 g/l และ 1 g/l) ตามลำดับ พบว่าสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชาให้ผลในทำนองเดียวกัน เมื่อมีการเติมสารสกัดลงในสารละลายกรดจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาแอโนดิกของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำลดลงตามปริมาณของสารสกัดที่เพิ่มขึ้นจาก 0.05 g/l เป็น 1.0 g/l ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากการหาค่าน้ำหนักที่หายไป นอกจากนั้นแล้วค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (E_{corr}) มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเมื่อมีการเติมสารสกัดทั้งจากฟ้าทะลายโจรและใบชา โดยค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อในสารละลายกรดมีสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชา

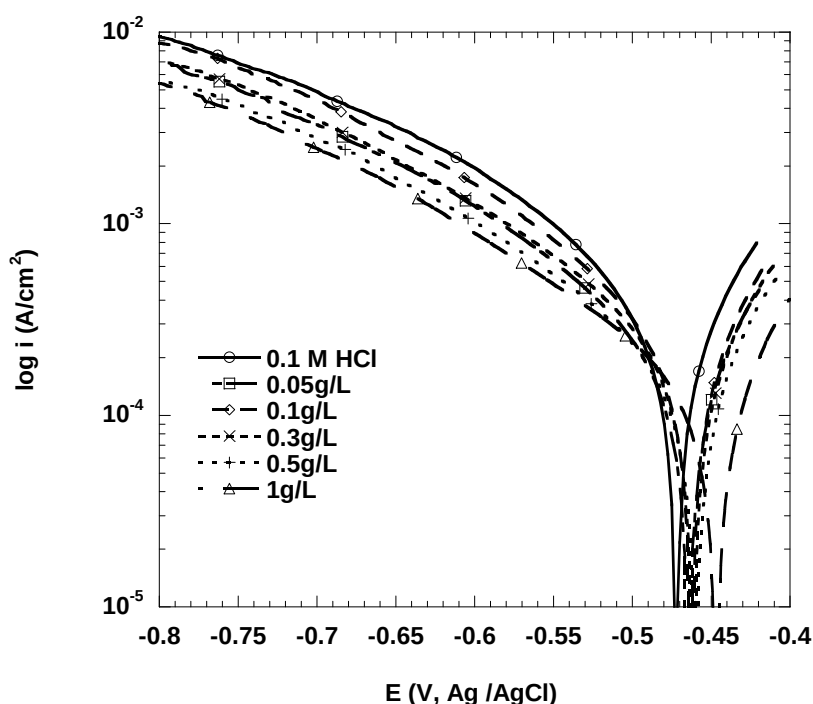


ภาพที่ 11 กราฟแอนอดิกโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มี และมีสารสกัดฟ้าทะลายโจรที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

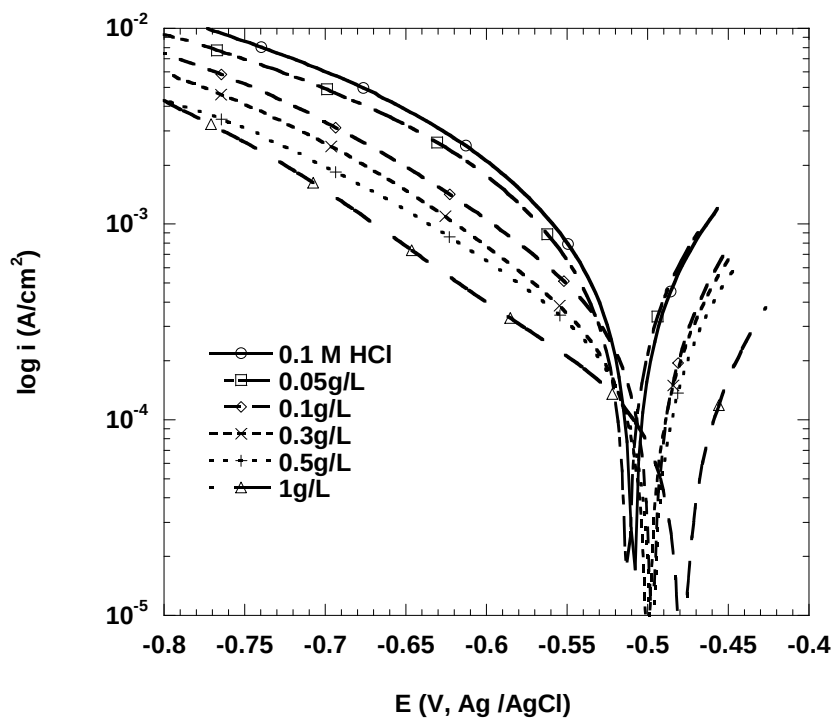


ภาพที่ 12 กราฟแอนอดิกโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มี และมีสารสกัดใบชาที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ภาพที่ 13 และ 14 แสดงกราฟแคโทดิกโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ทำการทดสอบในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มีและมีส่วนกัดฟาทะลายใจและไบชาที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน (0.05 g/l 0.1 g/l 0.3 g/l 0.5 g/l และ 1 g/l) ตามลำดับ พบว่าผลการทดลองที่ได้เป็นไปในทำนองเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาแอโนดิกตามที่กล่าวไว้ข้างต้น นั่นคือ การเติมสารกัดฟาทะลายใจและไบชาลงในสารละลายกรด HCl มีผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาแคโทดิกของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำลดลง และเมื่อความเข้มข้นของสารกัดเพิ่มขึ้น จะทำให้การลดลงของการเกิดปฏิกิริยาแคโทดิกมากขึ้นตามไปด้วย

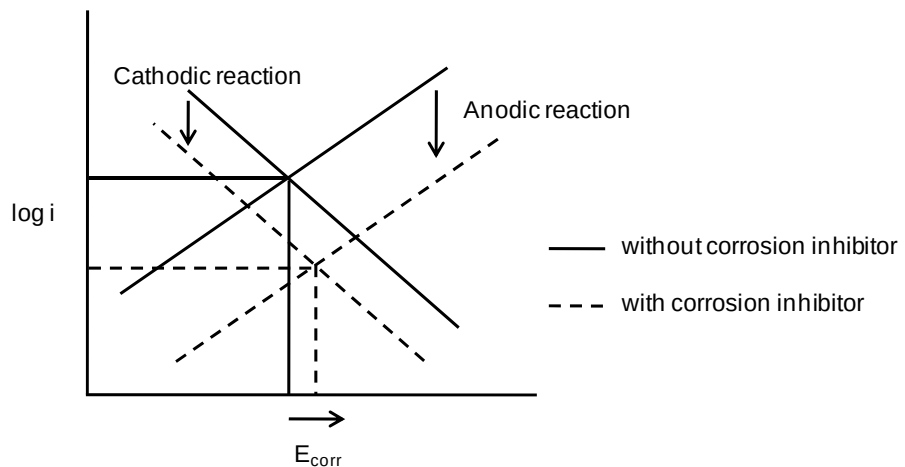


ภาพที่ 13 กราฟแคโทดิกโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มีและมีส่วนกัดฟาทะลายใจที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



ภาพที่ 14 กราฟแคโทดิกโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มีและมีส่วนกัดไปหาที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

การลดลงของการเกิดปฏิกิริยาแอโนดิกและปฏิกิริยาแคโทดิกของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเมื่อมีการเติมสารสกัด แสดงให้เห็นถึงการทำหน้าที่เป็นสารหน่วงการกัดกร่อนของทั้งสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชา เนื่องจากสารสกัดสามารถดูดซับลงบนโลหะโดยผ่านออกซิเจนอะตอมของแทนนิน ทำให้เกิดการชะลอการกัดกร่อนที่ผิวหน้าของโลหะได้ (Li *et al.*, 2010; Martinez and Stern 2001; Satapathy *et al.*, 2009) เมื่อพิจารณาจากอีวานส์ไดอะแกรม (Evans Diagram) ดังแสดงในภาพที่ 15 พบว่าการลดลงของปฏิกิริยาแอโนดิกนั้นมากกว่าการลดลงของปฏิกิริยาของแคโทดิก จึงส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมสารสกัดทั้งฟ้าทะลายโจรและใบชา ซึ่งแสดงว่าสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชาเป็นสารหน่วงการกัดกร่อนประเภทแอโนดิก



ภาพที่ 15 อีวานส์ไดอะแกรมแสดงการเพิ่มขึ้นของศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะเมื่อมีการเติมสารหน่วงการกัดกร่อนประเภทแอนโนดิก

8.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพของสารสกัด

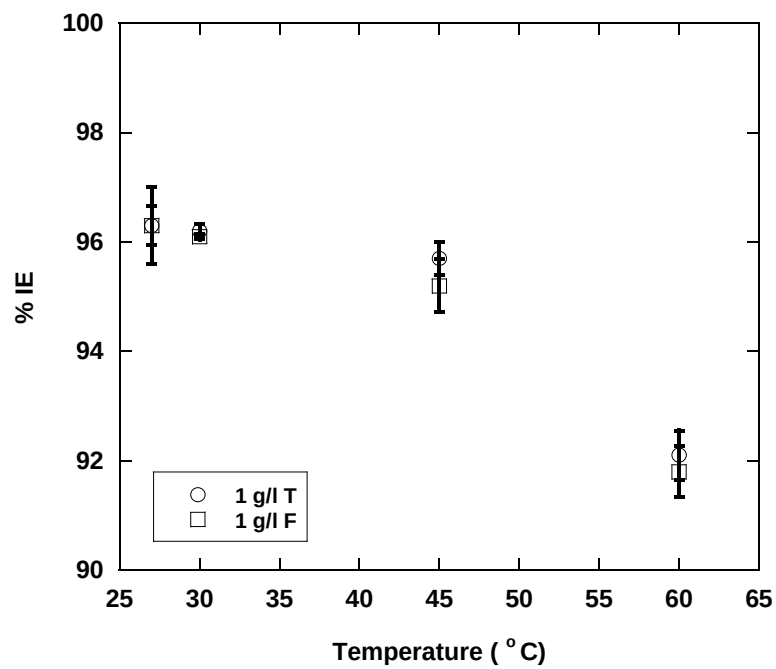
8.3.1 การศึกษาด้วยการหาหน้าพื้นที่หายไป

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพของสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชา ในการหน่วงการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl ได้ทำการทดสอบที่ความเข้มข้นของสารสกัดเท่ากับ 1 g/l ที่อุณหภูมิ 27 °C (อุณหภูมิห้อง) 30 °C 45 °C และ 60 °C

ตารางที่ 4 แสดงร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนของสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชา และอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ ภาพที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนของสารสกัดกับอุณหภูมิ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายทำให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนของสารสกัดทั้งสองชนิดมีค่าลดลง ในกรณีของสารสกัดฟ้าทะลายโจร พบว่าร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนลดลงเล็กน้อยจาก 96.3% ที่อุณหภูมิ 27 °C เป็น 91.8% ที่อุณหภูมิ 60 °C ส่วนกรณีสารสกัดใบชาร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนลดลงจาก 96.3% ที่ 27 °C เป็น 92.1% ที่ 60 °C จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นสารสกัดจากใบชาแสดงประสิทธิภาพดีกว่าสารสกัดจากฟ้าทะลายโจรเล็กน้อยแต่ไม่นัยสำคัญ ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนยังคงสูงมากคือ มากกว่า 90% ในช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา (27 °C – 60 °C)

ตารางที่ 4 ร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนของสารสกัดและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

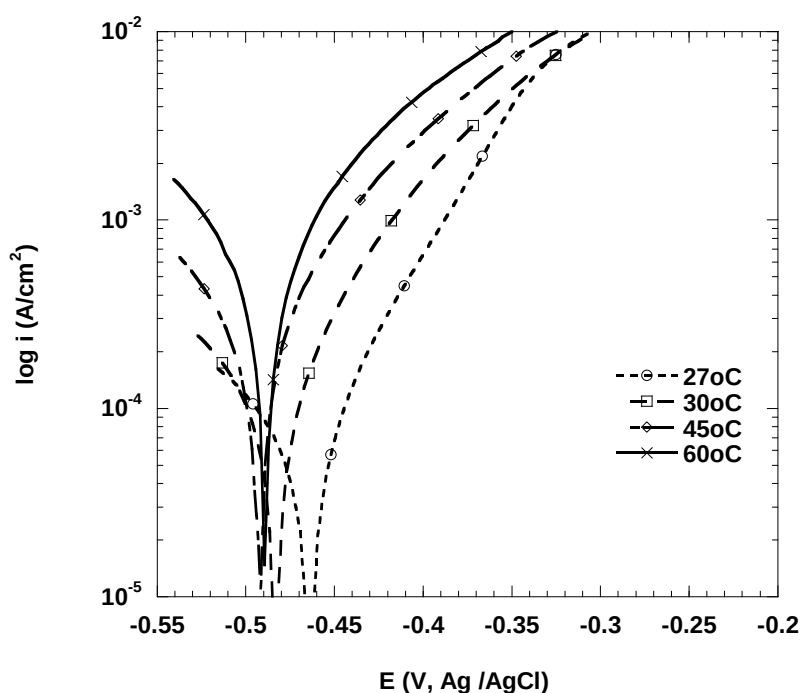
	ร้อยละการป้องกันการกัดกร่อน (%IE)				อัตราการกัดกร่อน (mm/year)			
	27 °C	30 °C	45 °C	60 °C	27 °C	30 °C	45 °C	60 °C
ไม่มีสารสกัด	-	-	-	-	11.4 ± 0.59	14.9 ± 0.41	19.3 ± 0.67	25.7±0.35
สารสกัดฟ้าทะลายโจร เข้มข้น 1 g/l	96.3±0.70	96.1±0.05	95.2±0.48	91.8±0.47	0.4±0.06	0.5±0.01	0.9±0.07	2.1±0.09
สารสกัดใบชา เข้มข้น 1 g/l	96.3±0.36	96.2±0.12	95.7±0.31	92.1±0.45	0.4±0.02	0.5±0.01	1.0±0.07	2.1±0.09



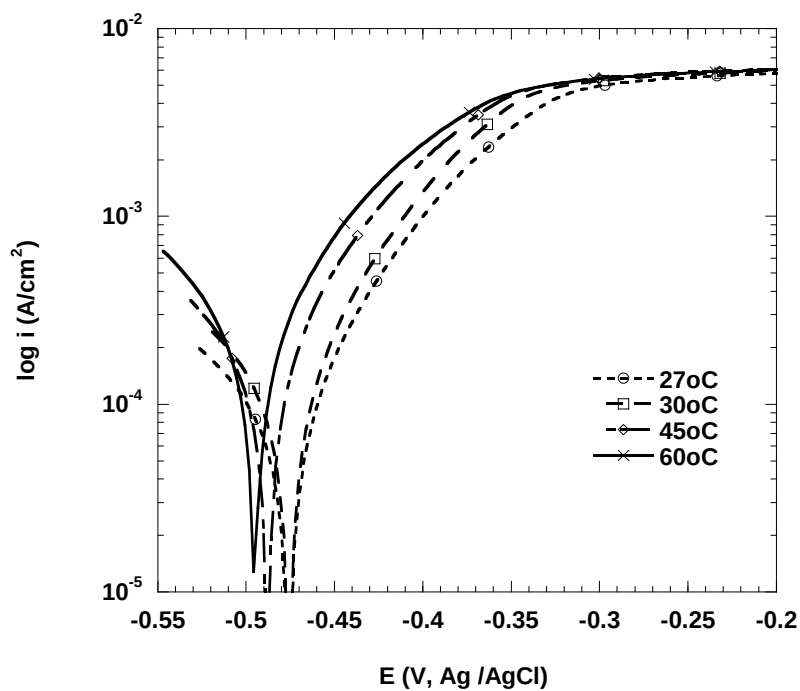
ภาพที่ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนของสารสกัดฟ้าทะลายโจร (□) และสารสกัดใบชา (○) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยที่ความเข้มข้นของสารสกัด คือ 1 g/l

8.3.2 การศึกษาด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

ภาพที่ 17 และ ภาพที่ 18 แสดงกราฟแอโนดิกโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ทำการทดสอบในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M และมีสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชาที่ความเข้มข้น 1 g/l ตามลำดับ โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 27 °C 30 °C 45 °C และ 60 °C พบว่าสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชาให้ผลไปในทำนองเดียวกัน คือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้การเกิดปฏิกิริยาแอโนดิกเพิ่มขึ้น

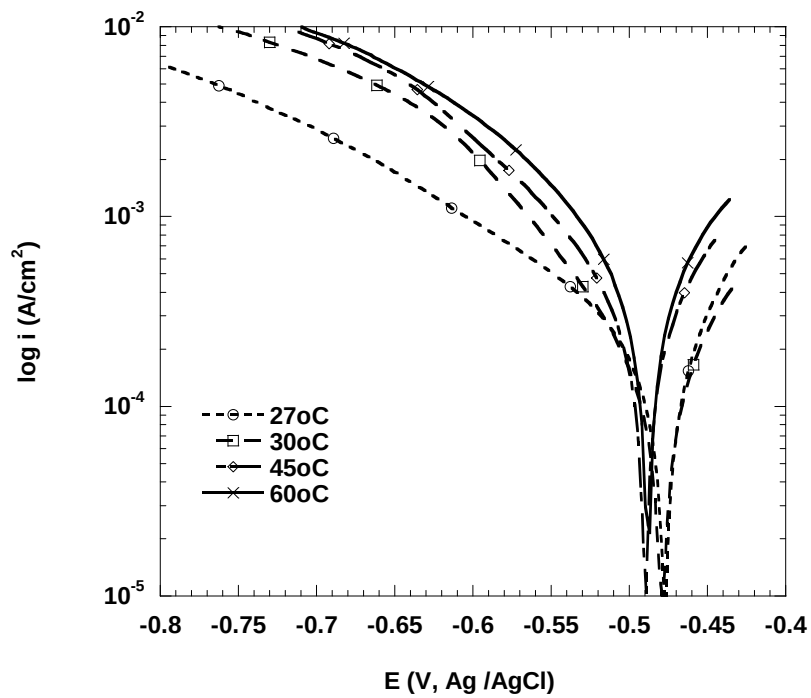


ภาพที่ 17 กราฟแอโนดิกโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และมีสารสกัดฟ้าทะลายโจรที่ความเข้มข้น 1 g/l

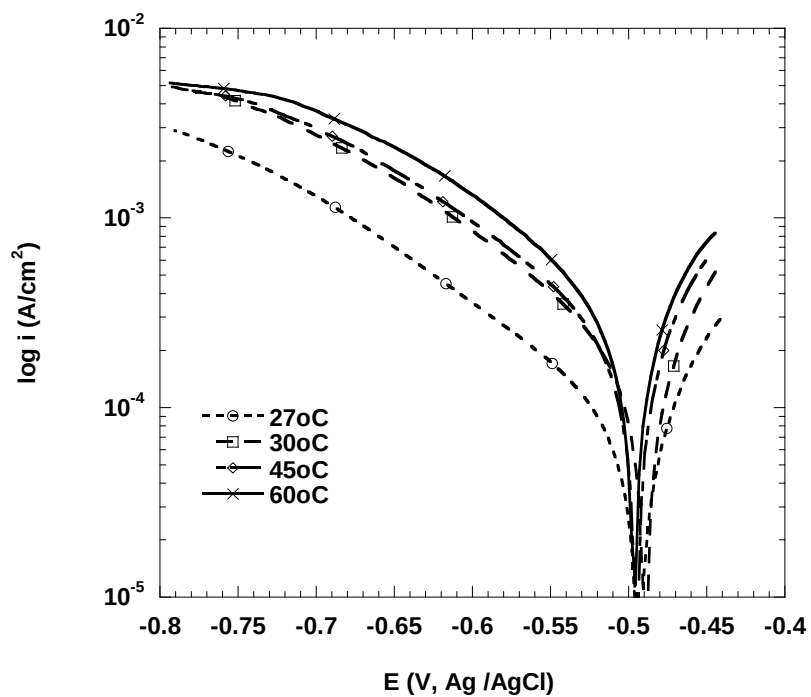


ภาพที่ 18 กราฟแอโนดิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และมีสารสกัดใบชาที่ความเข้มข้น 1 g/l

ภาพที่ 19 และ ภาพที่ 20 แสดงกราฟแคโทดิกโพลาริเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ทำการทดสอบในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M และมีสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชาที่ความเข้มข้น 1 g/l ตามลำดับ โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 27 °C 30 °C 45 °C และ 60 °C พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับการเกิดปฏิกิริยาแอโนดิก นั่นคือ การเพิ่มอุณหภูมิทำให้การเกิดปฏิกิริยาแคโทดิกมากขึ้น



ภาพที่ 19 กราฟแคโทดิกโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และมีสารสกัดฟ้าทะลายโจรที่ความเข้มข้น 1 g/l



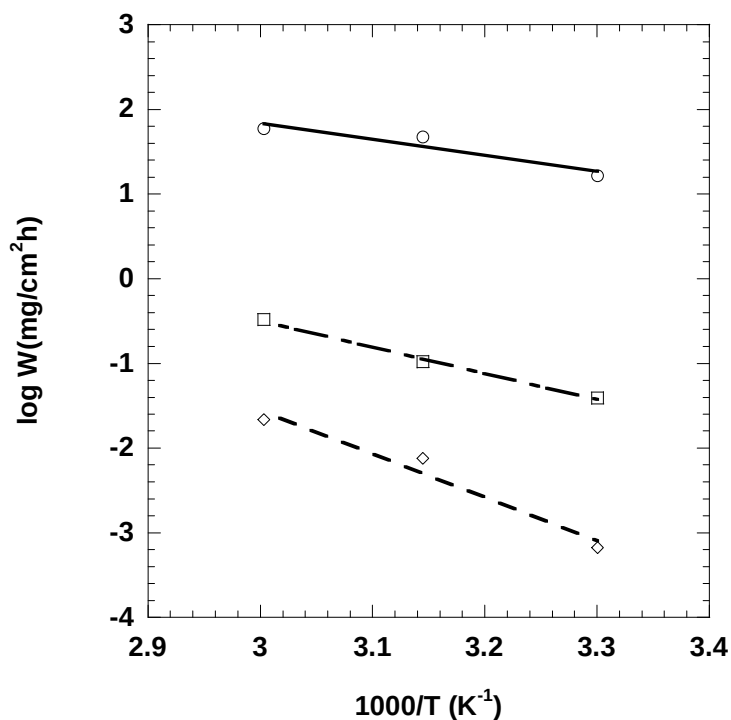
ภาพที่ 20 กราฟแคโทดิกโพลาไรเซชันของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และมีสารสกัดใบชาที่ความเข้มข้น 1 g/l

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพของสารสกัด ทำให้มีข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy, E_a) โดยค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกระบวนการกัดกร่อนสามารถคำนวณได้จากสมการอาร์เรเนียส ดังแสดงในสมการที่ (3) (Behpour *et al.*, 2012; Obot *et al.*, 2009)

$$\log W_{corr} = \frac{-E_a}{2.303RT} + \log A \quad (3)$$

โดยที่ W_{corr} คือ อัตราการกัดกร่อน E_a คือ พลังงานก่อกัมมันต์ R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ และ A คือ ค่า Frequency Factor

ภาพที่ 21 แสดงกราฟอาร์เรเนียสระหว่าง $\log W_{corr}$ กับ $1/T$ ของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ทั้งที่ไม่มีและมีสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชาเข้มข้น 1 g/l จากกราฟพบว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรดที่ไม่มีสารสกัด มีสารสกัดฟ้าทะลายโจร และมีสารสกัดใบชา คือ 13.67 kJ/mol 22.44 kJ/mol และ 36.99 kJ/mol ตามลำดับ จากค่าพลังงานก่อกัมมันต์ที่สูงขึ้นเมื่อมีเติมสารสกัดในสารละลายกรด แสดงถึงการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในกรณีที่มีการเติมสารสกัดจะเกิดได้ยากกว่ากรณีที่ไม่มีการเติมสารสกัด เนื่องจากกำแพงพลังงานที่สูงขึ้นทำให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการทำให้เกิดการกัดกร่อน หรือกล่าวได้ว่า กลไกในการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในกรณีที่ไม่มีการเติมสารสกัดจะต่างจากกรณีที่มีการเติมสารสกัด เพราะกรณีที่มีการเติมสารสกัดนั้นสารสกัดจะไปดูดซับบนพื้นผิวโลหะ ทำให้มีชั้นที่เป็นตัวขัดขวางไม่ให้พื้นผิวโลหะสัมผัสกับสารละลายกรด แต่กรณีที่ไม่มีการเติมสารสกัดนั้นพื้นผิวโลหะจะสัมผัสกับสารละลายกรดโดยตรง นอกจากนั้นแล้วการลดลงของ %IE การเพิ่มขึ้นของอัตราการกัดกร่อน และการเกิดปฏิกิริยาแอโนดิกและแคโทดิกที่มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เป็นข้อมูลที่ชี้บ่งว่าการดูดซับของสารสกัดจากฟ้าทะลายโจรและใบชาเป็นการดูดซับทางกายภาพ (da Rocha *et al.*, 2010)



ภาพที่ 21 กราฟอาร์เรเนียสของเหล็กกล้าคาร์บอนในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่ไม่มีการเติมสารสกัด (○) มีการเติมสารสกัดฟ้าทะลายโจรเข้มข้น 1 g/l (□) และสารสกัดใบชาเข้มข้น 1 g/l (◇)

8.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชา กับสารสกัดธรรมชาติที่มีอยู่ในเชิงพาณิชย์

8.4.1 การศึกษาด้วยการหาน้ำหนักที่หายไป

ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชาเทียบกับสารสกัดธรรมชาติที่มีอยู่ในเชิงพาณิชย์ในการทำหน้าที่เป็นสารหน่วงการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ในสารละลายกรด HCl เข้มข้น 0.1 M ที่อุณหภูมิห้อง โดยความเข้มข้นของสารสกัดที่ทำการทดสอบ คือ 1 g/l

ตารางที่ 5 แสดงร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนของสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชา เมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดธรรมชาติที่มีอยู่ในเชิงพาณิชย์ พบว่าร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนของสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชาไม่แตกต่างจากของสารธรรมชาติที่มีอยู่ในเชิงพาณิชย์ คือ ประมาณ 96% นั้นแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีของสารสกัดฟ้าทะลายโจรและใบชาในการทำหน้าที่เป็นสารหน่วงการกัดกร่อนให้กับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบร้อยละการป้องกันการกัดกร่อนระหว่างสารสกัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้กับสารสกัดธรรมชาติที่มีอยู่ในเชิงพาณิชย์

สารสกัดเข้มข้น 1 g/l	ร้อยละการป้องกันการกัดกร่อน (%IE)
ฟ้าทะลายโจร	96.3 ± 0.70
ใบชา	96.3 ± 0.36
สารสกัดธรรมชาติในเชิงพาณิชย์	96.0 ± 1.2

หมายเหตุ เงื่อนไขในการทดสอบ คือ จุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำลงในสารละลายกรด 0.1 M HCl ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีการเติมสารสกัดความเข้มข้น 1 g/l ลงในสารละลาย และสารสกัดธรรมชาติในเชิงพาณิชย์เป็นสารสกัดที่ได้รับจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงไม่สามารถระบุรายละเอียดได้

9. สรุปผล

สารสกัดทั้งจากฟ้าทะลายโจรและใบชา มีความสามารถในการทำหน้าที่เป็นสารหน่วงการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำในสารละลายกรด HCl ได้อย่างดี โดยถ้าใช้สกัดฟ้าทะลายโจรและใบชาเข้มข้น 1 g/l จะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนถึง 96% โดยที่แทนนินซึ่งมีอยู่ในสารสกัดทั้งสองจะดูดซับบนพื้นผิวของโลหะทำให้สามารถชะลอการกัดกร่อนได้ โดยแทนนินจะดูดซับผ่านออกซิเจนอะตอมในโมเลกุลและการดูดซับเป็นไปตามสมการการดูดซับของแลงเมียร์และเป็นการดูดซับแบบกายภาพ สารสกัดทั้งสองชนิดนี้สามารถจัดได้ว่าเป็นสารหน่วงการกัดกร่อนประเภทแอโนดิก ในช่วงของอุณหภูมิที่ทำการศึกษา (27- 60°C) นั้น สารสกัดทั้งจากฟ้าทะลายโจรและใบชาได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนที่ค่อนข้างดี คือ มากกว่า 90 % นอกจากนั้นแล้วถึงแม้ว่าสารสกัดที่ทดสอบในงานวิจัยนี้ให้ประสิทธิภาพที่ไม่แตกต่างจากสารสกัดธรรมชาติที่มีขายอยู่ในเชิงพาณิชย์ แต่ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่จะต้องนำมาพิจารณา เช่น ความไม่เสถียรของสารสกัดในแง่ของการเน่าเสียได้ ก่อนที่จะพัฒนาให้เป็นสารหน่วงการกัดกร่อนที่สามารถนำมาใช้งานได้จริงต่อไป

10. ปัญหาและอุปสรรค

1. กำหนดการของโครงการวิจัยนี้มีกำหนดเริ่มในวันที่ 1 มิถุนายน 2553 แต่ทางต้นสังกัดของผู้วิจัยไม่ได้รับเงินอุดหนุนโครงการวิจัยจนกระทั่งต้นเดือนสิงหาคม 2553 และผู้วิจัยสามารถเริ่มเบิกจ่ายเงินวิจัยได้ในเดือนกันยายน 2553 ทำให้การดำเนินงานวิจัยเป็นไปได้อย่างล่าช้ากว่ากำหนดมากในช่วง 3 - 4 เดือนแรก เนื่องจากไม่มีเงินที่จะนำมาใช้จ่ายในงานวิจัย โดยที่ผู้วิจัยสามารถดำเนินงานวิจัยได้ดีขึ้นโดยไม่มีปัญหาเรื่องเงินในการทำวิจัยตั้งแต่เดือนกันยายน 2553 เป็นต้นไป

2. ผู้วิจัยประสบอุบัติเหตุโดนรถแท็กซี่ชนในระหว่างเดินข้ามถนนเมื่อต้นเดือนมกราคม 2554 ต้องเข้าโรงพยาบาลและหยุดงาน ทำให้ไม่สามารถทำวิจัยได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง จึงทำให้งานวิจัยล่าช้าออกไปอีก โดยที่ผู้วิจัยสามารถกลับมาดำเนินงานวิจัยได้อีกครั้งในปลายเดือนกุมภาพันธ์ 2554

3. เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่จำเป็นต้องใช้ในการวิจัย เช่น SEM มีผู้ใช้งานเป็นจำนวนมากทำให้ต้องจองคิวนานมากเป็นเดือน ๆ และเสียค่อนข้างบ่อย จึงทำให้ใช้เวลานานมากในการทำการวิเคราะห์ทางพื้นผิวของโลหะ

11. บรรณานุกรม

กฤษณพันธ์ ว. (2536). ยาและผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพฯ

Abiola, O.K., James, A.O. (2010). *Corrosion Science*, 52, 661-664.

Ali, S.A., Saeed, M.T., Rahman, S.U. (2003). *Corrosion Science*, 45, 253-266.

Ash, M., Ash, I. (2001). *Handbook of Corrosion Inhibitors*, Synapse Information Resources, Inc., New York, USA.

Bayol, E., Kayakirilmaz, K., Krbil, M. (2007). *Materials Chemistry and Physics*, 104, 74-82.

Behpour, M., Ghoreishi, S.M., Khayat Kashani, M., Soltani, N. (2012). *Materials Chemistry and Physics*, 131, 621-633.

Benabdellah, M., Benkaddour, M., Hammouti, B., Bendahhou, M., Aouniti, A. (2006). *Applied Surface Science*, 252, 6212-6217.

Bethencourt, M., Botana, F.J., Calvino, J.J., Marcos, M., Rodriguez-Chacon, M.A. (1998). *Corrosion Science*, 40, 1803-1819.

Bouyanzer, A., Hammouti, B., Majidi, L. (2006). *Materials Letters*, 60, 2840-2843.

Chaieb, E., Bouyanzer, A., Hammouti, B., Benkaddour, M. (2005). *Applied Surface Science*, 246, 199-206.

da Rocha, J.C., da Cunha Ponciano Gomes, J.A., D'Elia, E. (2010). *Corrosion Science*, 52, 2341-2348.

El-Etre, A.Y. (1998). *Corrosion Science*, 40, 1845-1850.

- El-Etre, A.Y., Abdallah, M. (2000). *Corrosion Science*, 40, 731-738.
- El-Etre, A.Y. (2003). *Corrosion Science*, 45, 2485-2495.
- El-Etre, A.Y., Abdallah, M., El-Tantawy, Z.E. (2005). *Corrosion Science*, 47, 385-395.
- El-Etre, A.Y. (2006). *Applied Surface Science*, 252, 8521-8525.
- Evans, W.C. (1996). *Tannins Trease and evans phamacognosy*, WB Sauders company limited, London, UK.
- Fontana, M.G. (1987). *Corrosion Engineering*, McGraw-Hill, Singapore
- Kumpawat, N., Chaturvedi, A., Upadhyay, R. (2010). *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 46, 267-270.
- Li, Y., Zhao, P., Liang, Q., Hou, B. (2005). *Applied Surface Science*, 252, 1245-1253.
- Li, X., Deng, S., Fu, H. (2010). *Progress in Organic Coatings*, 67, 420-426.
- Mabrou, J., Akssira, M., Azzi, M., Zertoubi, M., Saib, N., Messaoudi, A., Albizane, A., Tahiri, S. (2004). *Corrosion Science*, 46, 1833-1847.
- Martinez, S., Stagliar, I. (2003). *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 640, 167-174.
- Martinez, S., Štern, I. (2001). *Journal of Applied Electrochemistry*, 31, 973-978.
- Matamala, G., Smeltzer, W., Droguett, G. (2000). *Corrosion Science*, 42, 1351-1362.
- Matsushita, T. (2004). 25th Anniversary of Foundation of Thaiparkerizing.
- Mueller-Harvey, I. (2001). *Animal Feed Science and Technology*, 91, 3-20.
- Obi-Egbedi, N.O., Obot, I.B., Umoren, S.A. (2012). *Arabian Journal of Chemistry*, 5, 361-373.
- Obot, I.B., Obi-Egbedi, N.O., Umoren, S.A. (2009). *Corrosion Science*, 51, 1868-1875.
- Okafor, P.C., Ikpi, M.E., Uwah, I.E., Ebenso, E.E., Ekpe, U.J., Umoren, S.A. (2008). *Corrosion Science*, 50, 2310-2317.
- Orubite, K.O., Oforka, N.C. (2004). *Materials Letters*, 58, 1768-1772.
- Quraishi, M.A., Farooqi, I.H., Saini, P.A. (1999). *Corrosion*, 55, 493-497.

Rahim, A.A., Rocca, E., Steinmetz, J., Kassim, M.J., Adnan, R., Sani Ibrahim, M. (2007). *Corrosion Science*, 49, 402-417.

Rozenfeld, I.L. (1981). *Corrosion Inhibitors*, McGraw-Hill, USA

Satapathy, A.K., Gunasekaran, G., Sahoo, S.C., Amit, K., Rodrigues, P.V. (2009). *Corrosion Science*, 51, 2848-2856.

Schofield, P., Mbugua, D.M., Pell, A.N. (2001). *Animal Feed Science and Technology*, 91, 21-40.

Singh, A., Ahamad, I., Singh, V., Quraishi, M.A (2011). *Journal of Solid State Electrochemistry*, 15, 1087-1097.

Vijaya, D., Padmadevi, S.N., Vasandha, S., Meerabhai, R.S., Chellapandi, P. (2008). *Journal of Organic System*, 3, 51-56.

12. ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล

นางสาว มัณฑนา จริยาบุรณ

สถานที่ติดต่อ

272 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

ถ. พระรามที่ 6 แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี

จ. กรุงเทพฯ 10400

โทรศัพท์

02-441-9820 ต่อ 1141

โทรศัพท์เคลื่อนที่

086-979-1585

อีเมล

manthana.jar@mahidol.ac.th และ nui_manthana@hotmail.com

การศึกษา

2006: Ph.D. Metallurgy and Materials, The University of Birmingham, United Kingdom

2001: M.Sc. Applied Analytical and Inorganic Chemistry, Mahidol University, Thailand

1998: B.Sc. Chemistry (1st Class Honors), Mahidol University, Thailand

งานวิจัยที่สนใจ

- Surface Modification of aluminium alloys
- Environmentally-friendly corrosion inhibitors
- Microstructure and corrosion of welded aluminium alloys
- Microelectrochemical technique for localised corrosion

รางวัล

2008: Best Poster Presentation, "Study of Thai green compounds as corrosion inhibitors" at Electrochemical Science and Technology Conference, Danish Electrochemical Society, Odense, Denmark

เอกสารวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

1. S. Williams, R. Ambat, D. Price, M. Jariyaboon, A. J. Davenport and A. Wescott, Laser Treatment Method for Improving of the Corrosion Resistance of Friction Stir Welds, Material Science Forum, 426-432 (2003) 2855-2860.
2. A. J. Davenport, M. Jariyaboon, C. Padovani, N. Tareelap, B. J. Connolly, S. Williams and E. Siggs, Corrosion and Protection of Friction Stir Welds, Material Science Forum, 519-521 (2006) 699-704.
3. M. Jariyaboon, A. J. Davenport, R. Ambat, B. J. Connolly, S. W. Williams and D. A. Price, Corrosion Behaviour of a Dissimilar Friction Stir Weld Joining High Strength Aluminium Alloys 2024 and 7010, Corrosion Engineering Science and Technology, 41 (2006) 135-142.
4. M. Jariyaboon, A. J. Davenport, R. Ambat, B. J. Connolly, S. W. Williams and D. A. Price, The Effect of Welding Parameters on the Corrosion Behaviour of Friction Stir Welded AA2024-T351, Corrosion Science, 49 (2007) 877-909.

- Selected as: 2nd out of Top 25 Hottest Articles (October to December 2006) published in Corrosion Science
(<http://top25.sciencedirect.com/subject/materials-science/15journal/corrosion-science/0010938X/archive/10/>)
5. M. Jariyaboon, A. J. Davenport, R. Ambat, B. J. Connolly, S. W. Williams and D. A. Price, The Effect of Cryogenic CO₂ Cooling on Corrosion Behaviour of Friction Stir Welded AA2024-T351, Corrosion Engineering Science and Technology, 44 (2009) 425-432.
6. M. Jariyaboon, A. J. Davenport, R. Ambat, B. J. Connolly, S. W. Williams and D. A. Price, The Effect of Cryogenic CO₂ Cooling on Corrosion Behaviour of Friction Stir Welded AA7010-T7651, Anti-Corrosion Methods and Materials, 57 (2010) 83-89.
7. M. Jariyaboon, P. Møller, R. E. Dunin-Borkowski, S.-I. In, I. Chorkendorff, R. Ambat, The effect of atmospheric corona treatment on AA1050 aluminium, Corrosion Science, 52 (2010) 2155-2163.
8. M. Jariyaboon, A. J. Davenport, R. Ambat, B. J. Connolly, S. W. Williams and D. A. Price, Corrosion Behaviour of Banded Microstructure within Nugget of Friction Stir Welds in AA2024-T351, Materials Science and Technology, 27 (2011) 208-213.

9. M. Jariyaboon, P. Møller, R. E. Dunin-Borkowski, R. Ambat, FIB-SEM Investigation of Trapped Intermetallic Particles in Anodic Oxide Films on AA1050 Aluminium, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 58/4 (2011) 173-178.
10. M. Jariyaboon, P. Møller, R. Ambat, Effect of pressurized steam on AA1050 aluminium, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 59/3 (2012) 103-109.

การประชุมวิชาการ

1. R. Ambat, M. Jariyaboon, A. J. Davenport, S.W. Williams, D. Price, A. Wescott, Micro-electrochemical investigation of friction stir welds in aluminium aerospace alloy 2024, in 15th International Corrosion Congress, Granada, Spain, 2002.
2. M. Jariyaboon, The Corrosion Behaviour of FSW 2024-T351 Aluminium Alloy, in The Corrosion and Surface Finishing of Aluminium Alloy Meeting, Poster Session, University of Birmingham, UK, 17 April, 2002.
3. M. Jariyaboon, R. Ambat, A. J. Davenport, S. W. Williams and D. Price, The Effect of Welding Parameters on Corrosion Behaviour of FSW 2024-T351 Aluminium Alloy in 43rd Corrosion Science Symposium and UK Corrosion Conference, Cardiff, UK, 22-24 October, 2002.
4. M. Jariyaboon, R. Ambat, A. J. Davenport, S. W. Williams and D. Price, The Effect of Welding Parameters on Corrosion Behaviour of FSW 2024-T351 Aluminium Alloy, in 203rd Annual Meeting of the Electrochemical Society, Paris, France, 27 April – 2 May, 2003.
5. M. Jariyaboon, R. Ambat, A. J. Davenport, S. W. Williams and D. Price, The Effect of Welding Parameters on Corrosion Behaviour of FSW 2024-T351 Aluminium Alloy, in 44th Corrosion Science Symposium and Electrochem, University of Southampton, UK, 14-17 September, 2003.
6. A. J. Davenport, R. Ambat, M. Jariyaboon, B. J. Connolly, S. W. Williams, D. A. Price, A. Wescott and P. C. Morgan, Corrosion of Friction Stir Welds, *The Electrochemical Society, Extended Abstract Vol. 2, No. 495*, Orlando, 2003.
7. R. Ambat, M. Jariyaboon, S. W. Williams, A. Wescott, D. Price and A. J. Davenport, Corrosion Protection of Friction Stir Welds Using Laser Surface Melting, *ATB Metallurgie*, 43, (2003), p. 258.

8. A. J. Davenport, R. Ambat, M. Jariyaboon, P. C. Morgan, D. A. Price, A. Wescott and S. W. Williams, Corrosion of Friction Stir Welds in High Strength Aluminium Alloys, Journal of Corrosion Science and Engineering, Web Journal, UMIST, 6 (2003) Paper No. C023.
9. M. Jariyaboon, Corrosion of Friction Stir Weld in a High Strength Aluminium Alloy, at Gordon Research Conference in Aqueous Corrosion, Research Poster Session, New London, NH, 25-30 July, 2004.
10. M. Jariyaboon, Corrosion of Friction Stir Weld in a High Strength Aluminium Alloy, at the 2nd Aerospace Materials Summer School, Poster Session, Oriel College, Oxford, UK, 23-24 September 2004.
11. B. J. Connolly, A. J. Davenport, R. Ambat, M. Jariyaboon, C. Goodfellow and C. Lee, Localised Corrosion of Friction Stir Welds in Aluminium Alloys, in proceeding of 5th International Symposium on FSW, Metz , France, 2004
12. A. J. Davenport, R. Ambat, M. Jariyaboon, S. W. Williams, D. A. Price and P. Morgan, Corrosion of Friction Stir Welds in High Strength Aluminium Alloys, in Corrosion 2004 (NACE), New Orleans, LA, 2004.
13. A. J. Davenport, M. Jariyaboon, B. J. Connolly, N. Tareelap, C. Padovani, S. W. Williams, D. Price and A. Wescott, Corrosion of Friction Stir Welds in aerospace Alloys, in First World Congress on Corrosion in the Military, Italy, 2005.
14. A. J. Davenport, M. Jariyaboon, B. J. Connolly, C. Padovani, N. Tareelap, S. W. Williams, D. Price and A. Wescott, Corrosion of Friction Stir Welds in Aerospace Alloys and Their Protection by Laser Surface Treatment, in 2005 Tri-Service Corrosion Conference, Wyndham Palace, Orlando, FL, 14-18 November 2005.
15. A. Davenport, M. Jariyaboon, C. Padovani, N. Tareelap, B. Connolly, S. Williams, E. Siggs, Corrosion and Protection of Friction Stir Welds, in 10th International Conference on Aluminum Alloys, Vancouver, Canada, 9-13 July 2006.
16. E. Viyanit, K. Wongpinkaw and M. Jariyaboon, Surface Improvement of Ti6Al4V Alloy for Orthopedic Implants by Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition in NAC 2007, Science Park, Pathumthane, Thailand, 28-30 March 2007.

17. A. Patcharinwittaya and M. Jariyaboon, Study of Thai green compounds as corrosion inhibitors, Electrochemical Science and Technology Conference, Danish Electrochemical Society, Syddanske Forskerparker, Odense, Denmark, 2-3 October 2008.
18. S. Thaiwatthana, N. Kanjanaprayut, K.Wongpinkeaw and M.Jariyaboon, Corrosion Resistance of Anodised Titanium Alloys, 17th International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering (IFHTSE) Congress, Japan , 27-30 October 2008.
19. A. Pathomchaiamporn, J. Shiowatana, M. Jariyaboon, C. Kalambaheti, K. Darasroom, D. Nacapricha and K. Uraisin, An on-line continuous-flow liquid-liquid extraction for analysis of corrosion inhibitor, 34th Congress on Science and Technology of Thailand, 31 October – 2 November 2008, Queen Sirikit National Conventional Center, Bangkok, Thailand.
20. K. Uraisin, A. Pathomchaiamporn, J. Shiowatana, M. Jariyaboon, C. Kalambaheti, K. Darasroom and D. Nacapricha, An on-line liquid-liquid extraction system for determination of corrosion inhibitor residual in natural gas pipeline, Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2009), 14-16 January 2009, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand.
21. M. Jariyaboon, P. Møller, R. E. Dunin-Borkowski and R. Ambat, "FIB-SEM Investigation of Trapped Intermetallic Particles in Anodic Oxide Films on AA1050 Aluminium", ASST 2009, Leiden, The Netherlands, 10-14 May 2009.
22. M. Jariyaboon, P. Møller, R. E. Dunin-Borkowski, S.-I. In, I. Chorkendorff and R. Ambat, "Activation of AA1050 Aluminium Surfaces using Atmospheric Corona Discharge", ASST 2009, Leiden, The Netherlands, 10-14 May 2009.
23. M. Jariyaboon, P. Møller, R. E. Dunin-Borkowski, S.-I. In, I. Chorkendorff and R. Ambat, Invited Speaker entitled "Activation of AA1050 Aluminium Surfaces using Atmospheric Corona Discharge", Regional Electrochemistry Meeting of South-East Asia 2010 (REMSEA 2010), 16-19 November 2010, Bangkok, Thailand.
24. R. Ambat and M. Jariyaboon, "Pre-Treating Aluminium Surfaces using Corona Discharge", Proceeding of the 11th International Aluminium Conference INALCO 2010, 23-25 June 2010, Eindhoven University of Technology, the Netherlands. p 231-232.

25. P. Wongkhamprai and M. Jariyaboon, "Study of Corrosion Inhibition of C-Steel in HCl by *Andrographis paniculata* (Burm.f.) Wall.ex Nees Extract", Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2011), 5-7 January 2011, Miracle Grand Hotel, Bangkok, Thailand.
26. P. Wongkhamprai and M. Jariyaboon, "The Effect of Green Tea Extract on the Corrosion Behaviour of C-steel in Acid Solution" Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2012), 11-13 January 2012, The Empress Hotel, Chiang Mai, Thailand.