

การเตรียมวัสดุผสมกราฟีนออกไซด์ – พอลิเมอร์สำหรับการใช้งาน
ในด้านการเคลือบเพื่อป้องกันการกัดกร่อน

PREPARATION OF GRAPHENE OXIDE - POLYMER COMPOSITES
FOR ANTICORROSION COATING APPLICATION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION OF GRAPHENE OXIDE – POLYMER COMPOSITES
FOR ANTICORROSION COATING APPLICATION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING
IN NANOMATERIAL ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมวัสดุผสมกราฟีนออกไซด์ – พอลิเมอร์สำหรับการใช้งานในด้าน
การเคลือบเพื่อป้องกันการกัดกร่อน

Special Project Title Preparation of graphene oxide – polymer composites
for anticorrosion coating application

นักศึกษา ฤทธิเกียรติ วัลย์ดาว
รหัสประจำตัว 58110049
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน
ปีการศึกษา 2561
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. เบญจพล ต้นอู๋
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร. เบญจพล ต้นอู๋ ผศ.ดร. ทศยาภรณ์ ทิววงศ์ ดร. ชัดติยา ชลาพัฒน์	

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRBANG



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดารินี พรหมโยธิน)
หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี
วันที่...20.....เดือน.....มิ:ย.....พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การเตรียมวัสดุผสมกราไฟท์ออกไซด์ – พอลิเมอร์สำหรับการใช้งาน ในด้านการเคลือบเพื่อป้องกันการกัดกร่อน
นักศึกษา	นายฤทธิเกียรติ วัลย์ดาว
รหัสประจำตัว	58110049
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล ต้นธุ์

บทคัดย่อ

ปกติแล้วการกัดกร่อนเป็นปัญหาที่พบในการใช้งานอุปกรณ์ที่สร้างโลหะ ดังนั้นการเคลือบสารที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้จะสามารถช่วยยืดอายุการใช้งานอุปกรณ์ที่สร้างโลหะได้ ใน การศึกษานี้จะทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของวัสดุผสมระหว่างสารโพลีเมอร์กับกราไฟท์ออกไซด์และ รีดิซ์กราฟท์ออกไซด์เพื่อใช้ป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ โดยจะทำการทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการเคลือบชั้นวัสดุผสมด้วยกระบวนการหมุนเคลือบลงบนแผ่นโลหะทองแดงแล้วนำไปทำ การทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้ว ทำการวัดค่าการกัดกร่อนด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าเคมีจากกราฟทาเพล จากการทดลองพบว่าเอทิล เซลลูโลสที่ทำการเติม กราไฟท์ออกไซด์ลงไป 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสามารถป้องกันการกัดกร่อน ของแผ่นทองแดงได้ดีที่สุดโดยมีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนสูงถึง 380.142 เท่า เมื่อ เปรียบเทียบกับแผ่นทองแดงที่ไม่ได้ทำการเคลือบ โดยวัสดุผสมที่เตรียมขึ้นจะสามารถยับยั้งการกัดกร่อนเนื่องจากสามารถป้องกันการแทรกซึมของน้ำและไอออนของสารละลายเข้าไปยังแผ่นโลหะได้

คำสำคัญ : กราไฟท์ออกไซด์, ทองแดง, การกัดกร่อนของโลหะ, फिल्मป้องกันการกัดกร่อน

Special project title	Preparation of graphene oxide – polymer composites for anticorrosion coating application
Student	Mr. Rittikiat Wandaw
Student ID	58110049
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nano Material Engineering
Year	2018
Special project advisor	Assoc. Prof. Dr. Benchapol Tunhoo

ABSTRACT

Normally, corrosion is a common behavior that found in the metal parts in equipment. Therefore, anticorrosion coating can be used for extend the lifetime of metal parts. In this work, the anticorrosion characteristics of polymer-graphene oxide/reduced graphene oxide composites had been studied. Thin film of polymer-graphene oxide/reduced graphene oxide composites was prepared on copper plate by spin coating technique. Corrosion testing was performed by electrochemical measurement system with 3.5% by weight of sodium chloride in aqueous solution. Tafel plot was used to estimate corrosion behavior of samples. From the results, it was found that the composites of ethyl cellulose and 0.25% by weight of graphene oxide exhibited the optimum anticorrosion behavior with a magnitude of 380.14 times when compared with the bare copper plate. The prepared composites can be exhibited anticorrosion properties due to it prevented the penetration of water and the ions of the solution into the metal plate.

Keywords : Graphene oxide, Copper, Metal corrosion, Anti-corrosion film

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร.เบญจพล ตันธุ์ ที่คอยเป็นผู้ให้คำปรึกษาประสานงานในเรื่องต่าง ๆ ตลอดจนคำแนะนำ แก้ไข แนวทางในการดำเนินงาน และรวมไปถึงด้านงบประมาณของโครงการพิเศษนี้ และขอขอบคุณสมาชิก Electronics and Control for Nanodevice Research Laboratory (ECSN Lab) ที่คอยให้ความช่วยเหลือได้แก่ ผศ.ดร.หุติยาภรณ์ ทิววงศ์, ผศ. ดร.กรกช อ่อนละออ, ดร.โพธิญาณ สองแก้ว และที่สำคัญคือ ครอบครัวที่คอยให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านตามที่ต้องการจนโครงการนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี

ผู้จัดทำหวังว่าโครงการนี้จะสามารถสร้างประโยชน์ให้กับผู้อื่นในการใช้ประโยชน์หรือการต่อยอดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้มีคุณภาพมากยิ่งขึ้นเพื่อทำให้มนุษย์ได้มองเห็นคุณค่าของงานวิจัยเพื่อนำไปพัฒนาให้โลกนี้เติบโตมากยิ่งขึ้น

ฤทธิเกียรติ วัลย์ดาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตทางการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การกักกรอง.....	4
2.1.1 กระบวนการการกักกรองทางไฟฟ้าเคมีโดยทั่วไป.....	4
2.1.2 ประเภทของการกักกรอง.....	7
2.1.3 การป้องกันการกักกรอง.....	10
2.2 การเคลือบป้องกันการกักกรอง.....	11
2.2.1 ชนิดของการเคลือบ.....	11
2.2.1.1 การเคลือบโดยการใช้อินทรีย์.....	11
2.2.1.2 การเคลือบโดยการใช้อินทรีย์ที่ไม่ใช่โลหะ.....	12
2.2.1.3 การเคลือบโดยใช้โลหะ.....	12
2.2.2.1 พอลิเมอร์และคุณสมบัติ.....	13
2.2.2 การเคลือบด้วยพอลิเมอร์.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.3 ตัวทำละลาย	16
2.3 สารยับยั้งการกัดกร่อน.....	16
2.3.1 ชนิดของสารยับยั้งการกัดกร่อน	17
2.3.2 กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	18
2.4 การตรวจสอบการกัดกร่อน.....	20
2.4.1 หลักการทำงานของเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า.....	20
2.4.2 การตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า.....	22
2.4.2.1 การตรวจวัดแบบทาเพล.....	22
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	38
3.1 แผนผังแสดงกระบวนการทดลอง.....	38
3.1.1 แผนผังการหาชนิดของพอลิเมอร์ที่ในการป้องกันการกัดกร่อน	38
3.1.2 แผนผังการปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์	40
3.1.3 แผนผังการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการเติมอนุพันธ์กราฟีนออกไซด์	41
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	42
3.3 วิธีทำการทดลอง.....	42
3.3.1 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	42
3.3.1.1 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์.....	42
3.3.1.2 การสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	44
3.3.2 การผสมพอลิเมอร์ที่ใช้เคลือบ	44
3.3.3 การเตรียมฐานรองรับ.....	44
3.3.3.2 การทำความสะอาดแผ่นทองแดง	44
3.3.4 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม.....	45
3.3.5 การทดสอบสมบัติ	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.5.1 การหาสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิด	45
3.3.5.2 การทดสอบทางไฟฟ้าเคมี	46
3.3.6 การปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์	48
บทที่ 4 การวิเคราะห์และอภิปรายผล.....	49
4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี	49
4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FT-IR).....	50
4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณสารและองค์ประกอบของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยเครื่องยิงอนุภาคของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์(XPS).....	51
4.4 การตรวจสอบพื้นผิวและความหนาของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM)	53
4.4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	53
4.4.2 ลักษณะการกระจายตัวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสซึ่งถูกเติมลงไปในเอทิลเซลลูโลสในปริมาณ 0.25, 0.5, 1, 2, และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ	54
4.4.3 การตรวจสอบความหนาของชั้นฟิล์มเอทิลเซลลูโลสที่ทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสลงไปในส่วนที่แตกต่างกัน.....	55
4.5 การทดสอบการกัดกร่อน	58
4.5.1 การทดสอบการกัดกร่อนของพอลิเมอร์	58
4.5.2 การทดสอบการกัดกร่อนของเอทิลเซลลูโลสซึ่งได้ทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสลงไปปริมาณที่แตกต่างกัน.....	60
4.5.3 การทดสอบการกัดกร่อนของเอทิลเซลลูโลสซึ่งได้ทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	61

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.5.4 การทดสอบการกัดกร่อนของเอทิลเซลลูโลสซึ่งได้ทำการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.25, 0.5, 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	63
4.6 การวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี.....	65
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	69
บรรณานุกรม.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	73



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของพอลิเมอร์	13
2.2 ค่ากระแสการกัดกร่อน การต้านทานโพลาไรซ์ และการกัดกร่อนต่อปีของสารเคลือบใน แต่ละเงื่อนไข.....	31
2.3 ค่าที่ได้จากการคำนวณจากกราฟทาเพล	32
2.4 สารเติมแต่งที่ผสมลงไปในอดีตเรซิน	33
2.5 ผลที่ได้จากการวัดการกัดกร่อนโตนวิธีการทางเคมีไฟฟ้าของเหล็กกล้าไม่เคลือบและเคลือบด้วย รีติวซ์กราฟีนออกไซด์	36
2.6 องค์ประกอบของสารในอ่างพอสเฟตและเงื่อนไขที่ใช้ในการเคลือบเหล็ก.....	36
4.1 ชนิดและความถี่ที่เกิดจากการสั่นของพันธะของ กราฟีนออกไซด์และรีติวซ์กราฟีน	51
4.2 ปริมาณขององค์ประกอบของพันธะที่มีอยู่ในกราฟีนออกไซด์และรีติวซ์กราฟีนออกไซด์.....	52
4.3 ความหนาของชั้นฟิล์มเอทิลเซลลูโลสที่ทำการเติมรีติวซ์ กราฟีนออกไซด์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสลงไปเป็นปริมาณ 0.25, 0.5, 1, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์.....	57
4.4 ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและกระแสกัดกร่อนของแผ่นทองแดงเปลือยและพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ	59
4.5 ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน(E_{corr}), กระแสกัดกร่อน(I_{corr}) ของแผ่นทองแดงเปลือยและแผ่นทองแดงที่ทำ การเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสทำการเติมรีติวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสลงไป เป็นปริมาณปริมาณ 0, 0.25, 0.5, 1, 2, และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	61
4.6 ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน(E_{corr}), กระแสกัดกร่อน(I_{corr})ของแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิล เซลลูโลสทำการเติมรีติวซ์กราฟีนออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์	63
4.7 ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน(E_{corr}), กระแสกัดกร่อน(I_{corr}) ของแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิล เซลลูโลสซึ่งได้ทำการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.25, 0.5, 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์	65

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากการกัดกร่อนของอุตสาหกรรมภายในประเทศสหรัฐอเมริกา.....	1
2.1 แผนภาพแสดงโลหะ M เกิดการสูญเสียเนื้อสาร.....	6
2.2 โครงสร้างของกราฟีนกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	18
2.3 แผนภาพอย่างง่ายของโพเทนทิโอสแตต/กัลวานอสแตต	20
2.4 แผนภาพของชั่วโมงในการวัดแบบ 3 ชั่วโมง.....	21
2.5 พฤติกรรมการเกิดโพลาริเซชันของโลหะ M ในสารละลายกรด.....	22
2.6 การประมาณหาค่าคงที่แบบทาเฟล.....	23
2.7 การตอบสนองของกระแสไฟฟ้าต่อสัญญาณศักย์ไฟฟ้าสลับในรูปคลื่นไซน์สำหรับตัวเก็บประจุ..	24
2.8 ข้อมูลที่ได้จาก Electrochemical impedance spectroscopy สำหรับการกัดกร่อน	24
2.9 กราฟ Nyquist ที่แสดงผลของการควบคุมการแพร่บางส่วนกับวอร์เบิร์กอิมพีแดนซ์.....	25
2.10 วงจรสมมูลในการเคลื่อนที่ของโลหะ.....	30
2.11 กราฟทาเฟลที่ได้จากการวัดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนที่เคลือบด้วยอีพ็อกซีเรซินผสมกราฟีนออกไซด์และแซในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 10 วัน	31
2.12 กราฟทาเฟลของการจากการวัดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่เคลือบด้วยอีพ็อกซีเรซินผสมกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์ออกไซด์ที่แซในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1 วัน	32
2.13 กราฟทาเฟลที่ได้จากการวัดการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์	34
2.14 กราฟทาเฟลของเหล็กกล้าที่ไม่มีการเคลือบที่อุณหภูมิ 20, 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส....	35
2.15 กราฟทาเฟลของเหล็กกล้าที่เคลือบด้วยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 20, 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส	35
2.16 กราฟทาเฟลของเหล็กที่ทำกรเคลือบด้วยฟอสเฟตที่มีปริมาณของกราฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกัน.....	37
3.1 กราฟีนออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์.....	43
3.2 เครื่องรามาโนสเปกโตรสโคปี.....	45
3.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี.....	46
3.4 เครื่องโพเทนทิโอสแตตสำหรับใช้ทดสอบเชิงไฟฟ้าเคมี	47

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.5 การวัดเชิงเคมีไฟฟ้าของแผ่นทองแดง	47
3.6 แผ่นทองแดงเปล้าและแผ่นทองแดงที่เคลือบพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่ผ่านการวัดด้วยเครื่องโพเทนทีโอสแตต.....	48
4.1 กราฟรามานของ กราฟีนออกไซด์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียส	49
4.2 กราฟ FT-IR ของ กราฟีนออกไซด์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียส	50
4.3 กราฟที่วัดได้จากเครื่องยิงอนุภาคของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (XPS) ของ กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	52
4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาจาก FE-SEM ของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	53
4.5 การกระจายตัวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ 300 องศาเซลเซียสในเอทิลเซลลูโลส.....	54
4.6 ภาพตัดขวางแสดงค่าความหนาของชั้นฟิล์มเอทิลเซลลูโลสที่ทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	56
4.7 กราฟแนวโน้มของความหนาของชั้นฟิล์มเอทิลเซลลูโลสที่ทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	57
4.8 กราฟศักย์ไฟฟ้ากักตรอนเฉลี่ยของแผ่นทองแดงเปลือยและแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ	58
4.9 กราฟกระแสกักตรอนเฉลี่ยของแผ่นทองแดงเปลือยและแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ.....	58
4.10 กราฟศักย์ไฟฟ้ากักตรอนเฉลี่ยของแผ่นทองแดงเปลือยและแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	60
4.11 กราฟกระแสกักตรอนเฉลี่ยของแผ่นทองแดงเปลือยและแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	60
4.12 กราฟศักย์ไฟฟ้ากักตรอนเฉลี่ยของแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสซึ่งได้ทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	62
4.13 กราฟกระแสกักตรอนเฉลี่ยของแผ่นทองแดงเปลือยและแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์	62

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
4.14 กราฟศักย์ไฟฟ้ากั้ดกร่อนเฉลี่ยของแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสซึ่งได้ทำการเติมกราฟีนออกไซด์.....	64
4.15 กราฟกระแสกั้ดกร่อนเฉลี่ยของแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสซึ่งได้ทำการเติมกราฟีนออกไซด์.....	64
4.16 กราฟในควิสที่ได้จากการวัดแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสกับ กราฟีนออกไซด์ 0.25 เปอร์เซ็นต์.....	66
4.17 กราฟโบเต้แสดงค่าอิมพีแดนซ์และมุมเฟสที่ได้จากการวัดแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสกับกราฟีนออกไซด์ 0.25 เปอร์เซ็นต์.....	66
4.18 วงจรสมมูลที่ได้จากการจำลองจากค่าของค่าอิมพีแดนซ์ของแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสกับ กราฟีนออกไซด์ 0.25 เปอร์เซ็นต์	67
4.19 วงจรสมมูลและการเกิดปฏิกิริยาในแต่ละชั้นของตัวอย่างที่ใช้ในการเคลือบ	67

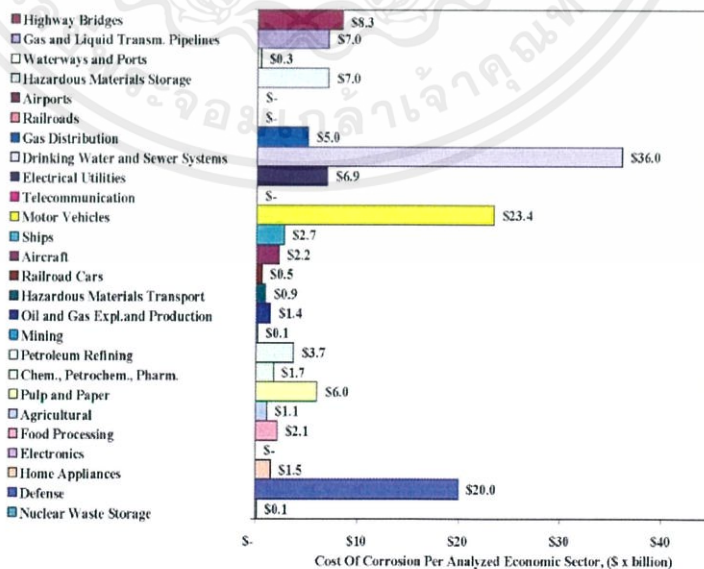
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การกัดกร่อนเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อโลกเป็นอย่างมากทั้งการพัฒนาาระบบเศรษฐกิจของภูมิภาคหรือประเทศใด ๆ ซึ่งการพัฒนาเหล่านี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับทรัพยากรธรรมชาติหรือกิจกรรมการผลิตเพียงเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับโครงสร้างพื้นฐานที่ใช้ในการแสวงหาผลประโยชน์ อาทิ เช่น ระบบชลประทาน ถนน สนามบิน การเดินเรือ การขนส่งทางบกและทางอากาศ ตลอดจนอุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ ซึ่งพบว่า การกัดกร่อนมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากพบว่ามีปัจจัยหลายอย่างที่จะช่วยในการทำให้เกิดการกัดกร่อนเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว อย่างเช่น มลพิษจากโรงงาน ก๊าซเสีย ตลอดจนฝนกรด เป็นต้น และยังอีกหลาย ๆ ปัจจัยที่ส่งผลให้การกัดกร่อนเกิดได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้นซึ่งส่งผลกระทบต่อ สภาพแวดล้อม อุตสาหกรรม ตลอดจนโครงสร้างพื้นฐานทำให้เกิดการเสื่อมสภาพลงอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์

ในแต่ละปีทุกประเทศทั่วโลกจะต้องเสียค่าใช้จ่ายจากการเสื่อมสภาพของสิ่งก่อสร้างที่เกิดการกัดกร่อนและการป้องกันการกัดกร่อนเป็นจำนวนมหาศาล อย่างเช่น จากรายงานประจำปีของประเทศสหรัฐอเมริกา[1]ได้บอกถึงค่าใช้จ่ายทั้งทางตรงและทางอ้อมของการกร่อนของโลหะภายในประเทศและกลยุทธ์การป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสม ต้นทุนการกัดกร่อนโดยรวมอยู่ที่ประมาณ 276 พันล้านเหรียญต่อปีซึ่งคิดเป็นร้อยละ 3.1 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมภายในของสหรัฐอเมริกาในปี 2541 (GDP) ค่าใช้จ่ายนี้ถูกกำหนดโดยการวิเคราะห์ใน 26 ภาคอุตสาหกรรม



ภาพที่ 1.1 มูลค่าความเสียหายที่เกิดจากการกัดกร่อนในแต่ละภาคส่วนของอุตสาหกรรมภายในประเทศสหรัฐอเมริกาในปี พ.ศ. 2541 (พันล้านเหรียญสหรัฐ)[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การป้องกันการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นสามารถทำได้หลายหลายวิธีแล้วแต่จุดประสงค์ของงานนั้น ๆ อย่างเช่น การอาบผิวด้วยน้ำมัน การทาหรือพ่นสี การเคลือบด้วยน้ำยาเคลือบ การป้องกันโดยวิธีทางเคมี การชุบเคลือบด้วยโลหะที่ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี การเคลือบผิวด้วยพลาสติก เป็นต้น แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้วิธีการป้องกันการกัดกร่อนโดยการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบจำพวกพอลิเมอร์ซึ่งในปัจจุบันตลาดของสารเคลือบจำพวกนี้มีขนาดใหญ่มาก สารแต่ละชนิดก็มีสมบัติที่ต่างกัน การใช้งานจึงต่างกันด้วย พอลิเมอร์ที่ใช้ในการเคลือบก็มีหลายหลายชนิด เช่น อีพ็อกซี ยูรีเทน อะคริลิก เป็นต้น อีพ็อกซีเรซินเป็นสารที่นิยมใช้ในงานในการเคลือบป้องกันการกัดกร่อนมากที่สุด แต่นอกจากพอลิเมอร์ที่กล่าวมาในข้างต้นแล้วนั้นยังมีพอลิเมอร์อีกหลากหลายชนิดที่สามารถสังเคราะห์ได้จึงต้องการศึกษารูปร่างนอกจากพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในตามอุตสาหกรรมที่กล่าวมาในข้างต้นนั้นแล้วยังจะมีพอลิเมอร์ชนิดใดบ้างที่จะช่วยในการป้องกันการกัดกร่อนได้และยังต้องการเพิ่มสารเติมแต่งอย่างกราฟีนออกไซด์เพื่อที่จะเป็นตัวช่วยเสริมการป้องกันการกัดกร่อนทำให้สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีมากยิ่งขึ้น เพื่อที่จะประยุกต์และเพิ่มทางเลือกการใช้งานของสมบัติของวัสดุให้มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการป้องกันการกัดกร่อนของพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ภายใต้การควบคุมให้อยู่ในสภาวะแวดล้อมเดียวกัน
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติและปริมาณของอนุภาคกราฟีนออกไซด์และอนุภาครีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์ที่ใส่ลงไปพอลิเมอร์เพื่อช่วยในการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ

1.3 ขอบเขตทางการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยสำหรับการพัฒนาคุณภาพของสารเคลือบที่ทำมาจากพอลิเมอร์ผสมกับกราฟีนออกไซด์และรีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีค่าความเข้มข้นเดียวกับน้ำทะเลซึ่งเป็นสารละลายพื้นฐานที่ใช้ในการศึกษาการกัดกร่อนและการป้องกันการกัดกร่อนของโลหะเพื่อใช้เปรียบเทียบพอลิเมอร์แต่ละชนิดและปริมาณของกราฟีนออกไซด์และรีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์ที่ผสมลงไปเพื่อหาเงื่อนไขที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนของโลหะได้ดีที่สุด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ในการเคลือบผิวที่ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าและค่าของศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นซึ่งมีผลต่อการกัดกร่อนของโลหะ
2. ได้ความรู้เกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อการกัดกร่อนของโลหะเพื่อที่จะนำปัจจัยเหล่านั้นไปแก้ไขเพื่อเพิ่มคุณภาพของสารเคลือบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
3. ได้รู้จักการแก้ปัญหาการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ตลอดจนการวางแผนการการแก้ไขข้อผิดพลาดในการทำงานวิจัยหรือการทำงานต่าง ๆ ให้มีแบบแผนมากยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกัดกร่อน

การกัดกร่อนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นทางธรรมชาติซึ่งสามารถเจอได้ในชีวิตประจำวันซึ่งสามารถเกิดได้กับวัสดุทุกชนิดแต่โดยส่วนใหญ่จะมุ่งเป้าหมายหรือให้ความสำคัญไปกับวัสดุจำพวกโลหะมากกว่าวัสดุอื่น ๆ เนื่องจากว่าโลหะเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและทนทานนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โครงสร้างพื้นฐาน อาคาร ตลอดจนเครื่องอุปโภคบริโภคต่าง ๆ มากมายแต่เมื่อใช้งานไปในระยะเวลาหนึ่งโลหะจะโดนกัดกร่อนโดยสภาพแวดล้อมภายนอกทำให้โลหะเกิดการเสื่อมสภาพหรือลดความแข็งแรงลงในระยะยาวอาจทำให้อันตรายเกิดขึ้นได้โดยในแต่ละปีอุตสาหกรรมจะต้องจ่ายเงินจำนวนมากเพื่อซ่อมแซมในส่วนของวัสดุที่เกิดการกัดกร่อนเสียหายเพื่อความปลอดภัยและทำให้อุตสาหกรรมดำเนินงานได้อย่างต่อเนื่อง

2.1.1 กระบวนการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมีโดยทั่วไป

กระบวนการกัดกร่อน [2] ทางธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นการกัดกร่อนทางไฟฟ้าเคมีซึ่งจะเป็นไปตามกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ สามารถพิจารณาได้ดังตัวอย่างการกัดกร่อนของสังกะสี (Zn) ในตัวกลางที่เป็นกรดสามารถแสดงให้เห็นปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



สังกะสีทำปฏิกิริยากับสารละลายที่เป็นกรดเกิดปฏิกิริยาทำให้เปลี่ยนรูปผลิตภัณฑ์เป็นสังกะสีคลอไรด์และปลดปล่อยแก๊สไฮโดรเจนเป็นฟองอากาศออกมาสู่พื้นผิวของสารละลาย ปฏิกิริยาข้างต้นที่กล่าวมานี้ใช้ในกระบวนการทำความสะอาดพื้นผิวและการเลือกใช้วัสดุและรูปแบบของปฏิกิริยาทางไอออนิกสามารถเขียนได้ดังนี้

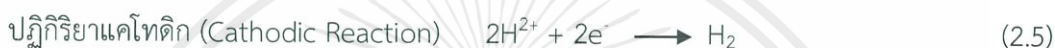


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการกำจัด Cl^- ออกทั้ง 2 ข้างของปฏิกิริยาจะได้ปฏิกิริยาใหม่ดังนี้

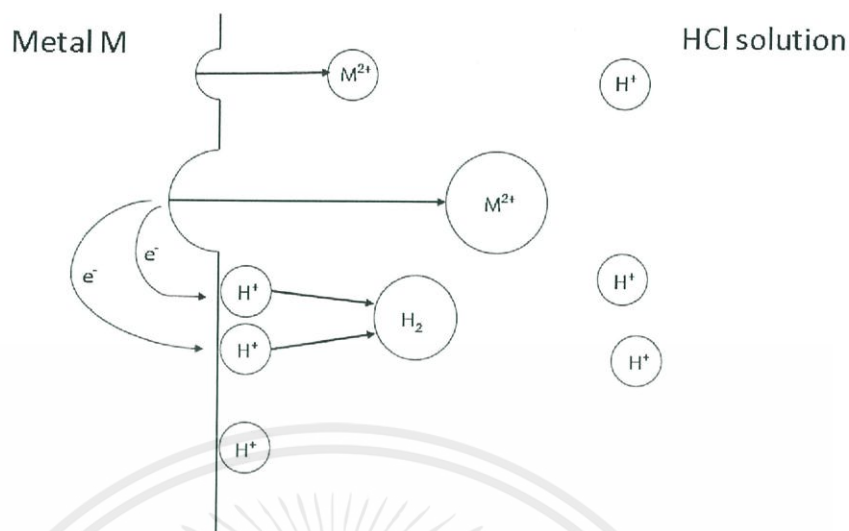


จากปฏิกิริยาข้างต้นที่กล่าวมาสามารถแยกออกเป็นปฏิกิริยาย่อย ๆ ได้ดังนี้



จากปฏิกิริยาแอโนดิกเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งในเลขวาเลนซ์ของสังกะสีเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น +2 นั่นคือ อิเล็กตรอนในวงนอกถูกปลดปล่อยออกไป 2 ตัว ในขณะที่ ปฏิกิริยาแคโทดิกเป็นปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) เลขวาเลนซ์ของไฮโดรเจนลดลงจาก +1 เป็น 0 หมายความว่าไฮโดรเจนได้รับอิเล็กตรอนเพิ่มมา 1 ตัว

ปฏิกิริยาในข้างต้นนั้นเกี่ยวข้องกับการส่งผ่านประจุ (Charge transfer) หรือ การแลกเปลี่ยนของอิเล็กตรอน (Exchange of electron) แสดงให้เห็นดังภาพที่ 2.1 โลหะ M สูญเสียเนื้อวัสดุออกไปจากการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจำนวนมากไปยังพื้นผิวที่อยู่ติดกันและอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยมานั้นทำปฏิกิริยากับ H^+ ในสารละลายกลายเป็น H_2 ปลดปล่อยออกมาสู่ภายนอก ซึ่งการใช้ในการเป็นพาหะในการส่งผ่านไอออน เช่น Zn^{2+} และ H^+ ซึ่งเรียกพาหะในการส่งผ่านไอออนนี้ว่า อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)



ภาพที่ 2.1 แผนภาพแสดงโลหะ M เกิดการสูญเสียเนื้อสาร

ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนโดยมีตัวกลางเป็นอิเล็กโทรไลต์หรือนำไฟฟ้าจะถือว่าเป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีซึ่งตัวกลางที่ทำให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนที่สำคัญที่สุดก็คือ น้ำและสำหรับการกัดกร่อนของโลหะ ปฏิกิริยาแอโนดิก (ออกซิเดชัน) จะมีสมการที่มีรูปแบบดังนี้



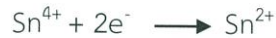
ตัวอย่างเช่น



ส่วนปฏิกิริยาแคโทดิก (รีดักชัน) จะมีสมการที่มีรูปแบบดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อัตราการกัดกร่อนขึ้นอยู่กับศักย์ของปฏิกิริยาทั้งในส่วนของแอโนดิกและแคโทดิกซึ่งสามารถคาดการณ์ได้สอดคล้องตามกฎของฟาราเดย์ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราสูญเสียเนื้อของโลหะที่ความต่างศักย์ใด ๆ (V_m) และความหนาแน่นกระแสแอโนดิกสำหรับการสูญเสียเนื้อโลหะ (i_{aM})

$$V_m = \frac{i_{aM}}{nF} \quad (2.7)$$

เมื่อ n เป็นจำนวนประจุซึ่งแสดงถึงจำนวนของอิเล็กตรอนที่เกิดการแลกเปลี่ยนขณะที่เกิดปฏิกิริยา

F เป็นค่าคงที่ของ ฟาราเดย์ ($F = 96,485 \text{ C/mol}$)

2.1.2 ประเภทของการกัดกร่อน

การกัดกร่อนสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทขึ้นอยู่กับลักษณะการเกิดการกัดกร่อนที่ปรากฏบนพื้นผิวของโลหะ โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ประเภท [2] ดังนี้

1. การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion) เป็นการกัดกร่อนรูปแบบหนึ่งที่เกิดจากกระบวนการทางเคมีหรือการละลายของโลหะเป็นไอออนของโลหะซึ่งการกัดกร่อนประเภทนี้เกิดมากที่สุดและเกิดขึ้นทั่วทั้งพื้นผิวของโลหะ โลหะจะบางลงและผุพังลงในที่สุด การกัดกร่อนประเภทนี้สามารถสังเกตได้ทางกายภาพ เพราะจะมีรอยสนิมเกิดขึ้นบริเวณที่เกิดการกัดกร่อนทำให้ไม่ค่อยจะปัญหาในทางวิศวกรรม

โลหะจะต้านทานการกัดกร่อนของโลหะโดยการสร้างฟิล์มขึ้นบนพื้นผิวของโลหะซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นได้เองตามเมื่อผิวของโลหะสัมผัสกับอากาศภายนอกเป็นระยะเวลาหนึ่งและชั้นฟิล์มสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วด้วยการบำบัดทางเคมี (Chemical treatment) อย่างเช่นการแช่ด้วยกรดไนตริก กระบวนการนี้สามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการทำเหล็กกล้าไร้สนิม

2. การกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion) เป็นประเภทการกัดกร่อนที่มีลักษณะเฉพาะซึ่งจะเกิดขึ้นบริเวณขอบเกรนของโลหะ (Grain boundaries) ซึ่งพื้นที่บริเวณขอบเกรนเป็นพื้นที่ที่มีความไม่ตรงกันของผลึกที่อยู่ติดกันทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการกัดกร่อน

ปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณของขอบเกรนได้มากขึ้นมีดังนี้

1. การแบ่งแยกองค์ประกอบของธาตุหรือสารประกอบที่มีความจำเพาะเจาะจง เช่น โลหะอลูมิเนียม หรือ โลหะนิกเกิลผสมโครเมียม
2. การเพิ่มของธาตุหรือสารประกอบเข้าไปในวัสดุผสม เช่น ทองเหลือง
3. การลดลงของค่าของความต้านทานในการกัดกร่อนของธาตุบริเวณของเกรน เช่น โลหะสแตนเลส

ปัจจัยทั้งหมดในข้างต้นนำไปสู่การเกิดการกัดกร่อนบริเวณของขอบเกรนซึ่งเป็นผลมาจากการได้รับความร้อนของโลหะ เช่น การเชื่อม การอบอ่อนและการให้ความร้อนด้วยวิธีอื่น ๆ

3. การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดจากโลหะที่ต่างชนิดกันมาแนบหรือสัมผัสกัน เป็นการกัดกร่อนที่สร้างปัญหาให้กับมนุษย์มากที่สุดซึ่งสามารถเจอได้ทั่วทุกพื้นที่ไม่ว่าจะในโรงงานอุตสาหกรรมตลอดจนท่อน้ำภายในบ้าน

เมื่อโลหะสองชนิดที่ต่างกันเกิดการสัมผัสกันทำให้กระแสไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านโลหะทั้งสองชนิดนั้นได้ในตัวกลางที่นำไฟฟ้า (Electrolyte) ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นและความต่างศักย์ที่ต่างกันนี้ทำให้เกิดแรงผลักดันทางไฟฟ้าและทำให้เกิดการสูญเสียของเนื้อโลหะที่มีศักย์ที่ต่ำกว่า (ค่าของความต่างศักย์ติดลบมาก) นอกจากนี้ยังช่วยลดแนวโน้มการเกิดการกัดกร่อนของโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่า (ค่าของความต่างศักย์เป็นบวกมาก) ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการเลือกวัสดุ อาทิเช่น ในการป้องกันการเกิดการกัดกร่อนของสแตนเลสโดยการใช้สังกะสีมาช่วยในการป้องกันบนเรือสำราญซึ่งทำให้สังกะสีเกิดการกัดกร่อนก่อนสแตนเลส

4. การกัดกร่อนแบบช่องแคบ (Crevice corrosion) เป็นการกัดกร่อนเฉพาะบริเวณซึ่งเกิดขึ้นภายในหรือติดกับช่องแคบ ๆ หรือช่องว่างระหว่างโลหะกับโลหะ หรือ โลหะกับอโลหะ ที่มีสารละลายเข้าไปซึ่งอยู่เป็นเวลานานส่งผลให้เกิดค่าความเข้มข้นของออกซิเจนต่างกันในแต่ละบริเวณผิวของโลหะ การกัดกร่อนประเภทนี้สามารถเกิดขึ้นได้ทุก ๆ โลหะและในทุกสภาพแวดล้อม อย่างไรก็ตาม โลหะจำพวก อลูมิเนียมและสแตนเลสมีความต้านทานของการกัดกร่อนนั้นขึ้นอยู่กับชั้นของออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนพื้นผิวและในสภาพแวดล้อมอย่างเช่น น้ำทะเลการกัดกร่อนแบบช่องแคบนั้นจะสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายเนื่องจากน้ำทะเลมีคลอไรด์ไอออนเป็นองค์ประกอบ

วัสดุที่จะเกิดการกัดกร่อนแบบช่องแคบได้นั้นไม่จำเป็นจะต้องเป็นโลหะเพียงชนิดเดียวยังมีวัสดุอีกหลายชนิด อาทิเช่น ไม้ พลาสติก ยาง แก้ว คอนกรีต ตลอดจนสิ่งมีชีวิต ก็สามารถเกิดการกัดกร่อนชนิดนี้ได้ ซึ่งหลังจากการกัดกร่อนเกิดขึ้นภายในช่องแคบแล้วความเร็วของการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคลอไรด์ในบริเวณนั้นด้วย

5. การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) เป็นรูปแบบหนึ่งของการเกิดการกัดกร่อนเฉพาะจุดมักเกิดร่วมกับการกัดกร่อนรูปแบบอื่นด้วย มันปรากฏเป็นรูเล็ก ๆ ลึก ๆ บนพื้นผิวซึ่งตรวจสอบได้ค่อนข้างยากเพราะส่งผลกระทบต่อพื้นผิวค่อนข้างน้อยซึ่งอันตรายเป็นอย่างมากเพราะทำให้เกิดความเสียหายแบบฉับพลัน การเกิดขึ้นของหลุมมีส่วนเกี่ยวข้องกับการสลายตัวของชั้นฟิล์มป้องกันบนพื้นผิวของโลหะ

ความกว้างของหลุมจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาแต่ไม่ทำให้ความลึกเพิ่มขึ้นและส่วนใหญ่บริเวณที่เกิดหลุมจะยังถูกปกคลุมด้วยผลิตภัณฑ์ป้องกันการกัดกร่อนและยังทำให้เกิดการสูญเสียของน้ำหนักตลอดจนความหนาของวัสดุค่อนข้างน้อยทำให้ยากที่จะทำการตรวจสอบการกัดกร่อนประเภทนี้

ผลกระทบของการกัดกร่อนแบบรูเข็มทำให้เกิดการแตกหักแบบเปราะ การแตกหักจากความล้า การแตกร้าวเนื่องจากความเค้นรวมกับการกัดกร่อน และเกิดการกัดกร่อนร่วมกับความล้า

6. การกัดเซาะ (Erosion corrosion) เป็นการกัดกร่อนทางกายภาพโดยส่วนใหญ่มักเกิดจากการไหลของของไหลไม่ว่าจะเป็นสถานะของเหลวหรือแก๊สผ่านพื้นผิวของโลหะทำให้เกิดการสึกกร่อนบริเวณผิวของโลหะมีลักษณะเป็นร่องเกิดขึ้น ซึ่งปัจจัยส่งผลกระทบต่อความรุนแรงของการกัดเซาะคือความเร็วของตัวกลาง ความซับซ้อนของการเคลื่อนที่ของตัวกลาง การกระทบกับวัสดุของตัวกลาง สารแขวนลอยในตัวกลาง อุณหภูมิ และเงื่อนไขของการเปลี่ยนสถานะของสารตัวกลาง

7. การแตกร้าวเนื่องจากความเค้นรวมกับการกัดกร่อน (Stress Corrosion Cracking , SCC) เป็นการแตกหักอย่างช้า ๆ ของโลหะภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความเค้นแรงดึง (Tensile stress) ที่คงที่ การกัดกร่อนประเภทนี้เกิดที่ จุดของความเค้น (Point of stress) โดยส่วนใหญ่จะเกิดกับโลหะและโลหะผสมที่ปราศจากการกัดกร่อน รอยแตกที่เกิดขึ้นจะเจาะผ่านพื้นผิวที่จุดของความเค้น การแตกหักนี้สามารถเกิดได้ทั้งบริเวณขอบเกรนและผ่ากลางเกรน ความเร็วในการแตกหักขึ้นอยู่กับ ระดับของความเค้น อุณหภูมิ และความเข้มข้นของการกัดกร่อน

2.1.3 การป้องกันการกัดกร่อน

การป้องกันการกัดกร่อน [3] นั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธีมากขึ้นซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ด้วยซึ่งโดยทั่วไปแล้วสามารถทำได้ดังนี้

1.การออกแบบ การควบคุมการกัดกร่อนสามารถทำได้ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบการสร้าง ซึ่งถ้าสิ่งที่กำลังทำมีความเสี่ยงต่อการเกิดการกัดกร่อนก็ควรจะทำกรวางแผนให้ครอบคลุมทุกขั้นตอน เช่นการลดการกัดกร่อนของรอยร้าวควรจัดช่องว่างเพื่อไม่ให้อากาศหรือของไหลสามารถไหลผ่านได้ เป็นต้น

2.การป้องกันโดยการเคลือบ การเคลือบผิวสามารถสร้างชั้นป้องกันการกัดกร่อนระหว่างโลหะกับสิ่งแวดล้อมภายนอก วิธีที่ใช้กันโดยทั่วไปก็คือการชุบเคลือบด้วยสังกะสี

3.การควบคุมสภาพแวดล้อมภายนอก การกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างโลหะและก๊าซในสภาพแวดล้อม เมื่อใช้มาตรการในการควบคุมสิ่งแวดล้อมสามารถช่วยลดการเกิดการกัดกร่อนลงได้ เช่น การควบคุมปริมาณ กำมะถัน คลอรีนหรือออกซิเจน ในสภาพแวดล้อม ไม่ให้สูงจนเกินไปสามารถช่วยทำให้วัสดุเกิดการกัดกร่อนได้น้อยลงได้

4.การเคลือบเทียม เคลือบเทียมเกี่ยวข้องกับการเคลือบโลหะด้วยโลหะชนิดอื่นที่มีแนวโน้มที่จะออกซิไดซ์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมีอยู่ด้วยกัน 2 เทคนิค คือ การป้องกันแบบแอโนดิก (Anodic protection) และ การป้องกันแบบแคโทดิก (Cathodic protection)

การป้องกันแบบแคโทดิก เป็นการให้นำโลหะที่มีความสามารถในการสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าโลหะที่ต้องกันไปอยู่ด้วยกันทำให้โลหะชนิดนั้นเกิดการกัดกร่อนก่อนโลหะที่ถูกป้องกัน เช่น การนำโลหะแมกนีเซียมไปติดไว้กับโครงเรือหรือท่อ ทำให้เหล็กผุกร่อนช้าลงเนื่องจากแมกนีเซียมเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าเหล็ก

การป้องกันแบบแอโนดิก เป็นการใช้กระแสไฟฟ้าจากภายนอกสร้างฟิล์มขึ้นมาปกป้องโลหะ ทำให้โลหะเกิดการกัดกร่อนได้ช้าลง

5.การทำพาสซีเวชัน เป็นการใช้กระบวนการทางเคมีในการกระตุ้นทำให้เกิดชั้นฟิล์มบริเวณพื้นผิวของโลหะ โดยการนำโลหะไปแช่ลงในสารละลายกรดซึ่งจะทำให้เกิดชั้นฟิล์มป้องกันเกิดขึ้น

6.การซ่อมบำรุง ไม่ว่าจะเป็นการป้องกันการกัดกร่อนด้วยวิธีใดก็ตามย่อมมีอายุการใช้งานที่จำกัดจึงต้องมีการตรวจสอบบำรุงส่วนที่อาจทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ไม่ว่าจะเป็นรอยขีดข่วนขนาดเล็กหรือการหลุดออกของสารเคลือบอาจทำให้เกิดการกัดกร่อนขนาดใหญ่ขึ้นในอนาคตได้

2.2 การเคลือบป้องกันการกัดกร่อน

การเคลือบป้องกันการกัดกร่อนของโลหะเพื่อไม่ให้โลหะสัมผัสกับสภาพแวดล้อมโดยตรงซึ่งประเภทของการเคลือบนั้นมีอยู่อย่างหลากหลายขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการใช้งาน

2.2.1 ชนิดของการเคลือบ

ส่วนใหญ่จะเป็นการใช้สารอินทรีย์ [4] หรือโลหะในการเคลือบผิวระหว่างสภาพแวดล้อมที่ค่อนข้างรุนแรงกับวัสดุซึ่งแน่นอนว่ามีกระบวนการและวัสดุต่าง ๆ มากมายที่จะนำมาใช้ในการเคลือบ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งประเภทของวัสดุที่ใช้เคลือบออกเป็น 3 ประเภท คือ สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และโลหะ อย่างไรก็ตามการเคลือบป้องกันการกัดกร่อนได้มีการประยุกต์การใช้วัสดุออกอย่างหลากหลายมากยิ่งขึ้นเพื่อเพิ่มประโยชน์การใช้งานจึงได้นำวัสดุมาผสมผสานกันมากกว่าหนึ่งประเภท

2.2.1.1 การเคลือบโดยใช้สารอินทรีย์

การเคลือบโดยใช้สารอินทรีย์มีความซับซ้อนมากขึ้นทั้งในด้านการพัฒนาและการทำงานในด้านการเหมาะสมและมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาประสิทธิภาพให้ดีขึ้นเพื่อที่จะใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมปิโตรเลียมซึ่งมีความสำคัญในการพัฒนาสิ่งต่าง ๆ ให้เจริญเติบโตตามไปด้วยซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้สารประกอบจำพวกเรซินเป็นพื้นฐาน

ตัวแปรหลักที่ใช้ในการออกแบบการเคลือบป้องกันการกัดกร่อน

1. การไม่ยอมให้สารผ่านไปได้ (Impermeability) คือการเคลือบโดยการป้องกันสิ่งภายนอกไม่ว่าจะเป็น น้ำ ความชื้น ตลอดจนสิ่งที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้นไม่ว่าจะเป็น ก๊าซ ไอออน หรืออิเล็กตรอน ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมไม่ให้แทรกซึมผ่านเข้ามาสัมผัสกับวัสดุได้

2. การยับยั้งการกัดกร่อน (Corrosion inhibition) เป็นการใช้สารบางอย่างในการเคลือบโดยการทำให้เกิดปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมบางอย่างเพื่อที่จะทำให้เกิดฟิล์มป้องกันขึ้นบนพื้นผิวของโลหะ

3. การใช้เม็ดสีป้องกันแบบแคโทดิก (Cathodically protective pigments) การป้องกันแบบแคโทดิกในสารเคลือบโดยส่วนใหญ่มาจากสารเติมแต่งในไพรเมอร์ซึ่งหน้าที่หลักของสารเติมแต่งคือเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าทำให้เกิดการกัดกร่อนได้น้อยลง อย่างเช่นการใช้ สังกะสีเป็นไพรเมอร์ในการป้องกันการกัดกร่อน

4. ไพรเมอร์ (Primers) เป็นตัวที่ใช้การเคลือบในชั้นแรกซึ่งเป็นตัวที่จะช่วยในการยึดเกาะกับโลหะเพื่อที่จะเคลือบชั้นอื่น ๆ ต่อไป ซึ่งการใช้ไพรเมอร์เคลือบจะทำให้เพิ่มความแข็งแรงระหว่างสารเคลือบกับโลหะได้ดีมากยิ่งขึ้น ซึ่งการใช้ไพรเมอร์แต่ละชนิดขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการเคลือบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การเคลือบชั้นที่สองหรือการเคลือบประสาน (Secondary or intermediate coatings) เป็นการชั้นเคลือบที่ในการเชื่อมประสานระหว่างชั้นไพรเมอร์กับการเคลือบในชั้นลำดับถัดไป

6. การเคลือบชั้นบนสุด (Topcoats) เป็นการเคลือบเพื่อยืดอายุการใช้งานของชั้นฟิล์มที่เคลือบก่อนหน้า การออกแบบในชั้นนี้โดยทั่วไปแล้วจะทำให้ฟิล์มมีความหนาแน่นมากยิ่งขึ้น เพิ่มความไม่ชอบน้ำให้กับวัสดุเพื่อลดการซึมผ่านของความชื้น ลดการสะท้อนของแสง ตลอดจนลดการเสื่อมสภาพของชั้นฟิล์ม

2.2.1.2 การเคลือบโดยการใช้สารอนินทรีย์ที่ไม่ใช่โลหะ

การเคลือบแบบอนินทรีย์สามารถผลิตได้โดยปฏิกิริยาทางเคมีอาจจะใช้ไฟฟ้าหรือไม่ใช้ก็ได้ และมีหลายหลายชนิดของวัสดุอย่างเช่น ไฮโดรริกซีเมนต์สามารถใช้เคลือบกับวัสดุที่อยู่ใต้น้ำได้ และยังมี เซรามิกส์ เคลย์ แก้ว คาร์บอน ซิลิเกต เป็นต้น การเคลือบบางชนิดสามารถเปลี่ยนพื้นผิวของโลหะให้กลายเป็นโลหะออกไซด์หรือองค์ประกอบอื่นที่สามารถเพิ่มความสามารถการป้องกันการกัดกร่อนได้มากกว่าการเกิดชั้นฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

2.2.1.3 การเคลือบโดยใช้โลหะ

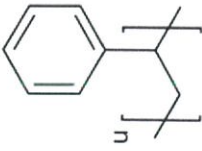
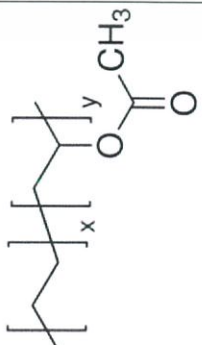
การเคลือบโดยการใช้โลหะนิยมใช้ในสถานที่ที่มีสภาพแวดล้อมค่อนข้างรุนแรงเช่น การขัดสีที่รุนแรง อุณหภูมิสูง ซึ่งการเลือกวัสดุที่นำมาใช้ในการเคลือบถือว่าเป็นสิ่งที่สำคัญที่ต้องขึ้นอยู่กับวัสดุที่ต้องการเคลือบด้วย ซึ่งการเคลือบสามารถทำได้หลากหลายวิธีเช่น อิเล็กโทรเพลตติ้ง (Electroplating) อิเล็กโทรเลสเพลตติ้ง (Electroless plating) การชุบเคลือบแบบจุ่มร้อน (Hot dip galvanizing) การเคลือบเคลือบ (Cladding) การพ่นเคลือบด้วยความร้อน (Metalizing or Thermal spray) เป็นต้น

2.2.2 การเคลือบด้วยพอลิเมอร์

การใช้พอลิเมอร์ในการเคลือบป้องกันการกัดกร่อนเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและง่ายในการเคลือบเนื่องจากพอลิเมอร์ส่วนใหญ่สามารถป้องกันการกัดกร่อนซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่าง อาทิเช่น หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ แรงยึดติดระหว่างวัสดุกับตัวพอลิเมอร์ ความเป็นรูพรุน เป็นต้น ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะมีสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกัน

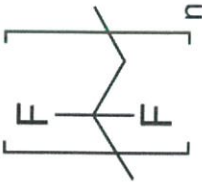
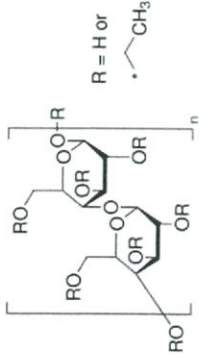
2.2.2.1 พอลิเมอร์และคุณสมบัติ

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของพอลิเมอร์ [5]

พอลิเมอร์	สูตรโครงสร้าง	จุดหลอมเหลว (°C)	น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	ความหนาแน่น (g/ml)	การละลายในน้ำ	คุณสมบัติ
พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) 	$[\text{CH}_2\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)]_n$	240	104.1	1.05	ไม่ละลาย	พอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีสีมีความแข็งแรงแต่เปราะด้านทานรังสีแกมมาได้น้ำไฟฟ้าได้ดีแต่ไม่ทนต่อรังสียูวี นิยมนำไปใช้ในการทำของเล่น ตัวกระจายแสงหลอดทดลอง บรรจุภัณฑ์
พอลิเอทิลีนโคไวโนลอะซิเตท (Poly(ethylene-co-vinyl acetate), EVA) 	$(\text{CH}_2\text{CH}_2)_m[\text{CH}_2\text{CH}(\text{OCOCH}_3)]_n$	190	342.43	0.933	ไม่ละลาย	พอลิเอทิลีนโคไวโนลอะซิเตทเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับไวโนลอะซิเตทไวโนลอะซิเตทผสมอยู่ประมาณ 10-40% มีคุณสมบัติในการต้านทานรังสียูวีสามารถกันน้ำได้นิยมนำไปใช้ในงานด้านอุปกรณ์การขนส่งยา โฟมยางในเครื่องใช้ประเภทรองเท้า ถุงมือ หมวก

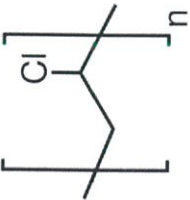
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของพอลิเมอร์ (ต่อ) [5]

พอลิเมอร์	สูตรโครงสร้าง	จุดหลอมเหลว (°C)	น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	ความหนาแน่น (g/ml)	การละลายในน้ำ	คุณสมบัติ
พอลิไวนิลิดีน ฟลูออไรด์ (Poly(vinylidene fluoride), PVDF) 	$(\text{CH}_2\text{CF}_2)_n$	177	64.035	1.74	ไม่ละลาย	พอลิไวนิลิดีน ฟลูออไรด์ หรือ PVDF เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบไปด้วยฟลูออรีนประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์คล้ายกับพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนมีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติทนต่ออุณหภูมิในช่วง -40 องศาเซลเซียสถึง 160 องศาเซลเซียส ด้านทางสารเคมีประเภทกรด เบส และสารละลายอินทรีย์ตลอดจนสารจำพวก คลอรีน
เอทิลเซลลูโลส (Ethyl cellulose) 	$\text{C}_{20}\text{H}_{38}\text{O}_{11}$	151	454.513	1.14	ไม่ละลาย	เอทิลเซลลูโลสเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสซึ่งกลุ่มไฮดรอกซิลที่แทนที่กลุ่มไฮดรอกซิลมีความแข็งที่ได้อุณหภูมิห้องด้านทางรังสียูวีได้ดีแต่ละลายได้ในสารละลายจำพวกเอมีน เช่น น้ำมัน จาระบี เป็นต้น นิยมนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ หรือในอุตสาหกรรมยา ป้องกันการซึมผ่านของน้ำ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของพอลิเมอร์ (ต่อ) [5]

พอลิเมอร์	สูตรโครงสร้าง	จุดหลอมเหลว (°C)	น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	ความหนาแน่น (g/ml)	การละลายในน้ำ	คุณสมบัติ
พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride ,PVC)	$(\text{CH}_2\text{CHCl})_n$ 	212	62.5	1.4	ไม่ละลาย	พอลิไวนิลคลอไรด์เป็นเทอร์โมพลาสติกที่สามารถใช้งานได้หลากหลายผลิตจากเอทิลีนและกรดไฮโดรคลอริกมีคุณสมบัติในการต้านทานสารเคมีจำพวกกรด เบส น้ำมันเบนซิน เคโรซีน แอลกอฮอล์ และไฮโดรคาร์บอนได้ดีนิยมนำมาใช้เป็นสารเคลือบป้องกันการกัดกร่อนของวัสดุจำพวก ท่อสารเคมี ท่อไฟฟ้า ลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ตัวทำละลาย

ตัวทำละลาย (Solvent) [4] การเลือกตัวทำละลายแต่ละชนิดมีอิทธิพลต่อความหนืด ความเร็วในการระเหย และการละลายของสารในแต่ละชนิด ซึ่งส่งผลต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในแต่ละวิธีการเคลือบไม่ว่าจะเป็นการ สเปร์ การทา หรือการฉาบ สามารถแบ่งประเภทของตัวทำละลายได้ ดังนี้

- อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic hydrocarbon) หรือพาราฟิน เช่น แนฟทา โดยทั่วไปจะใช้กับสารจำพวก ยางมะตอย น้ำมันและไวนิลพอลิเมอร์
- อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic hydrocarbon) เช่น โทลูอิน ไซลีน โดยทั่วไปจะใช้กับสารจำพวก ยางโครออริเนต โคลทาร์และอัลคิบบางชนิด
- คีโตน (Ketone) เช่น อะซิโตน เมทิลเอทิลคีโตน เมทิลไอโซบิวทิล หรือ เอมีลคีโตน ใช้กับสารจำพวก ไวนิล อีพอกซีบางชนิดและเรซิน
- เอสเทอร์ (Ester) เช่น เอสทิลอะซีเตท โพรพิลอะซีเตท บิวทิลอะซีเตท และ เอมีลอะซีเตท ใช้กับสารจำพวก อีพอกซีและพอลิยูรีเทน
- แอลกอฮอล์ (Alcohol) เช่น เมทิลแอลกอฮอล์ โพรพิลแอลกอฮอล์ ไอโซบิวทิลแอลกอฮอล์ และไซโคลเฮกซานอล เป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมกับสารที่มีขี้ผึ้ง
- เอสเทอร์ และ แอลกอฮอล์อีเทอร์ (Ester and alcohol ether) เช่น เอสทิวอีเทอร์ เหมาะสำหรับสารจำพวก เรซินธรรมชาติ น้ำมัน และไซเป็นอย่างมาก
- น้ำ (Water) สามารถทำละลายสารจำพวก โมดิฟายอัลคิควิ ออะคริลิกลาเท็กซ์ และ อะคริลิก อีพอกซีไฮบริด

2.3 สารยับยั้งการกัดกร่อน

สารยับยั้งการกัดกร่อน [6] คือสารที่ช่วยในการชะลอหรือช่วยลดกระบวนการเกิดการกัดกร่อนขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งให้ช้าลงซึ่งโดยรวมแล้วสามารถลดอัตราการเกิดการกัดกร่อนของระบบทั้งหมดได้ สารยับยั้งการกัดกร่อนโดยทั่วไปแล้วจะใสในอัตราส่วนที่ต่ำ ๆ ซึ่งการป้องกันการกัดกร่อนของสารชนิดนี้ก็มีกระบวนการที่หลากหลายบางชนิดการอาจเกิดการดูดซับเกิดเป็นชั้นฟิล์มบางหนาในระดับโมเลกุลป้องกันบริเวณพื้นผิวของวัสดุซึ่งสารยับยั้งการกัดกร่อนไม่เพียงแต่ช่วยในการชะลอการกัดกร่อนแต่ยังมีประโยชน์อีกหลายอย่างเช่น

- ช่วยยืดอายุการใช้งานของวัสดุ
- ป้องกันอุบัติเหตุจากการเปราะของวัสดุ
- ป้องกันการเกิดการปนเปื้อนของวัสดุ
- ป้องกันการรั่วไหลของความร้อน
- รักษาสภาพดั้งเดิมของวัสดุไว้

สารยับยั้งการกัดกร่อนโดยทั่วไปแล้วจะทำงานโดยการดูดซับกับพื้นผิวของโลหะซึ่งจะกระจายตัวอยู่ในสารละลายหรือสารเคลือบซึ่งการยับยั้งการกัดกร่อนของวัสดุให้เกิดการกัดกร่อนได้ช้าลงจะมีกระบวนการที่สำคัญอยู่ 3 กระบวนการคือ

1. เพิ่มพฤติกรรมการโพลาริเซชันของแอโนดิกหรือแคโทดิก (เพิ่มความชันของกราฟทาเฟล)
2. ลดการเคลื่อนที่หรือการแพร่ของไอออนเข้าสู่พื้นผิวของโลหะ
3. เพิ่มความต้านทานทางไฟฟ้าของพื้นผิวโลหะ

ประสิทธิภาพของสารยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibitor efficiency) สามารถวัดได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Inhibitor efficiency (\%)} = 100 \times \frac{CR_{\text{uninhibited}} - CR_{\text{inhibited}}}{CR_{\text{uninhibited}}} \quad (2.8)$$

โดยที่ $CR_{\text{uninhibited}}$ คือ อัตราการกัดกร่อนในระบบที่ไม่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน

$CR_{\text{inhibited}}$ คือ อัตราการกัดกร่อนในระบบที่มีสารยับยั้งการกัดกร่อน

2.3.1 ชนิดของสารยับยั้งการกัดกร่อน

สารยับยั้งการกัดกร่อนสามารถแบ่งประเภทออกได้เป็น 4 ประเภทคือ สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบแคโทดิก สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบแอโนดิก สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบผสม และสารยับยั้งการกัดกร่อนแบบสารระเหย

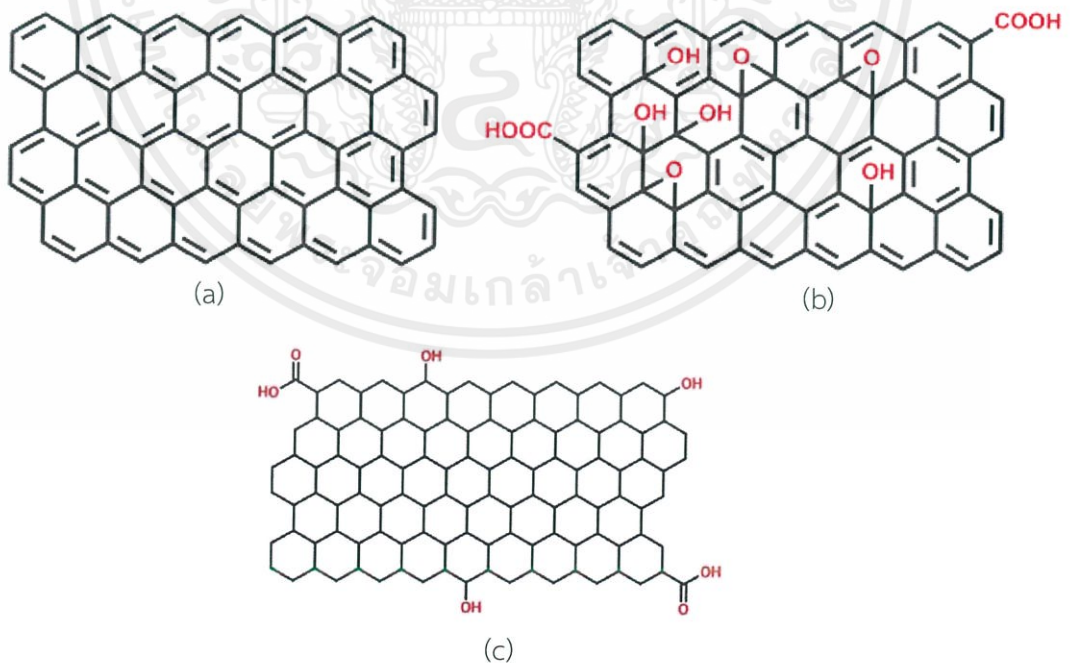
1. สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบแอโนดิก (Anodic inhibitor) โดยทั่วไปจะก่อดำอยู่ในรูปของชั้นฟิล์มออกไซด์บนพื้นผิวของโลหะก่อให้เกิดการเลื่อนของเส้นแอโนดิกของกราฟการกัดกร่อน ซึ่งบางครั้งเรียกสารประเภทนี้ว่า passivators เช่น โครเมต ไนเตรท ทังสเตน เป็นต้น

2. สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบแคโทดิก (Cathodic inhibitor) เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนที่ช่วยลดปฏิกิริยาฝั่งแคโทดิกทำหน้าที่ลดการเคลื่อนที่หรือการแพร่กระจายของสารบนพื้นผิวซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาแคโทดิกสามารถลดได้โดยการลดสารแคโทดิกซึ่งสารจำพวกนี้ทำให้เกิดการเพิ่มความไวของโลหะต่อการเกิดการแตกหักที่เกิดจากไฮโดรเจน (Hydrogen induced cracking)

3. สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบผสม (Mixed inhibitor) สารประเภทนี้มีกระบวนการทำงานโดยการลดการเกิดปฏิกิริยาทั้งฝั่งแอโนดิกและฝั่งแคโทดิก โดยทั่วไปแล้วสารจำพวกนี้จะอยู่ในรูปของสารประกอบซึ่งสารประกอบที่ใช้งานมากจะประกอบด้วย ซิลิเกตและฟอสเฟต เช่น โซเดียมซิลิเกต

4. สารยับยั้งการกัดกร่อนแบบสารระเหย (Volatile Corrosion Inhibitor ,VCI) เป็นสารประกอบที่ส่งผ่านในสภาพแวดล้อมปิดไปยังตำแหน่งของการกัดกร่อนโดยการระเหยจากแหล่งกำเนิด เช่น โมฟลิซินหรือไฮดราซีน ถูกส่งผ่านในรูปของไอเพื่อป้องกันการกัดกร่อนของท่อโดยการทำให้ค่า pH ที่เป็นกรดซึ่งทำให้เกิดการกัดกร่อนเปลี่ยนเป็นค่าที่เป็นกลางเพื่อลดอัตราการเกิดการกัดกร่อนลง

2.3.2 กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของกราฟีน (a) กราฟีนออกไซด์ (b) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (c) [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟีนออกไซด์ (GO) [8] เป็นฟังก์ชันของกราฟีนกับหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบซึ่งได้เป็นที่รู้จักกันแพร่หลายเมื่อไม่นานมานี้เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เหนือกว่าวัสดุอื่น ๆ เช่น มีพื้นที่ผิวมาก มีความทนทาน สามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้าและเชิงแสงได้ยิ่งไปกว่านั้นพื้นผิวที่ประกอบไปด้วยหมู่ของไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) อีพอกซี (Epoxy) และ คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ทำให้กราฟีนออกไซด์ได้รับความนิยมในการใช้ร่วมกับวัสดุอื่น ๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติต่าง ๆ ซึ่งกราฟีนออกไซด์สามารถนำไปใช้งานทางด้านกักเก็บพลังงาน (Energy storage) และการป้องกันทางด้านสิ่งแวดล้อมซึ่งประกอบไปด้วย วัสดุกักเก็บไฮโดรเจน ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalyst) สำหรับกระบวนการแยกโมเลกุลของน้ำ (Water Splitting) กำจัดมลพิษและการกรองน้ำรวมทั้งการทำชีวอิเล็กทรอนิกส์สำหรับแบตเตอรี่ลิเทียมและตัวกักเก็บประจุ

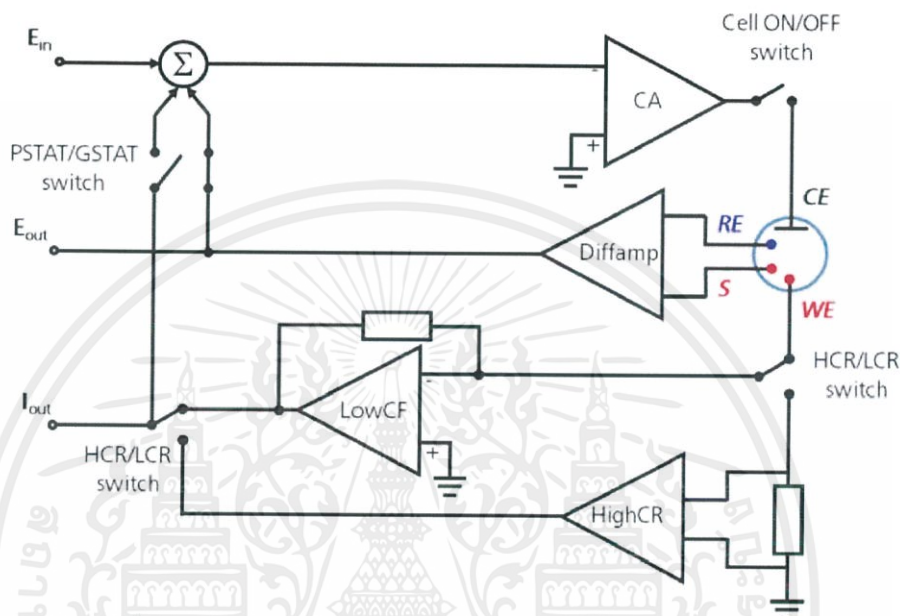
กราฟีนออกไซด์มีโครงสร้างเป็นคาร์บอนต่อกันเป็นรูป 6 เหลี่ยมมีไฮบริดเป็นแบบ sp^2 และจะจับกับหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบด้วยพันธะโคเวเลนต์เป็นไฮบริดแบบ sp^3 ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการออกซิไดซ์ทำให้เกิดการทำลายพันธะที่มีการไฮบริดแบบ sp^2 ของโครงสร้างดั้งเดิมของกราฟีนที่เป็นแบบรังผึ้ง (Honeycomb) สำหรับกลุ่มของการไฮบริดแบบ sp^3 จะมีรูปแบบของการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอแบบสุ่มทั่วทั้งพื้นผิวของกราฟีน

เนื่องจากกราฟีนออกไซด์เป็นโครงสร้างที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบอยู่หลากหลายทำให้กราฟีนออกไซด์มีคุณสมบัติในหลากหลายด้านเช่น การนำไฟฟ้าของกราฟีนออกไซด์ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีและการจัดเรียงอะตอมในโครงสร้าง แต่โดยทั่วไปแล้วกราฟีนออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นฉนวนทางไฟฟ้ามีค่าสภาพความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance, R_s) อยู่ประมาณ 10^{-12} โอห์มต่อตารางเมตรหรือสูงกว่าซึ่งความเป็นฉนวนนั้นขึ้นอยู่กับจำนวนของการไฮบริดแบบ sp^3 ระหว่างพันธะ C-O ทำให้ไม่พหุหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านต่อได้อย่างไรก็ตามการรีดิวซ์ของกราฟีนออกไซด์(การนำหมู่ที่มีออกซิเจนออกไป)โดยวิธีการทางเคมีหรือความร้อนช่วยในการทำให้พหุหะสามารถไหลผ่านได้ง่ายยิ่งขึ้นซึ่งเป็นการช่วยลดค่าสภาพความต้านทานเชิงแผ่น(R_s) ให้ลดต่ำลงได้ด้วยทำให้สามารถนำกราฟีนออกไซด์ที่ถูกรีดิวซ์ (rGO) สามารถนำไปใช้ทำเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำได้

2.4 การตรวจสอบการกัดกร่อน

2.4.1 หลักการทำงานของเครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า

การตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า[9]จะใช้เครื่องโพเทนทีโอสแตดในการตรวจวัดค่าต่าง ๆ ซึ่งมีหลักการในการตรวจวัดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2.3 แผนภาพอย่างง่ายของโพเทนทีโอสแตด/กัลวานอสแตด[9]

ในโพเทนทีโอสแตดโหมตจะควบคุมศักย์ไฟฟ้าของขั้วแคโทด (Counter electrode, CE) เทียบกับขั้วทำงาน (Working electrode, WE) ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วทำงานและขั้วอ้างอิง (Reference electrode) ได้มีการกำหนดไว้อย่างดีและสอดคล้องระหว่างค่าจำเพาะของผู้ใช้งาน สำหรับโหมตกัลป์วานอสแตด กระแสที่ไหลระหว่างขั้วทำงานและขั้วแคโทดจะถูกควบคุม ศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอ้างอิงและขั้วทำงานและการไหลของกระแสไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดและขั้วทำงานจะมีการตรวจสอบอย่างต่อเนื่อง ซึ่งขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดมีลักษณะการทำงานแตกต่างกันดังนี้

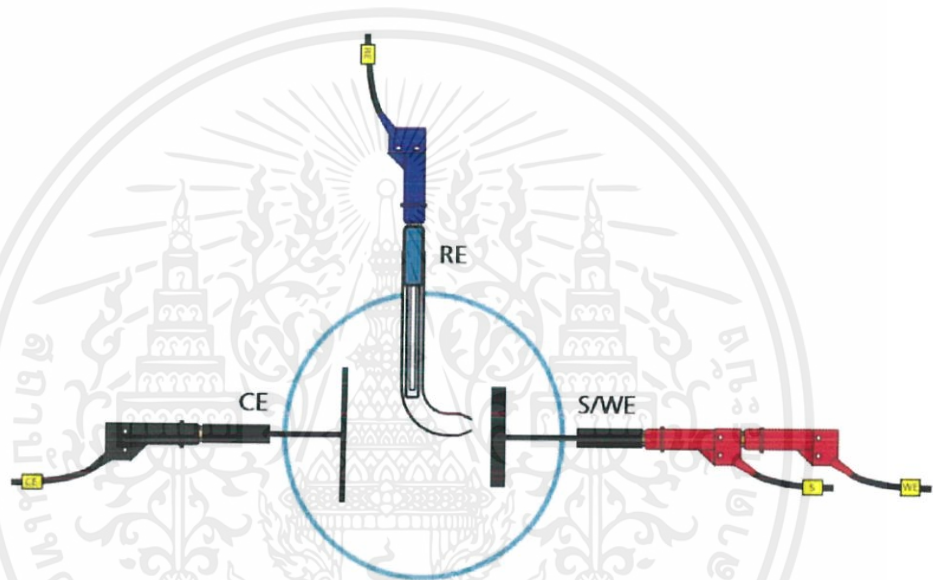
1. ขั้วแคโทด (Counter electrode) เป็นขั้วที่ถูกใช้เพื่อให้เกิดวงจรปิดในเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยทั่วไปจะทำจากวัสดุเฉื่อย เช่น แพลตตินัม ทองคำ กราไฟต์ คาร์บอน เป็นต้น และไม่ได้มีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีเพราะว่ากระแสไหลผ่านระหว่างขั้วทำงานและขั้วแคโทด พื้นที่ผิวรวมของขั้วแคโทดต้องสูงกว่าพื้นที่ผิวของขั้วทำงานดังนั้นจึงไม่ต้องการจำกัดปัจจัยในทางจลนศาสตร์ของกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีภายใต้การตรวจสอบ
2. ขั้วอ้างอิง (Reference electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ต้องมีความเสถียร และใช้ในการอ้างอิง สำหรับการควบคุมศักย์ไฟฟ้าและการวัดในเซลล์ทางไฟฟ้าเคมี ความเสถียรที่สูงของขั้วอ้างอิง อาจเกิดขึ้นได้โดยการใช้ระบบรีดอกซ์ที่มีความเข้มข้นคงที่ของสารตั้งต้นในปฏิกิริยารีดอกซ์ สำหรับการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วอ้างอิงจะถูกเก็บค่าไว้ให้ใกล้เคียงกับศูนย์ซึ่งทำได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ขั้วแคโทดปิดวงจรกระแสไฟฟ้าเข้าด้วยกันกับค่าอิมพีแดนซ์ที่ใส่เข้ามาในอิเล็กทรอนิกส์มิเตอร์

3. ขั้วทำงาน (Working electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าในระบบทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดปฏิกิริยาที่น่าสนใจขึ้น ขั้วทำงานโดยทั่วไปสร้างขึ้นจากวัสดุเฉื่อยเช่น ทองคำ เงิน แพลตทินัม คาร์บอนพรอท และ ฟิล์มอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น สำหรับการใช้งานในด้านการกัดกร่อน วัสดุที่อยู่ตรงขั้วทำงานจะอยู่ภายใต้การตรวจสอบ ขนาดและรูปร่างของขั้วทำงานมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน

สำหรับการวัดการกัดกร่อนโดยทั่วไปจะใช้วิธีการวัดแบบ 3 ขั้ว ซึ่งมีหลักการวัดดังนี้



ภาพที่ 2.4 แผนภาพของขั้วในการวัดแบบ 3 ขั้ว[9]

การวัดแบบ 3 ขั้วเป็นวิธีที่ใช้กันโดยทั่วไปในการวัดทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งในการวัดชนิดนี้ กระแสจะไหลระหว่าง ขั้วแคโทด และขั้วทำงาน ความแตกต่างของค่าศักย์จะถูกควบคุมระหว่างขั้วทำงานและขั้วแคโทดและถูกวัดระหว่างขั้วอ้างอิงและขั้วเซนส์ (Sense) เพราะว่า ขั้วทำงานได้ถูกเชื่อมต่อกับขั้วเซนส์และขั้วทำงานถูกรักษาไว้ในที่ที่มีความคงที่และมีเสถียรภาพโดยการควบคุมโพลาริเซชันของขั้วแคโทด ความแตกต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอ้างอิงและขั้วทำงานจะถูกควบคุมตลอดเวลา ค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วทำงานและขั้วแคโทดโดยทั่วไปแล้วจะไม่ถูกวัด สำหรับแรงดันไฟฟ้าจะใช้แอมพลิฟายเออร์ในการควบคุมและถูกจำกัดด้วยแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐานของเครื่องมือ มีการปรับความแตกต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วทำงานและขั้วอ้างอิงจะมีค่าความแตกต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากันซึ่งถูกกำหนดโดยผู้ใช้งาน การกำหนดค่านี้จะช่วยให้มีค่าของศักย์ไฟฟ้าผ่านชั้นอินเทอร์เฟซที่ขั้วทำงานจะถูกควบคุมด้วยขั้วอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

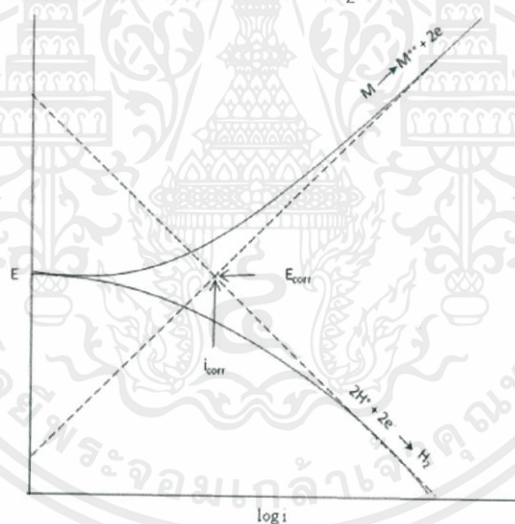
2.4.2 การตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า

2.4.2.1 การตรวจวัดแบบทาเฟล

วิธีการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าโดยทั่วไปมีอยู่ 2 วิธี [10] คือ ทาเฟลเอกตราโพลีชัน (Tafel extrapolation) และการต้านทานโพลาไรเซชัน (Polarization resistance) วิธีโพลาไรเซชันเป็นวิธีที่รวดเร็วกว่าที่ใช้ในการวัดเมื่อเทียบกับการวัดโดยการประมาณน้ำหนักที่หายไปแบบดั้งเดิม สำหรับปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าภายใต้การควบคุม ส่วนโค้งโพลาไรเซชันแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่าศักย์ของการเกิดการกัดกร่อน (E_{corr}) และลอการิทึมของกระแสหรือความหนาแน่นกระแส (i_{corr}) ซึ่งเรียกว่า พฤติกรรมแบบทาเฟล (Tafel behavior)

ตัวอย่างพฤติกรรมโพลาไรเซชันของโลหะในสารละลายกรด

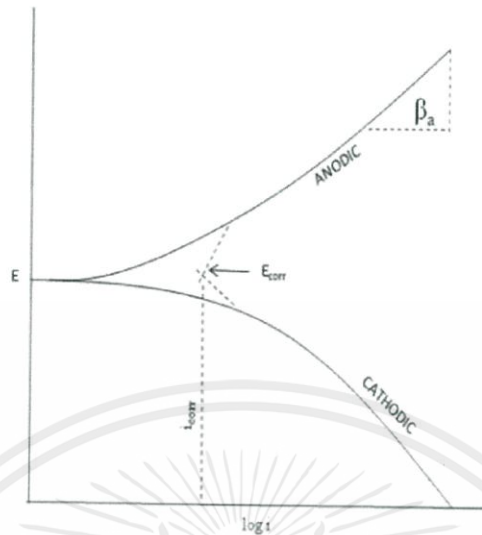
กำหนดค่าของ E_{corr} และ i_{corr} จากการประมาณเชิงเส้นจากเส้นโค้ง แอโนดิกและแคโทดิก ซึ่งแสดงในรูป 2.5



ภาพที่ 2.5 พฤติกรรมการเกิดโพลาไรเซชันของโลหะ M ในสารละลายกรด[10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า E_{corr} และ I_{corr} สามารถกำหนดได้โดยตรงจากจุดตัดในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.6 การประมาณหาค่าคงที่แบบทาเฟล[10]

จากภาพที่ 2.6 ที่ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดการกัดกร่อน (E_{corr}) อัตราการลดลงแบบแคโทดิก (Cathodic reduction) จะเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบแอโนดิก (Anodic reaction) หรือการกัดกร่อนของโลหะ (Metal corrosion) และค่าคงที่ของทาเฟล (β_a และ β_c) สามารถคำนวณได้จากค่าความชันของเส้นแอโนดิกและแคโทดิก

2.4.2.2 การตรวจวัดความต้านทานทางไฟฟ้าเคมี

การตรวจวัดความต้านทานทางไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) [11] เป็นเทคนิคที่ไม่คงที่ขึ้นอยู่กับความเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาตามปรากฏการณ์ต่าง ๆ ตามระยะเวลาการผ่อนคลาย (Relaxation time) ที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งเป็นการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่ขึ้นกับเวลา ($I(t)$) ของพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรดเป็นสัญญาณศักย์ไฟฟ้าสลับในรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal alternating potential signal, $V(t)$) เป็นความถี่เชิงมุม (ω) ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทาน ($Z(\omega)$) ดังนี้

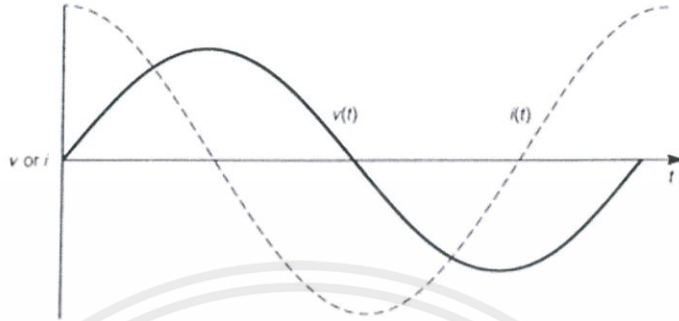
$$Z(\omega) = V(t)/I(t) \quad t \text{ คือ เวลา} \quad (2.9)$$

$$V(t) = V_0 \sin \omega t \quad (2.10)$$

$$I(t) = I_0 \sin (\omega t + \theta) \quad \theta \text{ คือมุมเฟสระหว่าง } V(t) \text{ และ } I(t) \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการต่าง ๆ ที่พื้นผิวจะดูดซับพลังงานไฟฟ้าในเวลาที่ต่อเนื่องทำให้เกิดความล่าช้าของเวลาและมุมเฟสที่สามารถวัดได้ระหว่างสัญญาณกระตุ้นและสัญญาณตอบสนองที่ขึ้นกับเวลาดังตัวอย่างภาพที่ 2.7

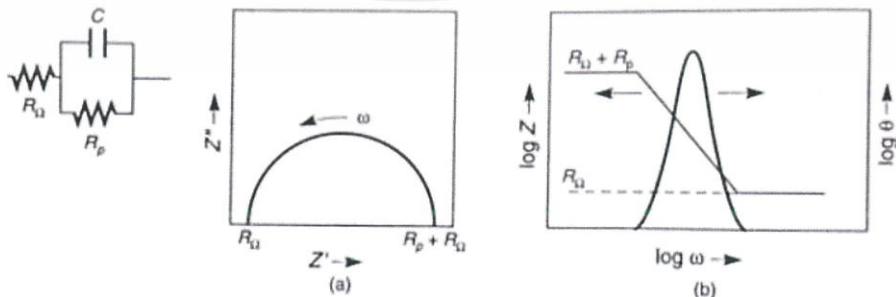


ภาพที่ 2.7 การตอบสนองของกระแสไฟฟ้า(I) ต่อสัญญาณศักย์ไฟฟ้าสลับใน รูปคลื่นไซน์(V) สำหรับตัวเก็บประจุ[11]

ค่าอิมพีแดนซ์ $Z(\omega)$ สามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบของจำนวนจริง $Z'(\omega)$ และ อยู่ในจำนวนจินตภาพ $Z''(\omega)$ ได้ดังนี้

$$Z(\omega) = Z'(\omega) + Z''(\omega) \tag{2.12}$$

พฤติกรรมอิมพีแดนซ์ของขั้วอิเล็กโทรดสามารถแสดงได้ในรูปของ Nyquist plot ของ $Z''(\omega)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับ $Z'(\omega)$ หรือในรูปของ $\log |Z|$ และ $\log \theta$ กับ ความถี่ (f) ในหน่วยรอบต่อวินาที (เฮิรตซ์) โดยที่ $\omega = 2\pi f$ สามารถวาดกราฟอย่างง่ายของวงจรที่มีตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ต่อกันแบบขนาน ดังภาพที่ 2.8 ซึ่งวงจรนี้เป็นวงจรอย่างง่ายที่สามารถใช้อธิบายการกัดกร่อนอย่างง่ายบนพื้นผิว

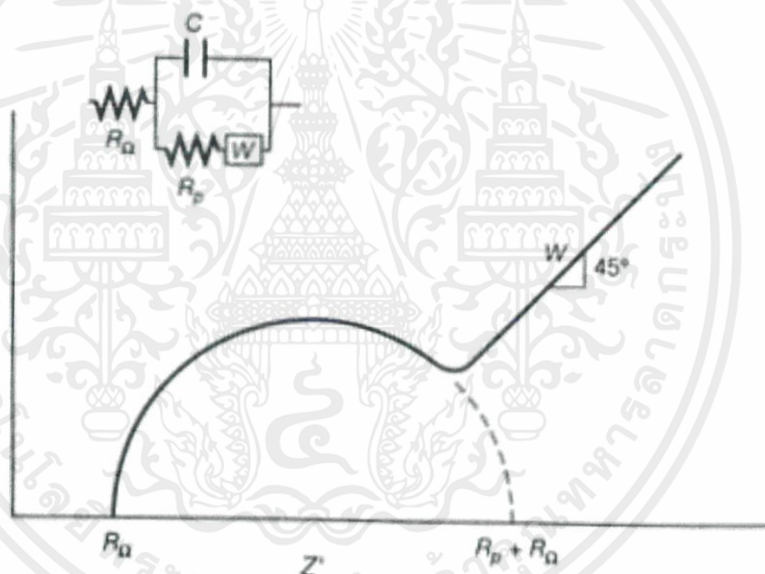


ภาพที่ 2.8 ข้อมูลที่ได้จาก Electrochemical impedance spectroscopy สำหรับการกัดกร่อนบริเวณขั้วของอิเล็กโทรดโดยการต่อตัวต้านทาน(R_p)และตัวเก็บประจุ(C) แบบขนานซึ่ง (a) : Nyquist plot และ (b) : Bode plot [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 2.8 กราฟ a เป็นกราฟ Nyquist แสดงกราฟรูปครึ่งวงกลมเมื่อเพิ่มความถี่ในทิศทางเพิ่มขึ้นและที่ความถี่สูงองค์ประกอบจินตภาพ (Z'') จะหายไปเหลือเพียงค่าความต้านทานของสารละลาย (R_{Ω}) เท่านั้นและที่ความถี่ต่ำมาก ๆ จะเหลือเพียงผลรวมของค่าความต้านทานของสารละลาย (R_{Ω}) และความต้านทานของปฏิกิริยาฟาราดีก (faradaic reaction resistance) หรือโพลาริเซชัน (R_p) ส่วนกราฟ b หรือ bode plot จะให้ผลที่คล้ายกับกราฟ Nyquist ที่ความถี่ปานกลางกราฟความถี่เชิงเส้นจะมีค่าความชันเท่ากับ -1 และมีมุมเฟสสูงสุดซึ่งความต้านทานของปฏิกิริยาฟาราดีก (faradaic reaction resistance) หรือโพลาริเซชัน (R_p) เป็นสัดส่วนที่แปรผกผันกับค่าอัตราการกัดกร่อน

กรณีที่มีการควบคุมโดยการแพร่ในสารอิเล็กโทรไลต์หรือในพื้นที่ผิวของชั้นฟิล์มหรือการเคลือบ องค์ประกอบเพิ่มเติมที่เพิ่มเข้ามาจะเรียกว่า วอร์เบิร์กอิมพีแดนซ์ (Warburg impedance (W)) จะถูกเพิ่มเข้าไปในวงจร ค่าของวอร์เบิร์กอิมพีแดนซ์จะปรากฏที่ความถี่ต่ำบนกราฟ Nyquist โดยเส้นตรงชันที่ 45° ทั้ง 2 แขนดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 กราฟ Nyquist ที่แสดงผลของการควบคุมการแพร่บางส่วนกับวอร์เบิร์กอิมพีแดนซ์ (Warburg impedance (W))[11]

ชนิดของวงจรสมมูลในการจำลองการตรวจวัดทางเคมี

การจำลองวงจรสมมูลทางไฟฟ้า [12] เพื่ออธิบายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการกัดกร่อนสามารถทำให้ตีความได้ง่ายมากยิ่งขึ้นสำหรับสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าแต่ละตัวสามารถอธิบายได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความต้านทานของอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte resistance)

ความต้านทานการไหลของอิเล็กโทรไลต์บ่อยครั้งที่เป็นปัจจัยสำคัญในเซลล์ทางไฟฟ้าเคมีแต่เครื่องวัดทางไฟฟ้าเคมีแบบ 3 เซลล์ที่ทันสมัยจะช่วยชดเชยความต้านทานของสารละลายระหว่างขั้วเคาน์เตอร์ (Counter electrode) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) อย่างไรก็ตาม ทุก ๆ ความต้านทานของสารละลายระหว่างขั้วอ้างอิงและขั้วทำงาน (Working electrode) จะถูกพิจารณาเมื่อทำการจำลองโมเดลขึ้นมา

ความต้านทานของสารละลายที่มีไอออนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออน, ชนิดของไอออน, อุณหภูมิ และลักษณะทางคณิตศาสตร์ของพื้นที่ที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ในพื้นที่จำกัด A คือ พื้นที่ l คือความยาว การเคลื่อนที่ของกระแสและความต้านทานสามารถหาได้ดังนี้

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.13)$$

ρ คือ ความต้านทานของสารละลาย ส่วนกลับของ ρ โดยทั่วไปจะใช้ตัว K หรือเรียกกันโดยทั่วไปว่า ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานของสารละลายดังนี้

$$R = \frac{l}{\kappa A} \rightarrow \kappa = \frac{l}{RA} \quad (2.14)$$

สามารถคำนวณค่า K จากค่าการนำไฟฟ้าของไอออนจำเพาะ หน่วยของ K คือ ซีเมนต่อเมตร (S/m) ซึ่งซีเมนเป็นส่วนกลับของโอห์ม ($S = 1/\text{ohm}$)

โดยส่วนใหญ่เซลล์ทางไฟฟ้าเคมีจะไม่ค่อยมีความคงตัวของค่ากระแสเมื่อเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ที่มีสารอิเล็กโทรไลต์และปัญหาหลักในการคำนวณค่าความต้านทานของสารละลายจึงเกี่ยวข้องกับ การกำหนดทิศทางการไหลของกระแสและรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของอิเล็กโทรไลต์ที่มีกระแสไฟฟ้า การอธิบายที่ครอบคลุมถึงวิธีการคำนวณความต้านทานที่แท้จริงจากการนำกระแสของไอออนนั้น สามารถทำได้ยากในด้วยวิธีวัดประเภทนี้

2. ตัวเก็บประจุแบบ 2 ชั้น (Double layer capacitance)

มีชั้นกระแสไฟฟ้าแบบ 2 ชั้นอยู่ที่บริเวณส่วนต่อประสานระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์โดยรอบ ตัวเก็บประจุแบบ 2 ชั้นถูกสร้างขึ้นคล้ายกับไอออนจากสารละลายและดูดซับลงบนพื้นผิวอิเล็กโทรด อิเล็กโทรดที่มีประจุจะถูกแยกออกจากไอออนที่มีประจุด้วยพื้นที่ฉนวนซึ่งความหนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของชั้นฉนวนมักจะอยู่ในระดับอังสตรอม ประจุที่แยกออกจากกันโดยฉนวนจะเป็นตัวเก็บประจุ ดังนั้นโลหะเปลือยที่จุ่มลงในสารอิเล็กโทรไลต์จะมีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุ ซึ่งสามารถประมาณค่าของความจุได้ตั้งแต่ 20 – 60 ไมโครฟารัดในทุก ๆ 1 ตารางเซนติเมตรของพื้นที่อิเล็กโทรดแม้ว่าค่าของตัวเก็บประจุแบบ 2 ชั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายหลายอย่างไม่ว่าจะเป็น ศักย์ไฟฟ้า อุณหภูมิ ความเข้มข้นของไอออน ชนิดของไอออน ชั้นออกไซด์ ความขรุขระของขั้วอิเล็กโทรด การดูดซับสิ่งเจือปน เป็นปัจจัยทั้งหมด

3. ตัวต้านทานโพลาไรซ์ (Polarization resistance)

เมื่อไรก็ตามที่ค่าศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดถูกบังคับให้อยู่ห่างจากค่าของวงจรถัดที่เรียกว่า “โพลาไรซ์” เมื่ออิเล็กโทรดเป็นโพลาไรซ์ก็สามารถทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นพื้นผิวของอิเล็กโทรด ปริมาณของกระแสถูกควบคุมโดยจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาและการแพร่ของตัวทำปฏิกิริยาทั้งไปและกลับจากอิเล็กโทรด และในเซลล์ที่อิเล็กโทรดผ่านการกักต้อนแบบสม่ำเสมอที่วงจรถัด ศักย์ไฟฟ้าของวงจรถัดจะถูกควบคุมโดยความสมดุลระหว่างความแตกต่างของ 2 ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี หนึ่งในปฏิกิริยาที่สร้างกระแสแคโทด และปฏิกิริยาอื่น ๆ จะสร้างกระแสแอโนด ศักย์ไฟฟ้าของวงจรถัดจะปรับสมดุลที่ศักย์ไฟฟ้าที่กระแสแคโทดและกระแสแอโนดเท่ากันซึ่งจะถูกเรียกว่าศักย์ไฟฟ้าผสม (Mixed potential) และถ้าอิเล็กโทรดเกิดการกักต้อนอย่างรวดเร็ว ค่าของกระแสไฟฟ้าสำหรับปฏิกิริยาใด ๆ จะเรียกว่ากระแสกักต้อน

เมื่อมี 2 ปฏิกิริยาที่ควบคุมด้วยจลนศาสตร์เกิดขึ้น ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีความสัมพันธ์กับค่ากระแสแสดงปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$I = I_{\text{corr}} \left(e^{\frac{2.303(E-E_{\text{oc}})}{\beta_a}} - e^{\frac{2.303(E-E_{\text{oc}})}{\beta_c}} \right) \quad (2.15)$$

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้หน่วย แอมแปร์

I_{corr} คือกระแสกักต้อนหน่วย แอมแปร์

E_{oc} คือศักย์ไฟฟ้าในวงจรถัดหน่วย โวลต์

β_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์ฝั่งแอโนดหน่วย โวลต์/ดิเคด

β_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์ฝั่งแคโทดหน่วย โวลต์/ดิเคด

ถ้าทำการให้สัญญาณขนาดเล็กลงไปจะสามารถประมาณสมการได้ดังนี้

$$I_{\text{corr}} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \times \left(\frac{1}{R_p}\right) \quad (2.16)$$

โดยที่ R_p คือค่าความต้านทานการโพลารไรต์ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทาน

4. ค่าความต้านทานการส่งผ่าน (Charge transfer resistance)

เป็นความต้านทานที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่ถูกควบคุมโดยจลนศาสตร์ ในกรณีนี้จะไม่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน แต่จะเป็นปฏิกิริยาเดียวที่สมดุล

พิจารณาพื้นผิวของโลหะที่สัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ โลหะจะถูกละลายในอิเล็กโทรไลต์ตามสมการดังนี้



หรือโดยทั่วไป



ในปฏิกิริยาไปข้างหน้าสำหรับสมการแรก อิเล็กตรอนเข้าไปยังโลหะและไอออนของโลหะแพร่ออกมาถึงอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยนประจุ ซึ่งปฏิกิริยาการถ่ายโอนประจุนี้มีความเร็วที่แน่นอน ซึ่งความเร็วจะขึ้นอยู่กับชนิดของปฏิกิริยา อุณหภูมิ ความเข้มข้นของปฏิกิริยาสุดท้าย และศักย์ไฟฟ้า

4. การแพร่ (Diffusion)

การแพร่สามารถสร้างความต้านทานที่เรียกว่า วอร์เบิร์ก อิมพีแดนซ์ (Warburg impedance) ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของการรบกวนศักย์ไฟฟ้า ณ ที่ความถี่สูงค่าของวอร์เบิร์กอิมพีแดนซ์จะมีขนาดเล็กเนื่องจากสารตั้งต้นของปฏิกิริยาไม่จำเป็นต้องเคลื่อนไหวไกล และที่ความถี่ต่ำสารตั้งต้นจะกระจายห่างออกไปทำให้ค่าของวอร์เบิร์กอิมพีแดนซ์ เพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการของวอร์เบอร์กอิมพีแดนซ์ไม่จำกัดสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Z_w = \sigma(\omega)^{-1/2} (1 - j) \quad (2.19)$$

ใน โนควิส พล็อต วอร์เบอร์กอิมพีแดนซ์ ปรากฏเป็นเส้นทแยงมุมที่มีความลาดเอียง 45 องศา และใน โบเต้ พล็อต วอร์เบอร์กอิมพีแดนซ์จะเปลี่ยนเฟสเป็น 45 องศา

5. ตัวเก็บประจุการเคลือบ (Coating capacitance)

ตัวเก็บประจุจะเกิดขึ้นเมื่อนำขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วถูกแยกโดยตัวกลางที่ไม่นำไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า ไดอิเล็กทริก (Dielectric) ค่าของความจุขึ้นอยู่กับขนาดของขั้วไฟฟ้า ระยะทางระหว่างขั้วไฟฟ้า และคุณสมบัติของไดอิเล็กทริกซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (2.20)$$

เมื่อ ϵ_0 คือค่าเปอร์มิตติวิตีของพื้นที่ว่าง

ϵ_r คือค่าคงที่ของไดอิเล็กทริก

A คือพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า

d คือระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว

6. องค์ประกอบของเฟสคงที่ (Constant phase element)

ตัวเก็บประจุในการทดลองของ EIS โดยส่วนใหญ่จะไม่ทำงานอย่างเป็นอุดมคติแต่จะทำหน้าที่เหมือนองค์ประกอบของเฟสคงที่ตามที่กำหนดไว้ดังสมการด้านล่าง

ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุสามารถบ่งบอกได้ดังนี้

$$Z_{CPE} = \frac{1}{(j\omega)^\alpha Y_0} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ Y_0 คือ ค่าความจุ (C)

α คือ เลขชี้กำลัง (จะเท่ากับ 1 ในกรณีของตัวเก็บประจุ)

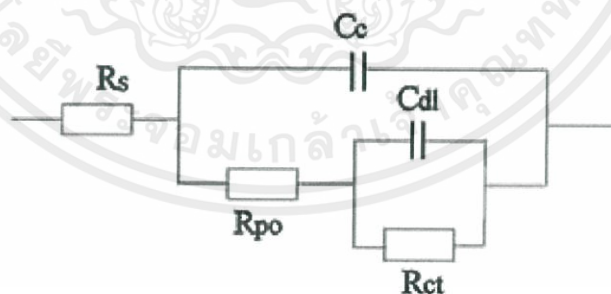
สำหรับองค์ประกอบของเฟสคงที่ เลขชี้กำลัง α ที่น้อยกว่า 1 จะเรียกว่า ตัวเก็บประจุแบบ 2 ชั้น (Double layer capacitor) ซึ่งในเซลล์จริงมักจะทำงานเช่นเดียวกับองค์ประกอบของเฟสคงที่

7. ตัวเหนี่ยวนำเสมือน (Virtual inductor)

ค่าอิมพีแดนซ์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีบางครั้งจะปรากฏเป็นตัวเหนี่ยวนำ บางงานก็ได้สันนิษฐานว่าเป็นพฤติกรรมการก่อดั้วของชั้นพื้นผิว คล้ายกับชั้นพาสซีฟหรือบางงานอาจอ้างว่าเป็นความผิดพลาดจากการวัด

พฤติกรรมของค่าอิมพีแดนซ์ของการเคลือบแบบมีความจุเข้ามาเกี่ยวข้องจะเสื่อมสภาพตามกาลเวลาและทำให้เกิดพฤติกรรมที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้น และหลังจากผ่านไปในระยะเวลาหนึ่งน้ำจะทำการแทรกซึมเข้าไปภายใต้ชั้นเคลือบและจะสร้างชั้นใหญ่ขึ้นมาคือ ชั้นของเหลว/โลหะ ภายใต้ชั้นเคลือบ ปรากฏการณ์การก่อดั้วสามารถเกิดขึ้นได้ใหม่ภายในชั้นนี้

ค่าความจุของการเคลือบจะแสดงในรูปของ C_c ซึ่งค่าของความจุการเคลือบจะน้อยกว่าค่าความจุแบบ 2 ชั้น R_{po} หรือตัวต้านทานแบบรูพรุน เป็นความต้านทานของการไอออนที่นำไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นในการเคลือบ ซึ่งรูที่สร้างขึ้นนี้สันนิษฐานว่าเกิดจากการที่ชั้นฟิล์มเกิดการแยกตัวและเกิดรอยแยกซึ่งรอยแยกนั้นเต็มไปด้วยสารอิเล็กโทรไลต์ที่เกิดการก่อดั้วขึ้น ซึ่งอิเล็กโทรไลต์ที่เกิดขึ้นนี้อาจมีความแตกต่างกับสารอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่ภายนอกและส่วนต่อประสานระหว่างสารละลายนี้กับโลหะเปลือยถูกจำลองเป็นตัวเก็บประจุแบบ 2 ชั้นขนานกับปฏิกิริยาการถ่ายโอนประจุแบบควบคุมทางจลนศาสตร์



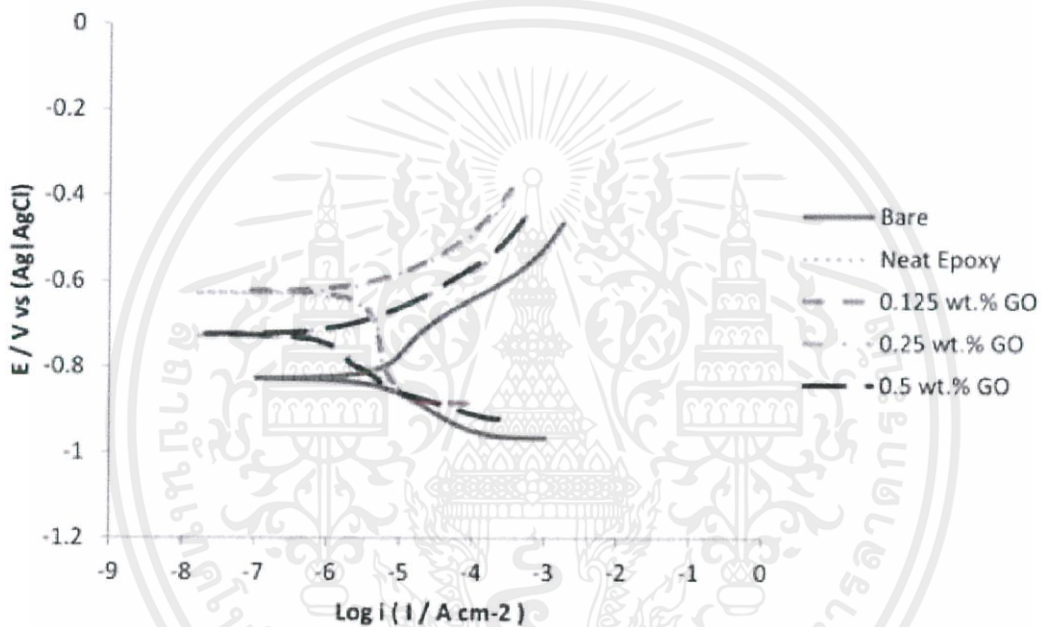
ภาพที่ 2.10 วงจรสมมูลในการเคลือบโลหะ [12]

เมื่อใช้การตรวจวัดค่าอิมพีแดนซ์ในการทดสอบการเคลือบ สามารถจำลองวงจรสมมูลได้จากข้อมูลเพื่ออธิบายการเกิดของปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

M. Rajabi และคณะ(2014) [13] ได้นำกราฟีนออกไซด์แบบชั้นเดียว (single layered graphene oxide) ที่อัตราส่วนที่อัตราส่วน 0.125, 0.25 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์ มาผสมกับอีพ็อกซีเรซิน จากนั้นทำการผสมเมทิลไพรอลิโดนเข้าไปเพื่อช่วยในการลดความหนืดจากนั้นนำไปเคลือบบนเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) จากนั้นนำไปวัดการกัดกร่อนด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์ด้วยการแช่ทิ้งไว้ในเวลาที่ต่างกันซึ่งกราฟทาเพลของการวัดการกัดกร่อนในการแช่ตัวอย่างลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในวันที่ 10 ได้ผลดังรูปที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 กราฟทาเพลที่ได้จากการวัดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนที่เคลือบด้วยอีพ็อกซีเรซินผสมกราฟีนออกไซด์และแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 10 วัน[13]

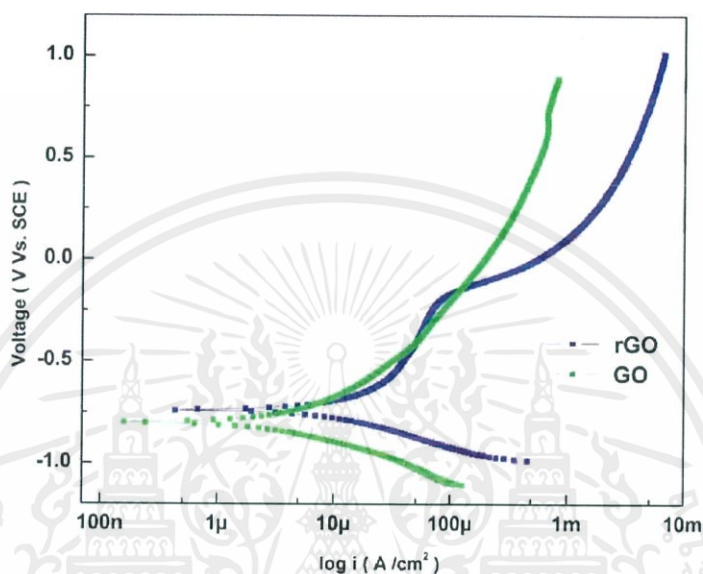
ตารางที่ 2.2 ค่ากระแสการกัดกร่อน การต้านทานโพลาไรซ์ และการกัดกร่อนต่อปีของสารเคลือบในแต่ละเงื่อนไข[13]

Samples	$i_{cor}/\mu A\ cm^{-2}$	$R_p/k\Omega\ cm^2$	Corrosion rate/mm/year
Bare metal	0.9935	0.4154	1.167×10^{-2}
Neat epoxy	0.501	0.7565	5.884×10^{-3}
0.125 wt-%GO	0.5342	0.7525	6.274×10^{-3}
0.25 wt-%GO	0.2015	1.669	2.366×10^{-3}
0.5 wt-%GO	0.262	1.583	3.078×10^{-3}

จากผลการทดลองพบว่าอีพ็อกซีเรซินที่ผสมกราฟีนออกไซด์แบบชั้นเดียวลงไป 0.25 เปอร์เซ็นต์สามารถลดค่ากระแสการกัดกร่อนได้มากที่สุดซึ่งช่วยลดค่าของการกัดกร่อนของเนื้อสารต่อปีให้น้อยลงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Faizan Ali Ghauri และคณะ (2017) [14] ได้นำกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ปริมาณอย่างละ 1 เปอร์เซ็นต์มาผสมกับอะซิโตนจากนั้นนำไปผสมกับอีพ็อกซีเรซินและนำไปเพิ่มการกระจายตัวของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในอีพ็อกซีเรซินด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (Ball milling) และนำมาผสมกับพอลิเอไมด์(สารเพิ่มความแข็ง)จากนั้นนำไปเคลือบบนเหล็กกล้าแล้วนำไปวัดการกัดกร่อนด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์ได้ผลดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 กราฟพลาเฟลของการจากการวัดการกัดกร่อนของเหล็กกล้าที่เคลือบด้วยอีพ็อกซีเรซินผสมกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์ออกไซด์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1 วัน [14]

ตารางที่ 2.3 ค่าที่ได้จากการคำนวณจากกราฟพลาเฟล [14]

Sample	β_a (mV/decade)	β_c (mV/decade)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	E_{corr} (mV)	Corrosion rate (mpy)
rGO (24 h)	1.23	349.87	28.60	-739	13.16
GO (24 h)	0.35	219.42	4.86	-800	2.23

จากผลการทดลองสรุปได้ว่ากราฟีนออกไซด์สามารถยับยั้งการกัดกร่อนได้เป็นระยะเวลา ยาวนานกว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ซึ่งดูได้จากค่าของกระแสที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนซึ่งกระแสการกัดกร่อนที่ต่ำส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนที่ต่ำลงด้วย

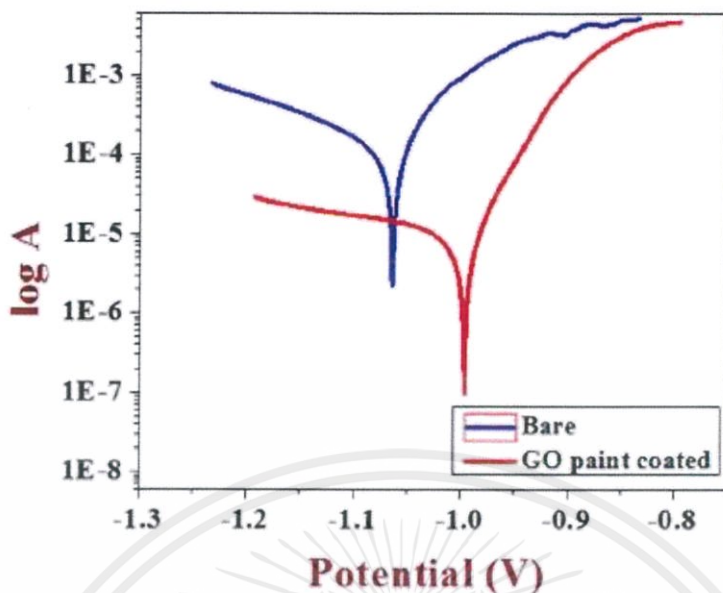
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Karthikeyan Krishnamorrthy และคณะ (2014) [15] ได้นำกราฟีนออกไซด์ผสมกับ อัลติดีเรซินโดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (Ball milling) และทำการผสมสารเติมแต่งดังตารางที่ 2.4 และนำไปเคลือบลงบนเหล็กชุบกับวาทไนซ์แล้วนำไปวัดการกัดกร่อนด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้าใน สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2.4 สารเติมแต่งที่ผสมลงไปในอัลติดีเรซิน [15]

Additive	Material	Purpose	Weight percentage (%)
Pigment	GO sheets	Providing the color of the paint	16.0
Binder	Linseed alkyd resin	Film-forming component of paint	64.0
Stabilizer	Nanosized ZnO	Reducing the color fading effect of the paint	0.6
Anti-settling agent	Aluminum stearate	Preventing pigment and binder settling	0.5
Thickener	Thickener A	Improving the viscosity and preventing coagulation	0.1
Wetting agent	Soya lecithin	Wetting the pigment in the binder for uniform dispersion	0.6
Inner coat drier	Nanosized zirconia	Chemical cross-linking agent of unsaturated fatty acids	0.6
Outer coat drier	Cobalt napthenate	Active catalyst for the lipid autoxidation process	0.6
Thinner(solvent)	Mineral turpentine oil	Dispersing agent	17.0

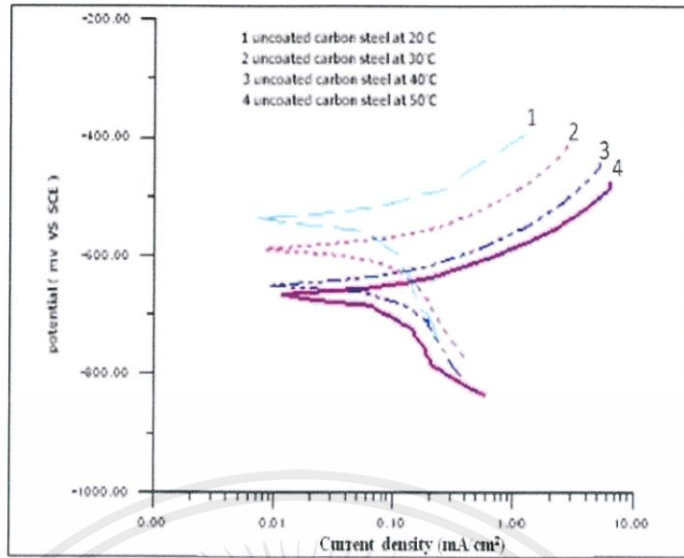
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



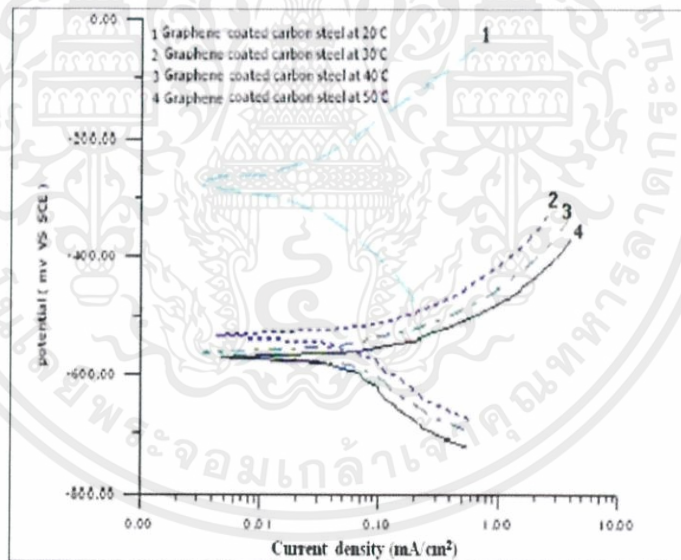
ภาพที่ 2.13 กราฟทาเฟลที่ได้จากการวัดการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์[15]

จากผลการทดลองสังเกตได้ว่ากราฟทาเฟลของเหล็กชุบกล้าไนซ์ที่เคลือบด้วยอัลทิดเรซินผสมสารเติมแต่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่เพิ่มสูงขึ้นและมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนลดลงซึ่งสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้มากกว่าเหล็กชุบกล้าไนซ์ไม่มีการเคลือบได้ถึง 76.61 เปอร์เซ็นต์

Abdulkareem Mohammed Ali Al-Sammaraie และคณะ (2016) [16] ได้นำกราฟีนออกไซด์ 0.5 กรัมมาผสมในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วทำการเคลือบด้วยวิธีการทางไฟฟ้ากระแสตรงลงบนเหล็กกล้าทำให้หมู่ฟังก์ชันบางหมู่ของกราฟีนออกไซด์เกิดสลายตัวไปกลายเป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จากนั้นนำไปวัดการกัดกร่อนด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดทางเคมีไฟฟ้าของเหล็กกล้าที่เคลือบและไม่เคลือบโดยทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการวัดที่ต่างกันในช่วง 20 ถึง 50 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2.14 กราฟพาเฟลของเหล็กกล้าที่ไม่มีการเคลือบที่อุณหภูมิ 20, 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส [16]



ภาพที่ 2.15 กราฟพาเฟลของเหล็กกล้าที่มีการเคลือบด้วยรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 20, 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ผลที่ได้จากการวัดการกัดกร่อนโหนดวิธีการทางเคมีไฟฟ้าของเหล็กกล้าไม่เคลือบและเคลือบด้วยวิธีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ [16]

System		T ^o C	E _{corr} mV	I _{corr} μA/cm ²	B _a mV/Dec	B _c mV/DE C	R _p Ω.cm ²	CR g/m ² d	CP mm/y	PE%	E _a KJ/mol
3.5%NaCl	Uncoated CS	20	535.7	58.93	84	260.9	468	14.7	0.6840	-	8.48
		30	-590	65.96	77.4	160.3	343	16.5	0.728		
		40	-650.2	79.93	78.9	166.2	290	20	0.928		
		50	-665.5	89.2	74.8	285.5	288	22.3	1.04		
	rGO CoatedCS	20	-280	10.92	105.9	105.6	2102	2.73	0.127	81.5	14.78
		30	-533.9	15.73	68.6	156.8	1317	3.93	0.183	76.2	
		40	-560.4	19.8	68.2	142.1	1010	11.8	0.55	75.2	
		50	-570.4	23.7	56.9	183.4	795.6	12.3	0.571	73.4	

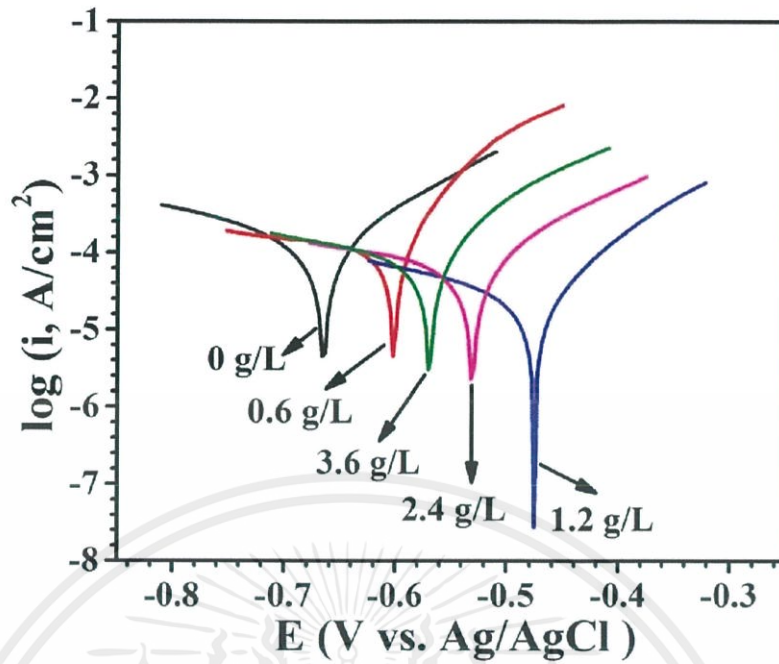
จากผลการทดลองสรุปได้ว่าวิธีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สามารถป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กกล้าได้ในทุกช่วงอุณหภูมิและสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุดในช่วงอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยภาพรวมแล้ววิธีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนในทุกช่วงอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 73 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์

Yuhui Xie และคณะ (2017) [17] ได้นำกราฟีนออกไซด์ไปทำการผสมในอ่างฟอสเฟตในกระบวนการทำการเคลือบด้วยวิธีการฟอสเฟตซึ่งอ่างฟอสเฟตมีองค์ประกอบตามตารางที่ 2.6 โดยจะทำการผสมกราฟีนออกไซด์ปริมาณ 0, 0.6, 1.2, 2.4 และ 3.6 กรัมต่อลิตรลงไปจากนั้นนำเหล็กมาทำการเคลือบในอ่างฟอสเฟตที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที และนำเหล็กที่ทำการเคลือบไปวัดการกัดกร่อนด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์ได้ผลตามรูปที่ 2.16

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบของสารในอ่างฟอสเฟตและเงื่อนไขที่ใช้ในการเคลือบเหล็ก [32]

Chemical composition	Concentration	Operating conditions	
Zn(H ₂ PO ₄) ₂	55 g/L	Temperature	40 °C
Zn(NO ₃) ₂	60 g/L	Time	20 min
H ₃ PO ₄	8 g/L		
GO	0-3.6 g/L		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.16 กราฟพลาเพลของเหล็กที่ทำการเคลือบด้วยฟอสเฟตที่มีปริมาณของกราฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกัน [17]

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่ากราฟีนออกไซด์สามารถช่วยในการป้องกันการกัดกร่อนได้และกราฟีนออกไซด์ที่ปริมาณ 1.2 กรัมต่อสารละลายฟอสเฟต 1 ลิตรสามารถป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์ได้ดีที่สุด

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. การหาชนิดของพอลิเมอร์ที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุด
2. การปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์โดยการเติมกราฟีนออกไซด์(GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์(rGO) ลงไปในพอลิเมอร์เพื่อหาชนิดของอนุพันธ์ของกราฟีนออกไซด์และปริมาณการเติมที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุด
3. นำพอลิเมอร์ที่ผสมกับอนุพันธ์ของกราฟีนออกไซด์ที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุดในเงื่อนไขข้อที่ 2 ไปทำการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดโดยการปรับเปลี่ยนปริมาณการใส่อนุพันธ์ของกราฟีนออกไซด์นั้น

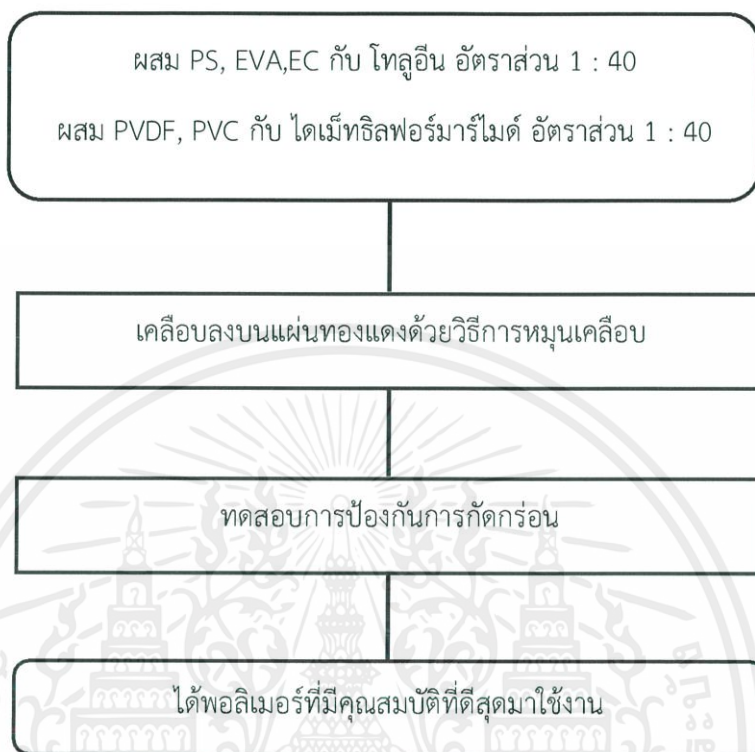
3.1 แผนผังแสดงกระบวนการทดลอง

1. สำหรับการหาพอลิเมอร์ที่เหมาะสมที่จะใช้ในกระบวนการป้องกันการกัดกร่อนนั้นจะใช้พอลิเมอร์ทั้งหมด 5 ชนิดด้วยกันคือ พอลิสไตรีน(PS) พอลิเอทิลีนโคไวนิลอะซิเตท(EVA) เอทิลเซลลูโลส (EC) พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์(PVDF) และพอลิไวนิลคลอไรด์(PVC) ซึ่งจะทำให้ละลายในตัวทำละลายโทลูอีนและไตรเมทิลฟอสเฟตและจากนั้นนำไปเคลือบลงบนแผ่นทองแดงและนำไปทดสอบการกัดกร่อนสำหรับแผนผังแสดงการหาชนิด

2. การปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์โดยการนำพอลิเมอร์ที่ได้จากการทดลองก่อนหน้านี้ที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุดมาทำการผสมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เงื่อนไข 300 องศาเซลเซียสในปริมาณที่แตกต่างกันแล้วนำไปทดสอบการกัดกร่อนแล้วปริมาณการเติมที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุดมาใช้กับสารเติมแต่งชนิดอื่นเพื่อหาสารเติมแต่งที่เหมาะสมมากที่สุดในการป้องกันการกัดกร่อน

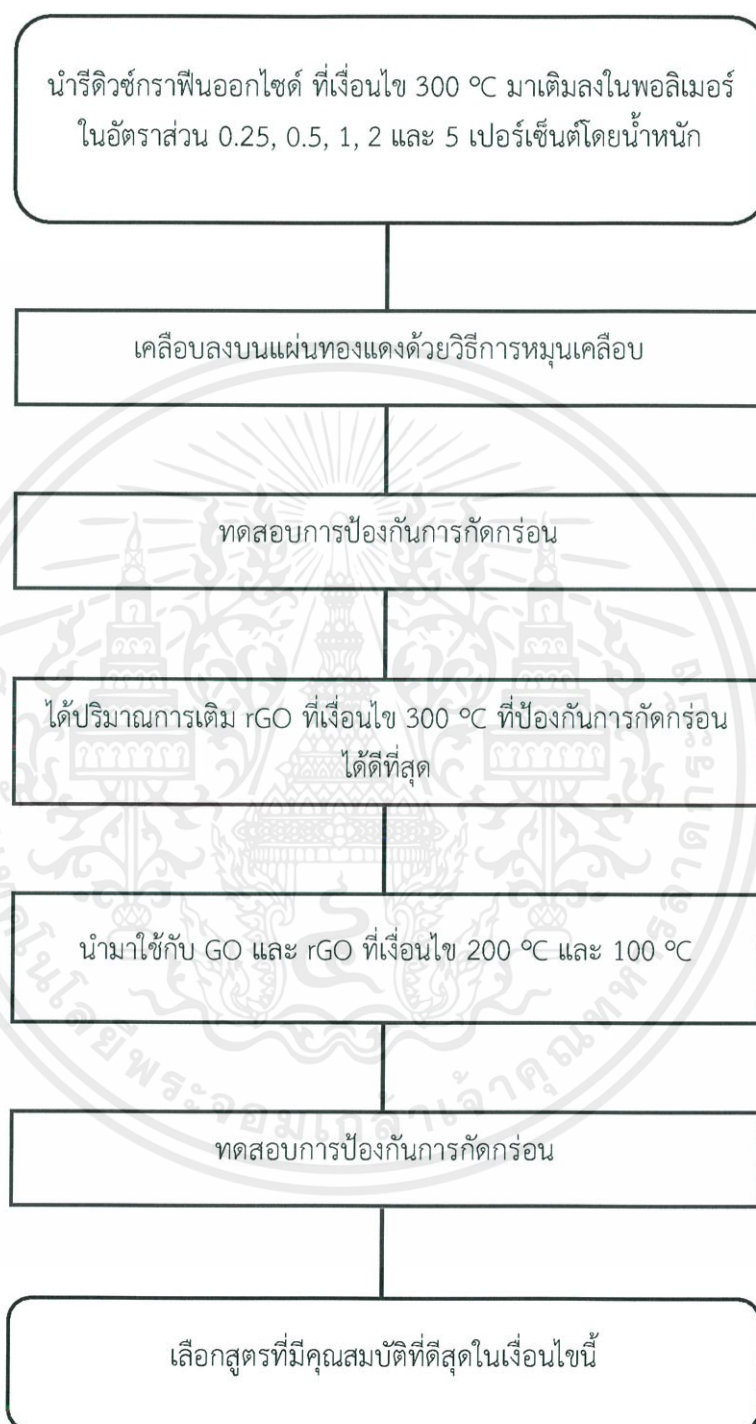
3. การหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการเติมสารเติมแต่งโดยการนำสารเติมแต่งที่เหมาะสมมากที่สุดในการป้องกันการกัดกร่อนที่ได้จากการทดลองก่อนหน้านี้มาทำการปรับเปลี่ยนปริมาณในการเติมเพื่อหาปริมาณที่ดีที่สุดในการเติมเพื่อป้องกันการกัดกร่อนในงานวิจัยนี้ซึ่งสามารถเขียนเป็นผังการทดลองได้ดังข้อที่ 3.1.1 3.1.2 และ 3.1.3

3.1.1 แผนผังการหาชนิดของพอลิเมอร์ที่ในการป้องกันการกัดกร่อน



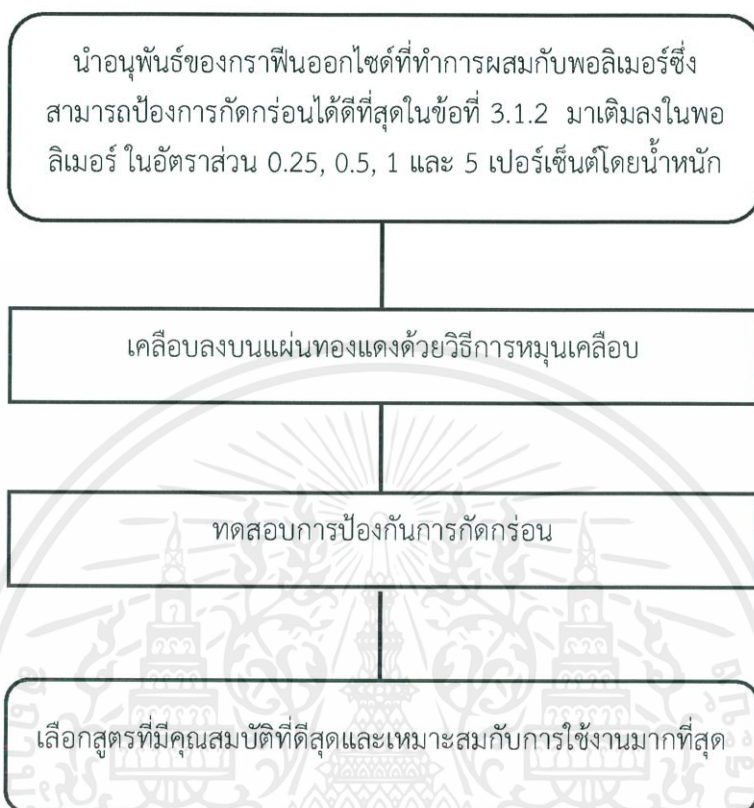
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 แผนผังการปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 แผนผังการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการเติมอนุพันธ์กราฟีนออกไซด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องโพเทนทีโอสแตต
2. เครื่องชั่งสาร
3. เครื่องโซนเคชั่น
4. แผ่นให้ความร้อน
5. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)
6. เครื่องหมุนเคลือบ (Spin coating)
7. เครื่องรามานสเปกโตรสโคปี
8. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี PerkinElmer รุ่น UATR Two
9. เตาเผาฮีทชิวโคตี
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Zeiss รุ่น EVO
11. เครื่องยิงอนุภาคของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (XPS)

3.3 วิธีทำการทดลอง

3.3.1 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

3.3.1.1 การสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์

1. ทำการชั่งสารประกอบประกอบไปด้วยกราฟไฟต์ 1 กรัม โซเดียมไนเตรต 1 กรัม โพลีแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 6 กรัมและกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 96 เปอร์เซ็นต์ 50 มิลลิลิตร
2. ทำการผสมกราฟไฟต์ กับโซเดียมไนเตรดอย่างละ 1 กรัมลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรจากนั้นนำขวดรูปชมพู่วางลงในบีกเกอร์ที่ใส่น้ำแข็งแล้วทำการติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิไว้บริเวณข้างขวด
3. ทำการใส่กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 96 เปอร์เซ็นต์ 50 มิลลิลิตร ลงไปในขวดรูปชมพู่จากนั้นทำการใส่ แมกนีติกบาร์แล้วทำการปั่นกวนด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาที
4. ทำการใส่โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 6 กรัมลงในขวดรูปชมพู่อย่างช้า ๆระวังอย่าให้อุณหภูมิสูงเกิน 20 องศาเซลเซียสจากนั้นตั้งทิ้งไว้ 15 นาที สารละลายจะค่อยๆเปลี่ยนสีจนกลายเป็นสีเขียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำปีกเกอร์ใส่ น้ำแข็ง ออกเปลี่ยนเป็นใส่น้ำจากนั้นทำการให้ความร้อนกับสารละลายที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

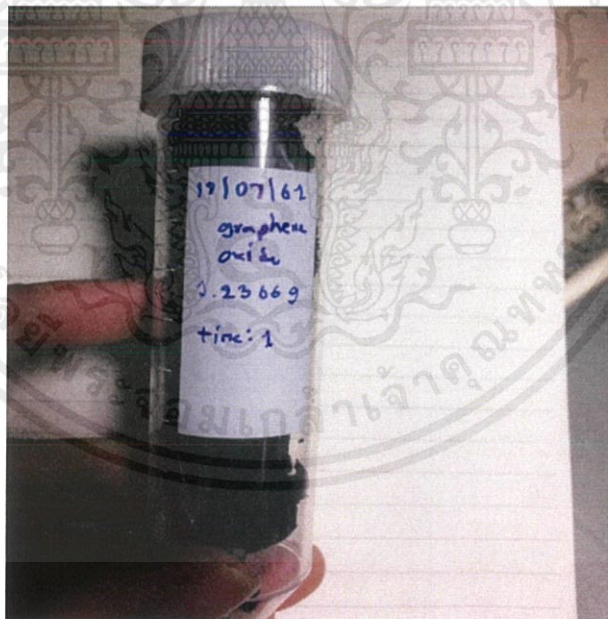
6. หยุดให้ความร้อนจากนั้นทำการใส่น้ำปลอดประจุ 70 มิลลิลิตรลงไปจากนั้นทำการปั่นกวนทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง จนอุณหภูมิตกลงมาที่ประมาณ 30 องศาเซลเซียส สารละลายจะเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาล

7. ทำการใส่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 30 เปอเซ็นต์ ลงไป 30 มิลลิลิตรและหลังจากนั้นใส่น้ำปลอดประจุลงไป 100 มิลลิลิตร รอประมาณ 10 นาที

8. นำสารละลายที่ได้มาทำการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนตริฟิวส์ด้วยความเร็วรอบ 6000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการแยกระหว่างน้ำและตะกอน

9. นำตะกอนที่ได้จากในข้อ 8. มาละลายในน้ำปลอดประจุแล้วทำการปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนตริฟิวส์ซ้ำอีกประมาณ 3 ครั้งจนน้ำที่ได้จากการปั่นเหวี่ยงใสขึ้น

10. นำตะกอนและน้ำที่ได้มาทำการให้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียสจนน้ำระเหยออกไปจนหมดจะได้แผ่นกราฟีนออกไซด์ที่ซ้อนทับกันหลายๆชั้น



ภาพที่ 3.1 กราฟีนออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.2 การสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

1. นำกราฟีนออกไซด์ที่ได้มาบดหยาบ ๆ ด้วยโกร่งบดสาร
2. นำกราฟีนออกไซด์มาแบ่งใส่ถ้วยเซรามิก ถ้วยละ 100 มิลลิกรัมจำนวน 4 ถ้วยจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการเก็บใส่ภาชนะ
3. ทำซ้ำในข้อที่ 2 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิที่เผาเป็น 200 องศาเซลเซียส และ 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.3.2 การผสมพอลิเมอร์ที่ใช้เคลือบ

1. ทำการผสมพอลิสไตรีน (PS) 0.5 กรัมกับโทลูอีน 20 มิลลิลิตร ลงในขวดจากนั้นนำไปให้พลังงานเพื่อช่วยในการละลายด้วยเครื่องอัลตราโซนิเคชันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. ทำเช่นเดียวกับข้อที่ 1 แต่ทำการเปลี่ยนพอลิเมอร์เป็น พอลิเอทิลีนโคโวนิลอะซิเตท (EVA) เอทิลเซลลูโลส (EC) และในส่วนของพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ต้องทำการเปลี่ยนตัวทำละลายเป็น ไดเมทิลฟอร์มามิด (DMF)

3.3.3 การเตรียมฐานรองรับ

- 3.3.3.1 การผสมสารละลายเพื่อใช้ทำความสะอาดพื้นผิวของแผ่นทองแดง
 1. ทำการชั่งสารเหล็กคลอไรด์ (FeCl_3) ปริมาณ 0.1 กรัม และน้ำปอดประจุ ปริมาณ 250 มิลลิลิตร
 2. ทำการผสมเข้าด้วยกันด้วยเครื่องอัลตราโซนิเคชันเป็นเวลา 30 นาที
- 3.3.3.2 การทำความสะอาดแผ่นทองแดง
 1. ทำการตัดแผ่นทองแดงขนาดใหญ่ให้มีความกว้าง 2 เซนติเมตร ความยาว 2.5 เซนติเมตร
 2. นำแผ่นทองแดงที่ได้มาทำความสะอาดพื้นผิวโดยการนำไปใช้ในสารละลายเหล็กคลอไรด์ (FeCl_3) เป็นเวลา 30 นาที
 3. นำแผ่นทองแดงที่ได้จากการทำความสะอาดพื้นผิวมาทำการล้างด้วย น้ำปอดประจุ เมทานอล และ ไอโซโพรพานอล ด้วยเครื่องอัลตราโซนิเคชันอย่างละ 10 นาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 กระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม

1. นำพอลิเมอร์ที่ทำการละลายทั้งหมดมาทำการเคลือบบนแผ่นทองแดงที่เตรียมไว้โดยการหยดสารลงไปให้ทั่วทั้งพื้นผิวทองแดงจากนั้นทำการหมุนเคลือบด้วยความเร็วรอบ 300 รอบต่อวินาทีเป็นเวลา 10 วินาทีและ 4000 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 30 วินาทีตามลำดับ

2. นำแผ่นทองแดงที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ไปใส่ตัวทำละลายออกโดยการนำไปให้ความร้อนบนแผ่นให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.3.5 การทดสอบสมบัติ

3.3.5.1 การทดสอบสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิด

1. นำกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ไปทำการวัดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานซอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีเพื่อหาโมเลกุลจำเพาะของสารแต่ละชนิด

2. นำกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ไปทำการวัดด้วยเครื่องรามานสเปกโตรสโกปีเพื่อดูการสั่นของโมเลกุลที่มีอยู่จำเพาะในแต่ละชนิดของสาร

3. นำกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ไปทำการดูพื้นผิวและการกระจายตัวของสารในพอลิเมอร์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4. นำกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ไปทำการวัดด้วยเครื่องยิงอนุภาคของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (XPS) เพื่อดูปริมาณของสารแต่ละชนิดที่ประกอบอยู่ในกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์



ภาพที่ 3.2 เครื่องรามานสเปกโตรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

3.3.5.2 การทดสอบทางไฟฟ้าเคมี

1. การวัดการกัดกร่อน

1. ทำการเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยการทำการผสมโซเดียมคลอไรด์ 7 กรัม ลงในน้ำปอดประจุ 200 มิลลิลิตรจากนั้นนำไปให้พลังงานเพื่อช่วยในการละลายด้วยเครื่องอัลตราโซนิเคชันเป็นเวลา 10 นาที

2. นำแผ่นทองแดงที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ทั้งหมดและแผ่นทองแดงเปล่าไปทำการวัดการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.5 เปอร์เซ็นต์ด้วยเครื่องโพเทนชิออสแตทด้วยเงื่อนไขดังนี้

- ความต่างศักย์เริ่มต้น : -1 โวลต์
- ความต่างศักย์สุดท้าย : 1 โวลต์
- อัตราการสแกน (Scan rate) : 0.1 โวลต์ต่อวินาที
- ระดับการสแกน (Step) : 0.001 โวลต์

2. การวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี

1. ทำการเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์โดยการทำการผสมโซเดียมคลอไรด์ 7 กรัม ลงในน้ำปอดประจุ 200 มิลลิลิตรจากนั้นนำไปให้พลังงานเพื่อช่วยในการละลายด้วยเครื่องอัลตราโซนิเคชันเป็นเวลา 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำแผ่นทองแดงที่เคลือบด้วยโพลีเมอร์ไปจุ่มลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจากนั้นนำมาทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตตด้วยเงื่อนไขดังนี้

- ความถี่เริ่มต้น : 1×10^{-5} เฮิรตซ์
- ความถี่สุดท้าย : 0.1 เฮิรตซ์
- แอมพลิจูด : $0.01 V_{rms}$

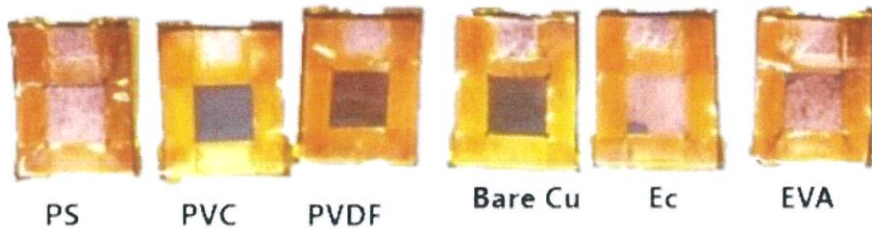


ภาพที่ 3.4 เครื่องโพเทนชิโอสแตตสำหรับใช้ทดสอบเชิงไฟฟ้าเคมี



ภาพที่ 3.5 การวัดเชิงเคมีไฟฟ้าของแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.6 แผ่นทองแดงเปลือยและแผ่นทองแดงที่เคลือบพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่ผ่านการวัดด้วย เครื่องโพเทนทิโอสแตด

3.3.6 การปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์

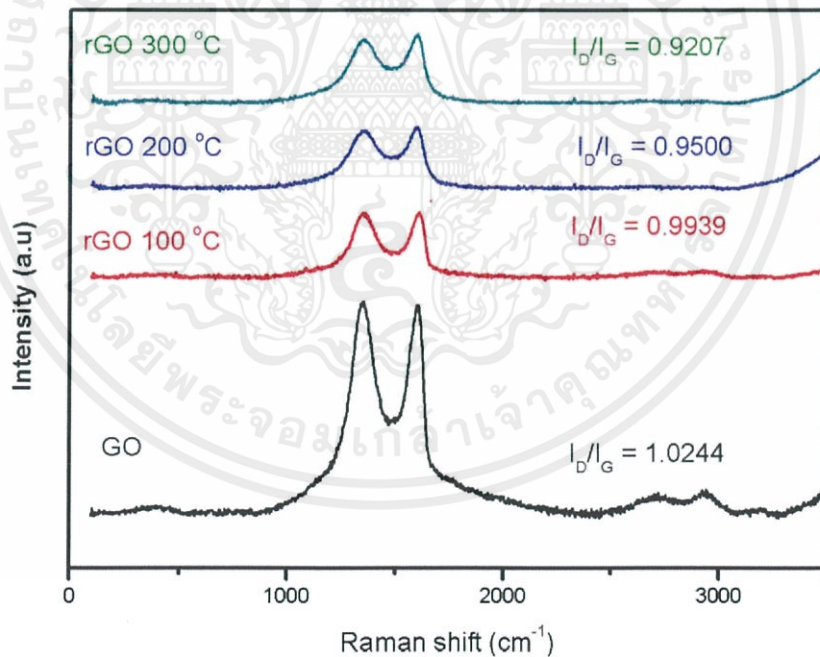
1. นำพอลิเมอร์ที่ผสมสารละลายสำหรับใช้เคลือบมาทำการเติม รีดิคัลกราฟีนออกไซด์ที่ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ลงไปปริมาณขวลละ 0.25, 0.5, 1, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ
2. นำไปให้พลังงานเพื่อช่วยในการกระจายตัวด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. ทำการขึ้นรูปฟิล์มและทดสอบสมบัติการกัดกร่อนตามหัวข้อที่ 3.4.4 และ 3.4.5.2 ตามลำดับ
4. หาเงื่อนไขเปอร์เซ็นต์ของรีดิคัลกราฟีนออกไซด์ที่ดีที่สุดไปใช้กับรีดิคัลกราฟีนออกไซด์ที่ เงื่อนไข 200 องศาเซลเซียส 100 องศาเซลเซียส และกราฟีนออกไซด์ โดยทำตามดังข้อที่ 1-3 ใน ข้างต้น
5. นำอนุพันธ์ของกราฟีนออกไซด์ที่ใส่ลงไปในพอลิเมอร์ที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดี ที่สุดในเงื่อนไขก่อนหน้ามาทำการปรับเปลี่ยนปริมาณการเติมเพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดของงานนี้ โดยทำ การเติมในปริมาณขวลละ 0.5, 1, และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

บทที่ 4

การวิเคราะห์และอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการเคลือบแผ่นทองแดงเพื่อป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้พอลิเมอร์เติมแต่งด้วยกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นมาซึ่งกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นมานั้นได้ทำการตรวจสอบวิเคราะห์ทางองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) เทคนิครามานสเปกโทรสโกปีและเทคนิคการยิงอนุภาคของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ก่อนที่จะนำมาเติมแต่งลงในพอลิเมอร์เพื่อทำการหาเงื่อนไขที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุดต่อไป

4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี



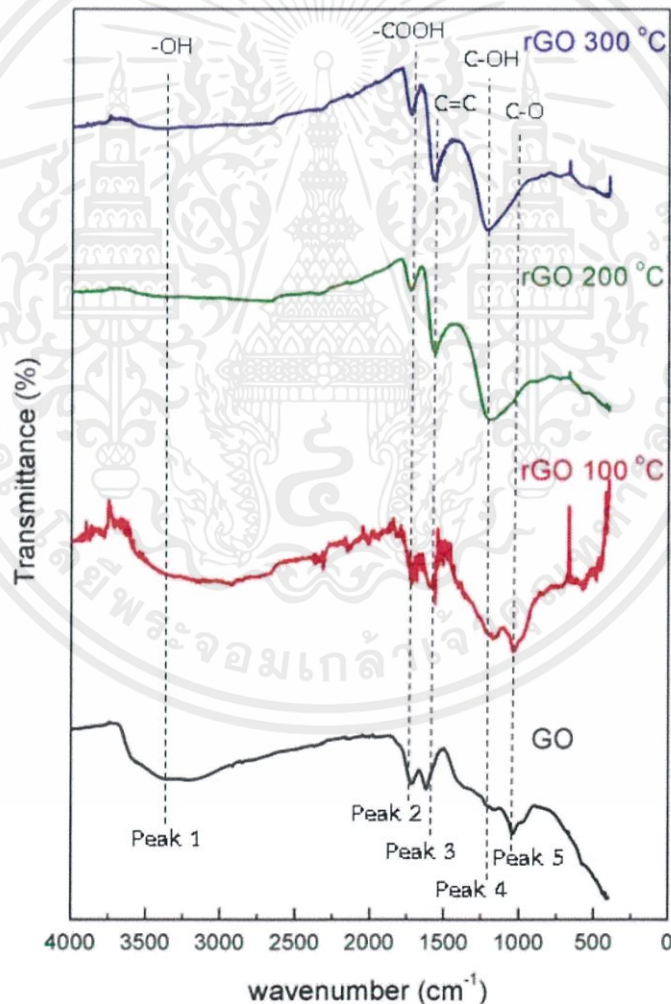
ภาพที่ 4.1 กราฟรามานของกราฟีนออกไซด์(GO) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์(rGO)ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียส

ผลที่ได้จากกราฟรามานจะบ่งบอกถึงความไม่เป็นระเบียบและจุดบกพร่องในโครงสร้างผลึก ซึ่งบ่งบอกได้จากอัตราส่วนความเข้มระหว่าง D band และ G band (I_D/I_G) [18]ตามลำดับ โดยทั่วไปแล้ว G band แสดงถึงรูปแบบการจัดพันธะของคาร์บอนแบบ sp^2 หรือการจับกันของพันธะคู่ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนอะตอมและการที่ D band มีความกว้างขึ้น เนื่องจากเกิดการลดของพันธะคาร์บอนแบบ sp^2 ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดจุดบกพร่อง ช่องว่างและการบิดเบี้ยวของโครงสร้างจากการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งโดยสรุปแล้วการที่อัตราส่วนความเข้มระหว่าง D band และ G band ลดต่ำลงของรีดิวซ์กราฟีน ออกไซด์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากการลดลงของหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ การเกิดจุดบกพร่องมากยิ่งขึ้นและการลดลงของถึงรูปแบบการจัดพันธะของคาร์บอนแบบ sp^2 หรือ การจับกันของพันธะคู่ของคาร์บอน

4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FT-IR)



ภาพที่ 4.2 กราฟ FT-IR ของ กราฟีนออกไซด์(GO) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์(rGO)ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

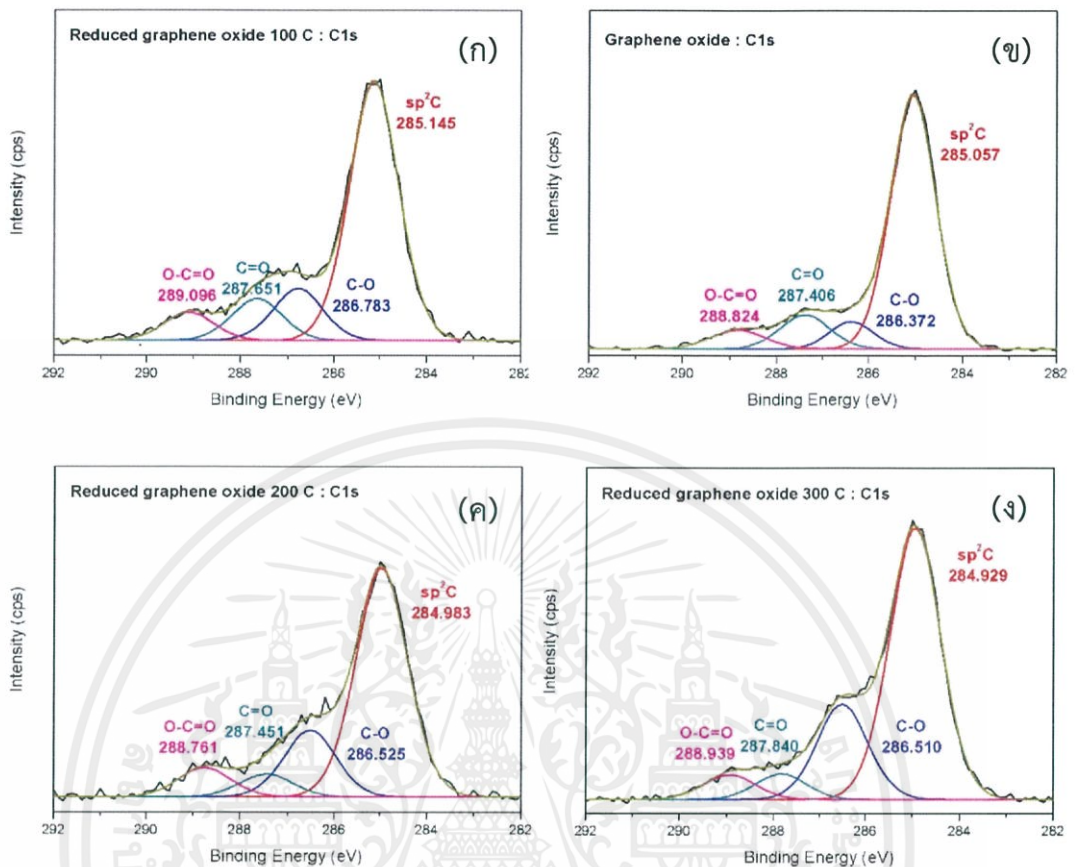
ตารางที่ 4.1 ชนิดและความถี่ที่เกิดจากการสั่นของพันธะของ กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียส

Peak	bond	Frequency, cm ⁻¹			
		GO	rGO 100 °C	rGO 200 °C	rGO 300 °C
1	O-H stretching	3355	3249	-	-
2	C=O stretching	1719	1720	1727	1730
3	C=C stretching	1618	1598	1559	1571
4	C-OH stretching	1163	1176	1195	1216
5	C-O stretching	1040	1038	-	-

ผลที่ได้จาก FT-IR บ่งบอกถึงการสั่นแบบต่าง ๆ ของพันธะที่จับกันระหว่างอะตอมของกราฟีนออกไซด์ (GO) และ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียสซึ่งมีค่าความถี่ตามตารางที่ 4.1 ซึ่ง [19] peak 1 บ่งบอกถึงการสั่นของพันธะ O-H ไฮดรอกซิล peak 2 เป็นการสั่นของพันธะ C=O คาร์บอกซิล หรือ COOH peak 3 เป็นการสั่นของพันธะ C=C ของกราฟีนที่ไม่เกิดการออกซิไดซ์ (ไฮบริดแบบ sp²) peak 4 เป็นการสั่นของพันธะ -OH ของหมู่แอลกอฮอล์ peak 5 เป็นการสั่นของพันธะ C-O ของหมู่เอพอกไซด์ (C-O-C) เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตามเงื่อนไข พบว่าความเข้มของในแต่ละ peak ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบไปด้วย ออกซิเจนจะลดลงโดยเฉพาะ peak 1 ซึ่งแสดงถึงพันธะ O-H ของน้ำ เมื่อทำการเผาความเข้มจะลดลงเช่นเดียวกับ peak 2 ของหมู่คาร์บอกซิล ที่มีความเข้มลดต่ำลงเช่นเดียวกัน

4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณสารและองค์ประกอบของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยเครื่องยิงอนุภาคของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (XPS)

การวัดด้วยเทคนิคการยิงอนุภาคของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์เป็นวิธีการใช้หาองค์ประกอบของสารว่ามีความแตกต่างกันอย่างไรบ้างซึ่งในส่วนของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะศึกษาพันธะของฟิสิก C1s ว่ามีธาตุคาร์บอนไปสร้างพันธะกับธาตุอะไรบ้างซึ่งผลที่ได้จากเทคนิคนี้มีดังภาพที่ 4.3 และตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.3 กราฟที่วัดได้จากเครื่องยิงอนุภาคของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (XPS) บริเวณจุดยอด C1s แสดงองค์ประกอบของ (ก) กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ (ข) 100 องศาเซลเซียส (ค) 200 องศาเซลเซียส และ (ง) 300 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.2 ปริมาณขององค์ประกอบของพันธะที่มีอยู่ในกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

Bond	Percentage (%)			
	GO	rGO 100 °C	rGO 200 °C	rGO 300 °C
C=C (sp ²)	73.9	68.1	65.8	64.7
C-O (Hydroxyl)	8.0	13.6	19.2	23.1
C=O (Carbonyl)	11.4	10.9	6.6	6.2
O-C-OH (Carboxyl)	6.8	7.4	8.4	6.0

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากเครื่องยิงอนุภาคของอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ซึ่งพบว่า [20] พันธะที่มีองค์ประกอบอยู่ในสารทุกชนิดมี C-C, C-O, C=O

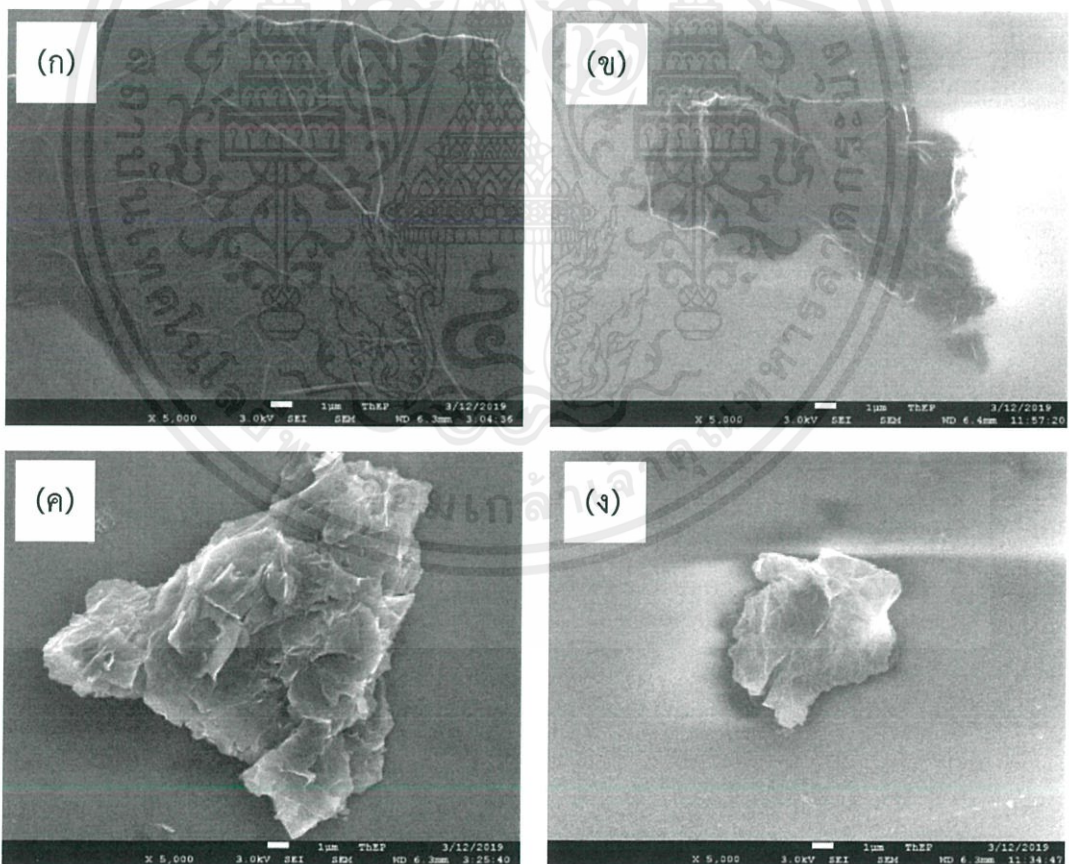
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ O-C-OH ซึ่ง พันธะ C=C เมื่อถูกเผาในอุณหภูมิที่สูงขึ้นพบว่ามีเปอร์เซ็นต์ที่ลดน้อยลงอาจเป็นเพราะถูกทำลายโครงสร้างระหว่างการเผาหรือการให้ความร้อน สำหรับพันธะ C-O (C-OH) หรือว่า หมู่ไฮดรอกซิลจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเผาที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น และพันธะ C=O หรือหมู่คาร์บอนิลจะลดน้อยลงเมื่อให้อุณหภูมิที่สูงขึ้นและ หมู่ O-C-OH หรือหมู่คาร์บอซิลิกจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่อุณหภูมิในการเอาที่ 100 และ 200 องศาเซลเซียสและจะลดลงเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

4.4 การตรวจสอบพื้นผิวและความหนาของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM)

4.4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

การตรวจสอบพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ทำการเผา ณ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 200 องศาเซลเซียส และ 300 องศาเซลเซียสด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่ากราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีความขรุขระและการจับตัวที่ต่างกัันดังภาพที่ 4.4



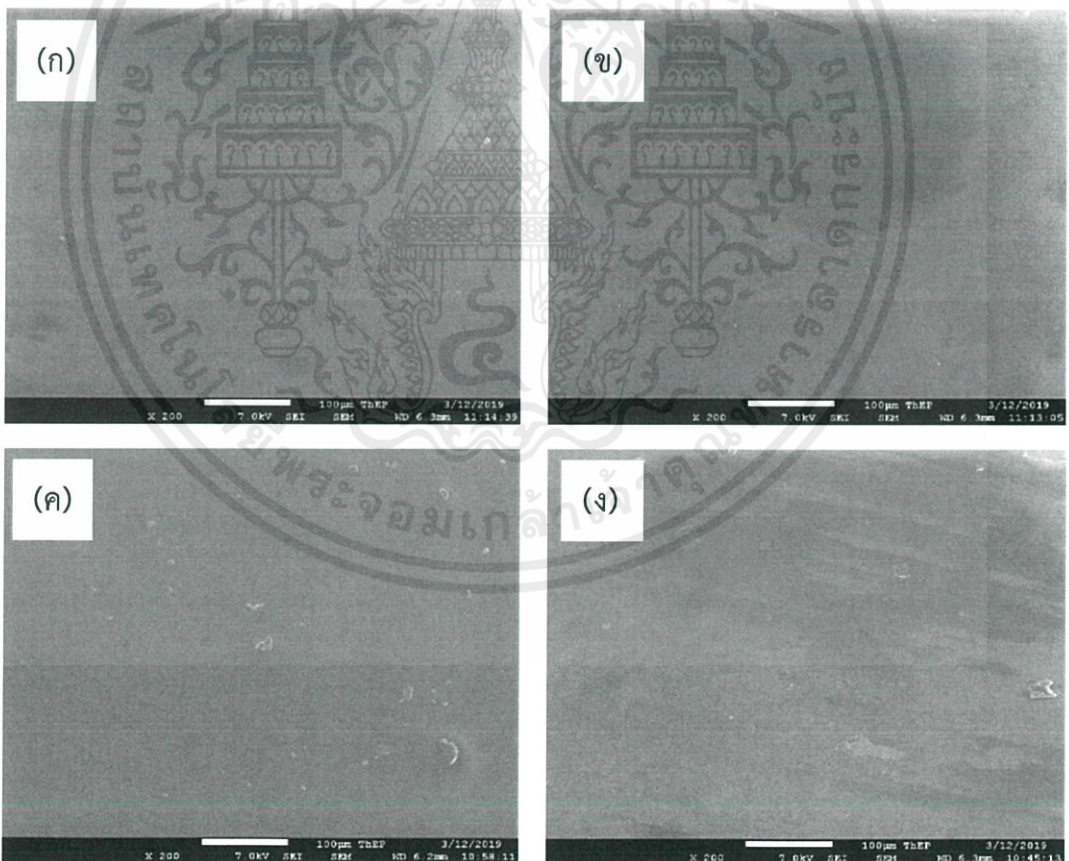
ภาพที่ 4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาจาก FE-SEM ของ (ก) กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เผาที่อุณหภูมิ (ข) 100 องศาเซลเซียส (ค) 200 องศาเซลเซียส และ (ง) 300 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 100, 200, และ 300 องศาเซลเซียสโดยใช้จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5000 เท่า ดังภาพที่ 4.4 พบว่าลักษณะทางกายภาพของกราฟีนออกไซด์ (ภาพ ก) จะมีความเป็นแผ่นค่อนข้างเรียบ ส่วนลักษณะทางกายภาพของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ 100 องศาเซลเซียส (ภาพ ข) จะมีลักษณะเป็นแผ่นและมีความขรุขระของพื้นผิวที่มากกว่ากราฟีนออกไซด์และเมื่อดูลักษณะทางกายภาพของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ 200 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่าจะมีลักษณะของพื้นผิวที่มีความขรุขระมากยิ่งขึ้นและมีการจับตัวกันเป็นก้อนมากยิ่งขึ้น

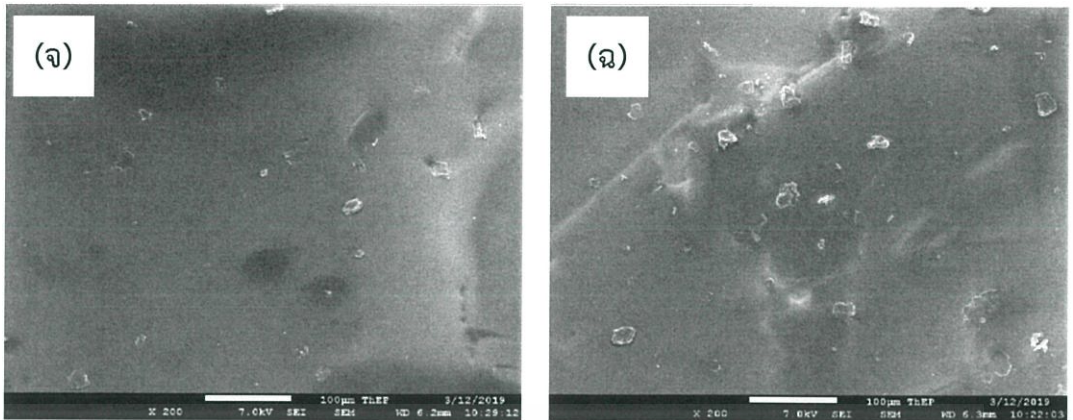
4.4.2 ลักษณะการกระจายตัวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งถูกเติมลงไปในเอทิลเซลลูโลสในปริมาณ 0, 0.25, 0.5, 1, 2, และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

การตรวจสอบการกระจายตัวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสในเอทิลเซลลูโลสในปริมาณ 0, 0.25, 0.5, 1, 2, และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าการกระจายตัวมีลักษณะที่แตกต่างกันดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 การกระจายตัวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ 300 องศาเซลเซียสในเอทิลเซลลูโลสที่ ปริมาณ (ก) 0 เปอร์เซ็นต์ (ข) 0.25 เปอร์เซ็นต์ (ค) 0.5 เปอร์เซ็นต์ (ง) 1 เปอร์เซ็นต์ (จ) 2 เปอร์เซ็นต์ และ (ฉ) 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

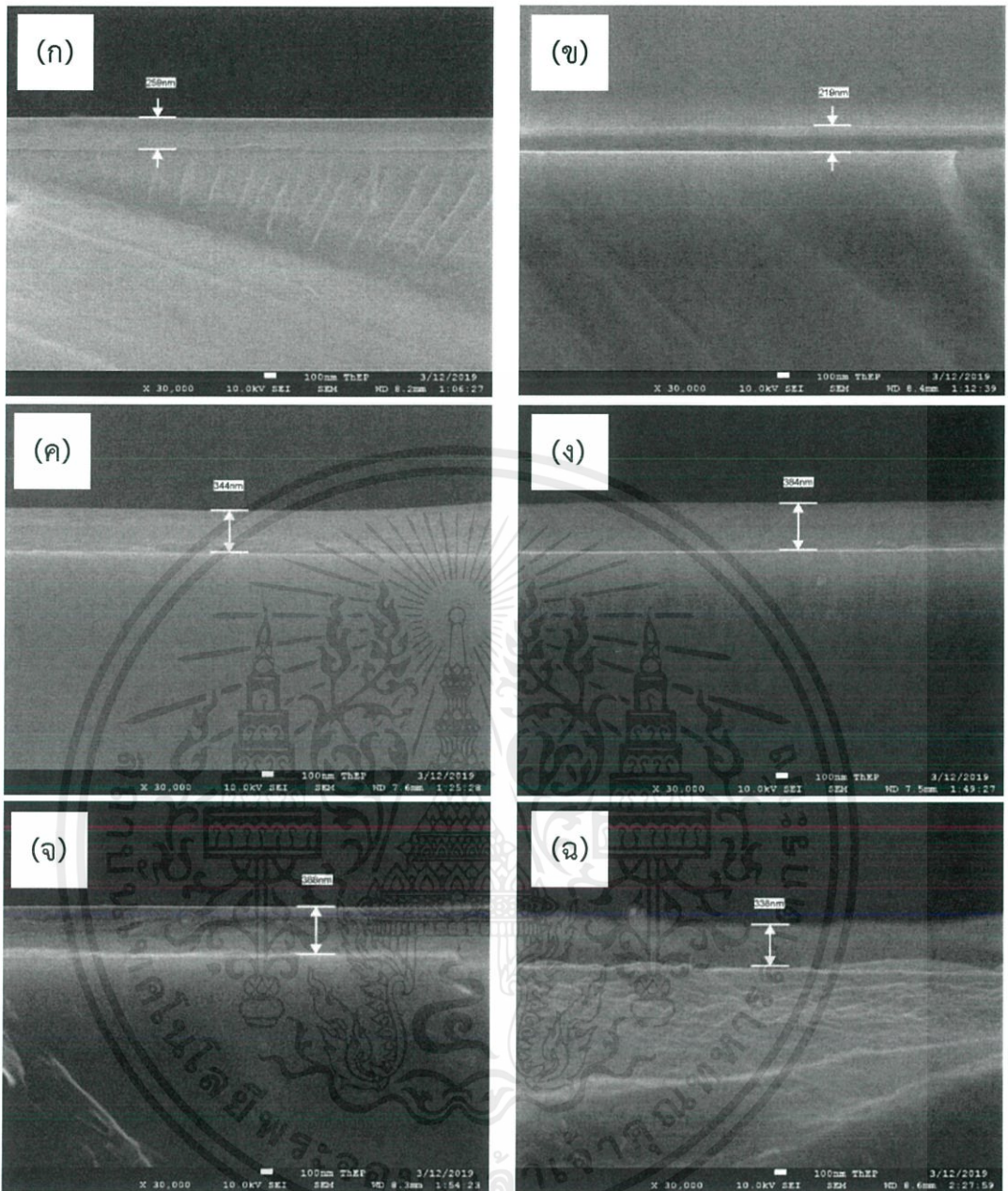


ภาพที่ 4.5 การกระจายตัวของรีติวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ 300 องศาเซลเซียสในเอทิลเซลลูโลสที่ ปริมาณ (ก) 0 เปอร์เซ็นต์ (ข) 0.25 เปอร์เซ็นต์ (ค) 0.5 เปอร์เซ็นต์ (ง) 1 เปอร์เซ็นต์ (จ) 2 เปอร์เซ็นต์ และ (ฉ) 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ต่อ)

จากการตรวจสอบการกระจายตัวของรีติวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสซึ่ง ถูกเติมลงไปนในเอทิลเซลลูโลสโดยใช้จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่าพบว่า เมื่อทำการเติมรีติวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสลงไปทีปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก การกระจายตัวของรีติวซ์กราฟีนออกไซด์ค่อนข้างทั่วทั้งพื้นผิวและขนาดของอนุภากรีติวซ์กราฟีนออกไซด์มีขนาดค่อนข้างเล็กและเมื่อทำการเติมรีติวซ์กราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นพบว่า การกระจายตัวของรีติวซ์กราฟีนออกไซด์เริ่มจะไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิวและขนาดของ รีติวซ์กราฟีนออกไซด์จะมีขนาดใหญ่และจับตัวกันเป็นก้อนมากยิ่งขึ้น

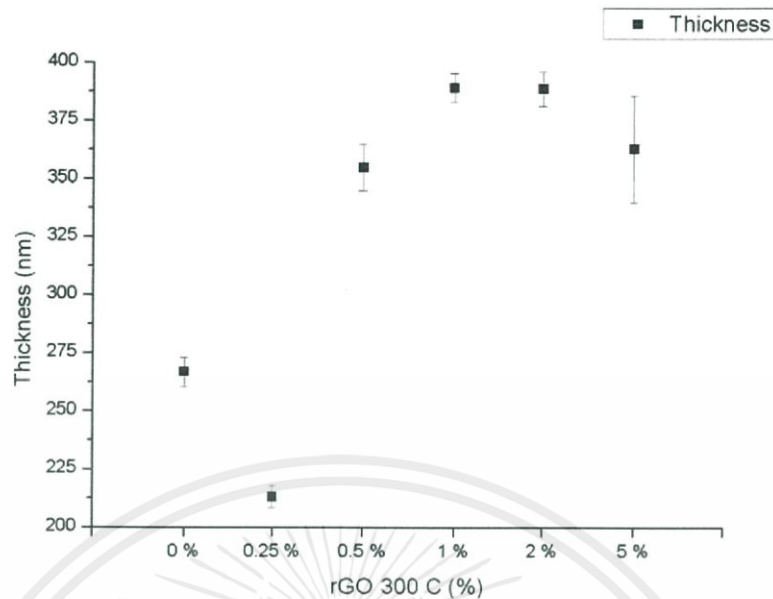
4.4.3 การตรวจสอบความหนาของชั้นฟิล์มเอทิลเซลลูโลสที่ทำการเติมรีติวซ์กราฟีน ออกไซด์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสลงไปในส่วนที่แตกต่างกัน

การตรวจวัดความหนาของชั้นฟิล์มเอทิลเซลลูโลสที่ทำการเติมรีติวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เงื่อนไข อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสลงไปปริมาณ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์พบว่าชั้นฟิล์มมี ความหนาที่แตกต่างกันดังภาพที่ 4.6, 4.7 และตารางที่ 4.3



ภาพที่ 4.6 ภาพตัดขวางแสดงค่าความหนาของชั้นฟิล์มเอทิลเซลลูโลสที่ทำกรเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสลงไปปริมาณ (ก) 0 เปอร์เซ็นต์, (ข) 0.25เปอร์เซ็นต์ (ค) 0.5 เปอร์เซ็นต์, (ง) 1 เปอร์เซ็นต์, (จ) 2 เปอร์เซ็นต์ และ (ฉ) 5 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 กราฟแนวโน้มของความหนาของชั้นฟิล์มเอทิลเซลลูโลสที่ทำการเติมรีดิวซ์ กราฟีนออกไซด์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสลงไปในปริมาณ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.3 ความหนาของชั้นฟิล์มเอทิลเซลลูโลสที่ทำการเติมรีดิวซ์ กราฟีนออกไซด์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสลงไปในปริมาณ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์

rGO 300 °C (%)	Thickness (nm)	SD
0	266.7532	6.25496
0.25	212.9473	4.72908
0.5	354.7484	9.81219
1	389.2582	6.18982
2	388.6076	7.36439
5	362.889	22.82716

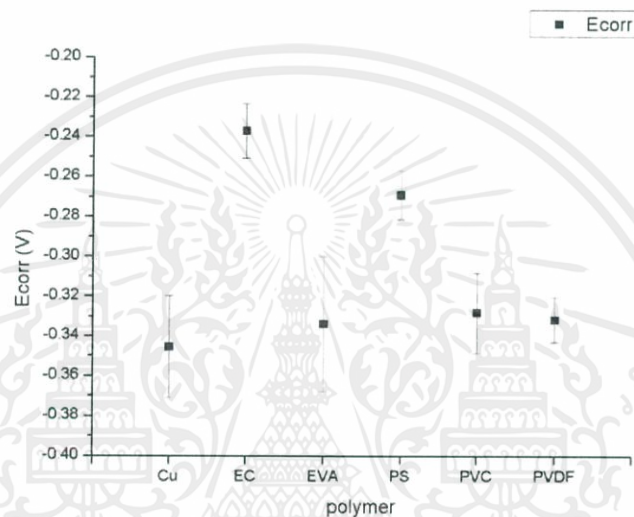
จากการตรวจวัดความหนาของชั้นฟิล์มเอทิลเซลลูโลสที่ทำการเติมรีดิวซ์ กราฟีนออกไซด์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสลงไปในปริมาณ 0, 0.25, 0.5, 1, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์พบว่าชั้นฟิล์มมีความหนาอยู่ในระดับหลักร้อยนาโนเมตรก็คือน้อยกว่าที่ประมาณระหว่าง 200 – 400 นาโนเมตรซึ่งอาจมีความหนาของชั้นฟิล์มที่ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิวเนื่องจากวิธีการขึ้นรูปและชนิดของฐานรองรับที่อาจมีความไม่สม่ำเสมอทำให้ความหนาอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้แต่จากผลการทดลองสามารถบอกได้ว่าเมื่อมีการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสในปริมาณที่เพิ่มมากยิ่งขึ้นความหนาของชั้นฟิล์มก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

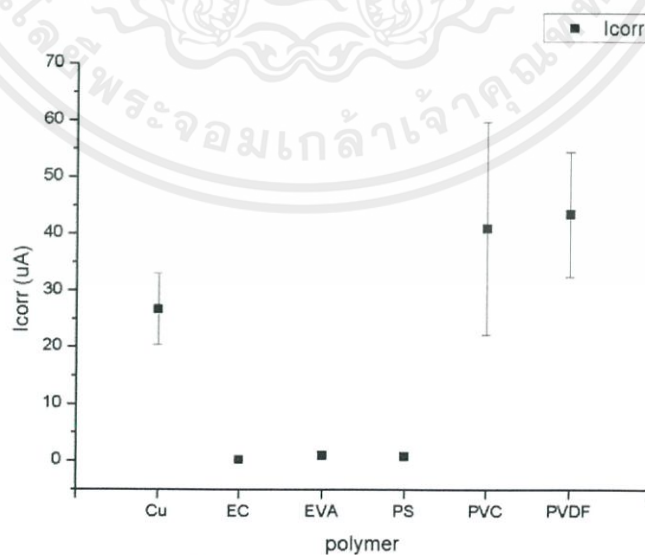
4.5 การทดสอบการกัดกร่อน

4.5.1 การทดสอบการกัดกร่อนของพอลิเมอร์

การทดสอบการกัดกร่อนของพอลิเมอร์โดยการนำพอลิเมอร์ เอทิลเซลลูโลส(EC) พอลิเอทิลีนโคไวนิลอะซิเตท(EVA) พอลิสไตรีน(PS) พอลิไวนิลฟลูออไรด์(PVC) พอลิไวนิลลิทีนฟลูออไรด์(PVDF) ชนิดละ 10 ตัวอย่างไปทำการเคลือบลงบนแผ่นทองแดงจากนั้นนำไปวัดการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์ผลที่ได้ดังภาพที่ 4.8, 4.9 และตารางที่ 4.4



ภาพที่ 4.8 กราฟศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ย (E_{corr}) ของแผ่นทองแดงเปลือยและแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ



ภาพที่ 4.9 กราฟกระแสกัดกร่อนเฉลี่ย (I_{corr}) ของแผ่นทองแดงเปลือยและแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน(E_{corr}), กระแสกัดกร่อน(I_{corr}) ของแผ่นทองแดงเปลือย และพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ

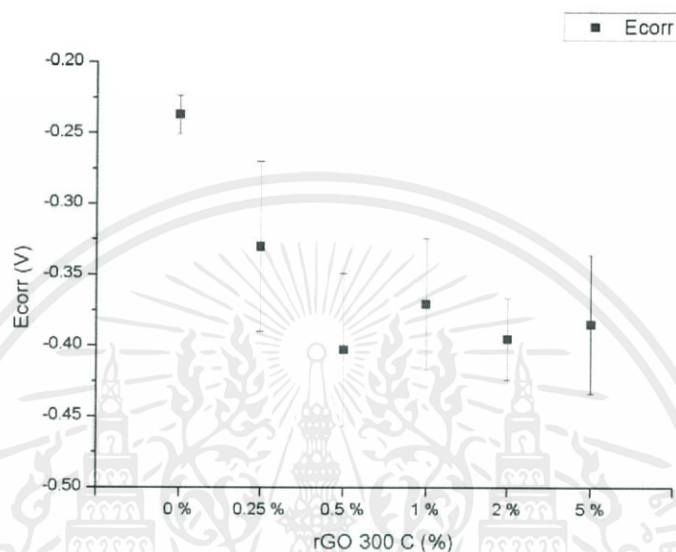
Specimen	E_{corr} (V vs. Ag/AgCl)	SD	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	SD
Cu	-0.345	0.0256	26.6480	6.23691
EC	-0.237	0.0135	0.1571	0.13051
EVA	-0.334	0.0338	0.9322	0.60502
PS	-0.269	0.0123	0.7570	0.36376
PVC	-0.328	0.0200	40.9324	18.72451
PVDF	-0.331	0.0113	43.4390	11.00904

ผลการทดสอบการกัดกร่อนของพอลิเมอร์จากภาพที่ 4.8, 4.9 และ ตารางที่ 4.4 พบว่าค่า ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของแผ่นทองแดง (Cu) เอทิลเซลลูโลส(EC) พอลิเอทิลีนโคโวนิลอะซิเตท (EVA) พอลิสไตรีน(PS) พอลิไวนิลฟลูออไรด์(PVC) และ พอลิไวนิลลิทีนฟลูออไรด์(PVDF) มีค่าสูง มากกว่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของแผ่นทองแดงเปลือยและพอลิเมอร์ที่ทำการเคลือบแล้วมีค่าของ ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยสูงที่สุดคือ เอทิลเซลลูโลส (EC) มีค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนอยู่ที่ -0.237 ± 0.0135 โวลต์ ส่วนค่าของกระแสกัดกร่อน (I_{corr}) เมื่อทำการเคลือบพอลิเมอร์ด้วยแผ่น ทองแดงพบว่าโดยส่วนใหญ่ค่ากระแสการกัดกร่อนจะลดลงหรือนำไฟฟ้าได้ยากมากยิ่งขึ้นและ พอลิเมอร์ที่มีค่ากระแสการกัดกร่อนที่น้อยที่สุดคือ เอทิลเซลลูโลส (EC) ซึ่งมีค่ากระแสอยู่ที่ $0.1571 \pm 0.13051 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ จึงได้ทำการเลือกใช้ เอทิลเซลลูโลส (EC) ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}) ที่สูงที่สุดและมีค่ากระแสกัดกร่อน (I_{corr}) ต่ำที่สุดอีกด้วยจึงเป็นพอลิเมอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่จะ นำมาใช้งานในการป้องกันการกัดกร่อนซึ่งการที่เอทิลเซลลูโลสสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่า พอลิเมอร์ชนิดอื่นอาจเกิดจากการที่เอทิลเซลลูโลสสามารถละลายได้ดีในโพลีเอทิลีนทำให้เมื่อทำการสร้าง ชั้นฟิล์มทำให้ฟิล์มมีความเรียบเป็นระเบียบมากกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นและเอทิลเซลลูโลสยังมี คุณสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิกหรือไม่ชอบน้ำทำให้การซึมผ่านของสารอิเล็กโทรไลต์นั้นผ่านไปได้ยากมาก ยิ่งขึ้นและ [21] โครงสร้างทางเคมีของเอทิลเซลลูโลสประกอบไปด้วย หมู่ฟังก์ชันที่มี ออกซิเจนเป็น องค์ประกอบซึ่งทำให้เอทิลเซลลูโลสนั้นมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ไม่ดีซึ่งทำให้ไฟฟ้าหรือประจุ ไฟฟ้าไหลผ่านพอลิเมอร์ได้ยากขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน

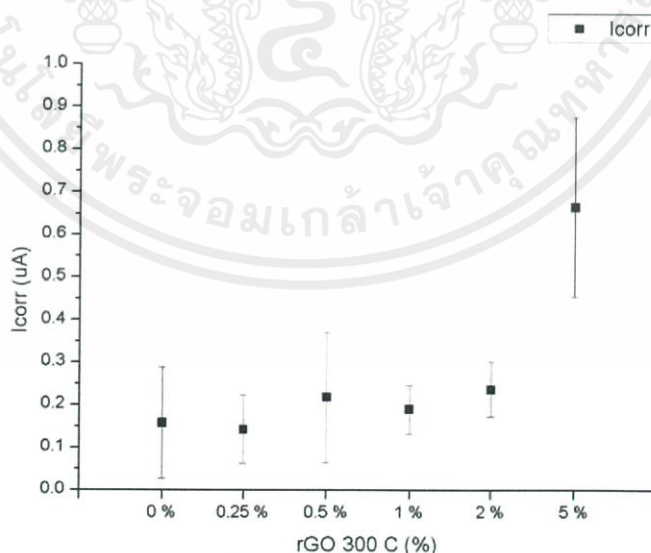
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การทดสอบการกักต่อนของเอทิลเซลลูโลสซึ่งได้ทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสลงในปริมาณที่แตกต่างกัน

การทดสอบความสามารถการป้องกันการกักต่อนของสารเติมแต่งหรือ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ผสมกับเอทิลเซลลูโลสในปริมาณ 0, 0.25 0.5, 1, 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์ซึ่งได้ผลการทดลองดัง ภาพที่ 4.10, 4.11 และ ตารางที่ 4.5 ดังนี้



ภาพที่ 4.10 กราฟศักย์ไฟฟ้ากักต่อนเฉลี่ย (E_{corr}) ของแผ่นทองแดงเปลือยและแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสลงในปริมาณ 0, 0.25, 0.5, 1, 2, และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.11 กราฟกระแสกักต่อนเฉลี่ย (I_{corr}) ของแผ่นทองแดงเปลือยและแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสลงในปริมาณ 0, 0.25, 0.5, 1, 2, และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

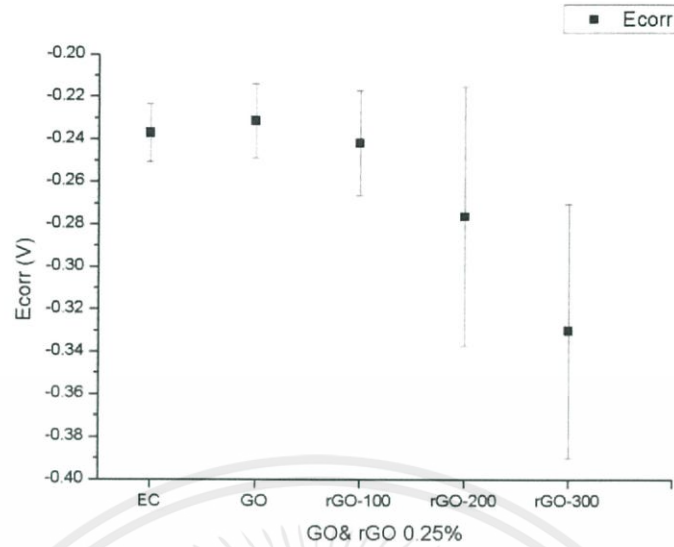
ตารางที่ 4.5 ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน(E_{corr}), กระแสกัดกร่อน(I_{corr}) ของแผ่นทองแดงเปลือยและแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสลงไป ปริมาณ 0, 0.25, 0.5, 1, 2, และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

rGO 300 °C (%)	E_{corr} (V vs. Ag/AgCl)	SD	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	SD
0	-0.237	0.0135	0.1571	0.13051
0.25	-0.330	0.0598	0.1427	0.07985
0.5	-0.402	0.0539	0.2171	0.1534
1	-0.370	0.0463	0.1892	0.0572
2	-0.395	0.0289	0.2359	0.06501
5	-0.385	0.0490	0.6652	0.21048

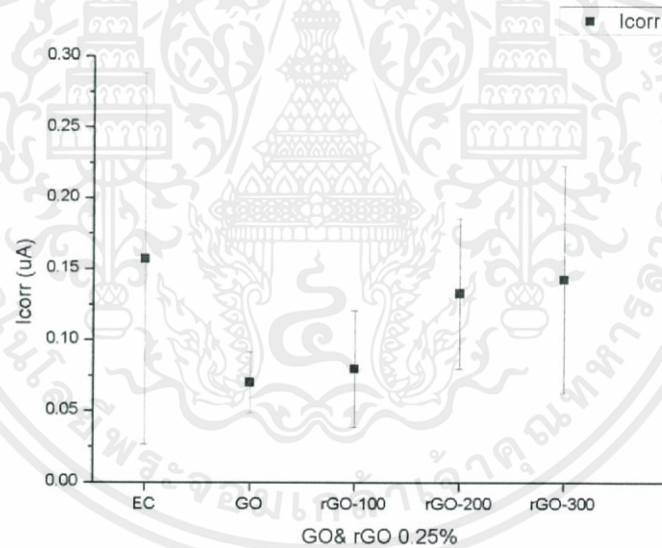
ผลการทดสอบความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนเอทิลเซลลูโลสซึ่งเติมแต่งด้วยหรือรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสในปริมาณที่แตกต่างกันพบว่าค่าของศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}) ที่ดีที่สุดคือ การไม่เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสลงไป ส่วนค่ากระแสกัดกร่อน (I_{corr}) ที่มีค่าต่ำที่สุดคือ การเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสลงไป 0.25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าอยู่ที่ $0.1427 \pm 0.07985 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ จึงได้ทำการเลือกเงื่อนไขการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสที่ 0.25 เปอร์เซ็นต์ไปใช้ ถึงแม้ว่าค่าของศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนจะต่ำกว่าการเคลือบเอทิลเซลลูโลสเพียงอย่างเดียวแต่อย่างไรก็ตามค่าของศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนก็ยังมีค่าติดลบนั้นหมายความว่าสามารถเกิดการกัดกร่อนขึ้นได้เองซึ่งความยากหรือง่ายในการกัดกร่อนก็ขึ้นอยู่กับค่าของศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน

4.5.3 การทดสอบการกัดกร่อนของเอทิลเซลลูโลสซึ่งได้ทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และ กราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

การทดสอบความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของสารเติมแต่งทั้งกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่อุณหภูมิ 100 และ 200 องศาเซลเซียสด้วยการผสมกับเอทิลเซลลูโลสในอัตราส่วน 0.25 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นเปอร์เซ็นต์ที่อ้างอิงมาจากผลการทดลองก่อนหน้านี้ซึ่งสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุดซึ่งได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.12, 4.13 และตารางที่ 4.6 ดังนี้



ภาพที่ 4.12 กราฟศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ย (E_{corr}) ของแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสซึ่งได้ทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และ กราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.13 กราฟกระแสกัดกร่อนเฉลี่ย (I_{corr}) ของแผ่นทองแดงเปลือยและแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และ กราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

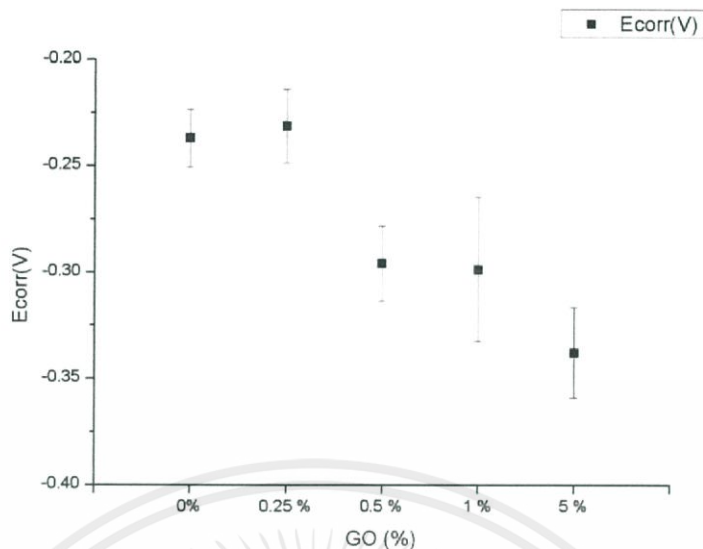
ตารางที่ 4.6 ศักย์ไฟฟ้ากักร่อน(E_{corr}), กระแสกักร่อน(I_{corr}) ของแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วย เอทิลเซลลูโลสทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และ กราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

GO & rGO	E_{corr} (V vs. Ag/AgCl)	SD	$I_{corr}(\mu A/cm^2)$	SD
EC (pure polymer)	-0.237	0.0135	0.1571	0.13051
GO	-0.231	0.0174	0.0701	0.02172
rGO 100 °C	-0.241	0.0246	0.0797	0.04113
rGO 200 °C	-0.276	0.0608	0.1328	0.05275
rGO 300 °C	-0.330	0.0598	0.1427	0.07985

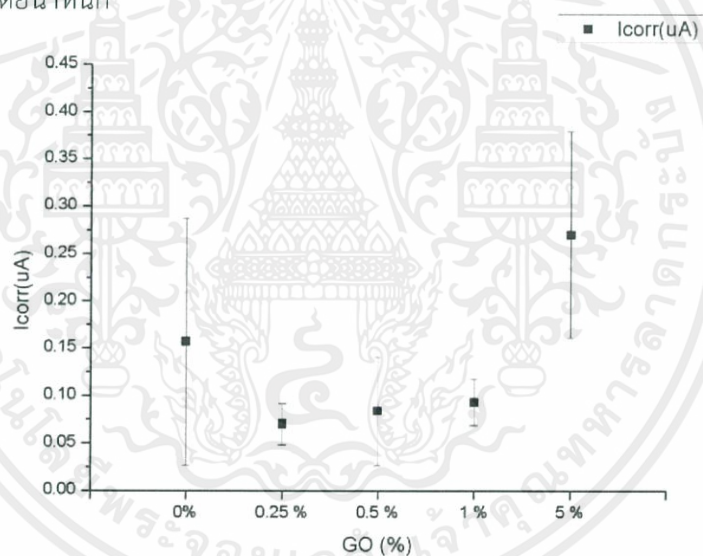
ผลการทดสอบความสามารถในการป้องกันการกักร่อนของสารเติมแต่งทั้งกราฟีนออกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ได้ทำการเผาในอุณหภูมิที่ต่างกันพบว่าค่าของศักย์ไฟฟ้ากักร่อน(E_{corr}) ของสารเติมแต่งที่ได้ทำการใส่ลงไปในเอทิลเซลลูโลสที่มีค่าที่สูงที่สุดหรือสามารถป้องกันการกักร่อนได้ดีที่สุดก็คือ กราฟีนออกไซด์ (GO) ซึ่งมีค่าอยู่ที่ -0.231 ± 0.0174 โวลต์ และกราฟีนออกไซด์ก็ยังมีค่ากระแสกักร่อน (I_{corr}) ที่น้อยที่สุดด้วย นั่นคือ $0.0701 \pm 0.02172 \mu A/cm^2$ จึงได้นำกราฟีนออกไซด์มาใช้งานในการทดลองต่อไปซึ่งการที่กราฟีนออกไซด์สามารถป้องกันการกักร่อนได้ดีกว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เนื่องจากว่ากราฟีนออกไซด์มีหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบไปด้วยออกซิเจนมากกว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ทำให้คุณสมบัติความเป็นฉนวนมากกว่าซึ่งกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ยากกว่าทำให้ป้องกันการกักร่อนได้มากกว่าและ [13] ในระยะยาวกราฟีนออกไซด์ก็สามารถป้องกันการกักร่อนได้ดีกว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

4.5.4 การทดสอบการกักร่อนของเอทิลเซลลูโลสซึ่งได้ทำการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.25, 0.5, 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

การทดสอบความสามารถในการป้องกันการกักร่อนของเอทิลเซลลูโลสที่ทำการเติมแต่งด้วยกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0, 0.25, 0.5, 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์ลงไปซึ่งได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.14, 4.15 และ ตารางที่ 4.7 ดังนี้



ภาพที่ 4.14 กราฟศักย์ไฟฟ้ากักร่อนเฉลี่ย (E_{corr}) ของแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสซึ่งได้ทำการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0, 0.25, 0.5, 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.15 กราฟกระแสกักร่อนเฉลี่ย (I_{corr}) ของแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสซึ่งได้ทำการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0, 0.25, 0.5, 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน(E_{corr}), กระแสกัดกร่อน(I_{corr}) ของแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสซึ่งได้ทำการเติมกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0, 0.25, 0.5, 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

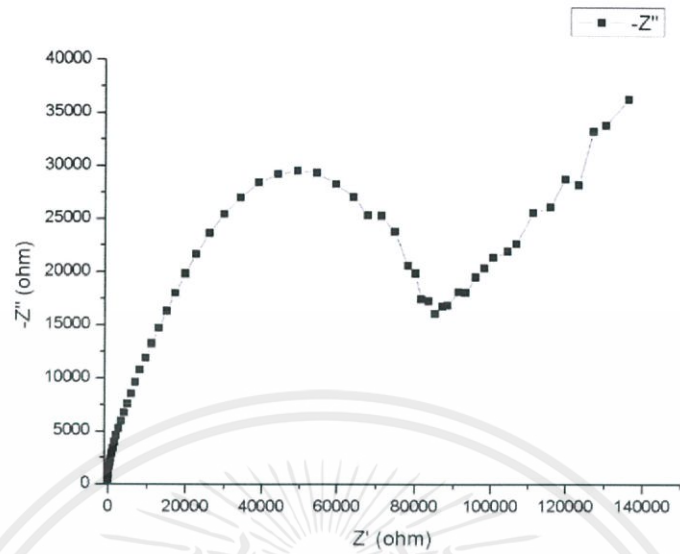
GO (%)	E_{corr} (V vs. Ag/AgCl)	SD	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	SD
0	-0.237	0.0135	0.1571	0.13051
0.25	-0.231	0.0174	0.0701	0.02172
0.5	-0.296	0.0176	0.0839	0.05739
1	-0.299	0.0338	0.0932	0.02470
5	-0.338	0.0212	0.2703	0.10871

ผลการทดสอบความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของเอทิลเซลลูโลสที่ทำการเติมแต่งด้วยกราฟีนออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกันพบว่าค่าของศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}) ที่ดีที่สุดก็คือการเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปในเอทิลเซลลูโลสในปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าอยู่ที่ -0.231 ± 0.0174 โวลต์ แล้วก็ยังมีค่ากระแสกัดกร่อน (I_{corr}) ที่น้อยที่สุดด้วยคือ $0.0701 \pm 0.02172 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ จึงสามารถสรุปผลการทดลองนี้ได้ว่า การเติมกราฟีนออกไซด์ปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์ลงไป ในเอทิลเซลลูโลสความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุด

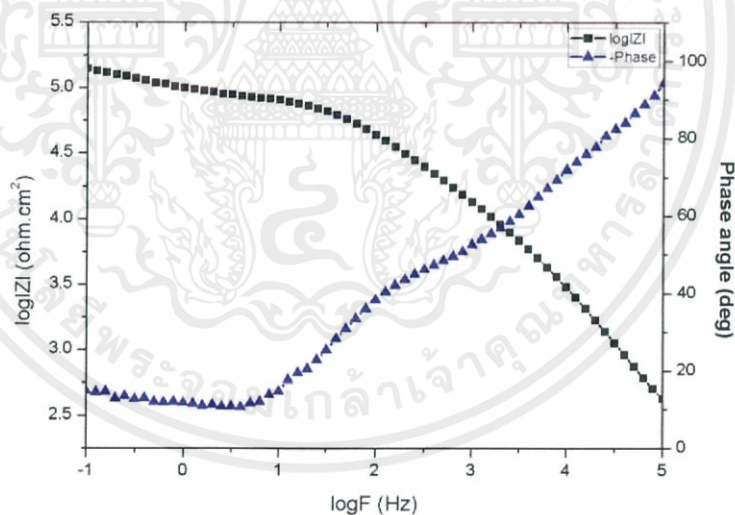
4.6 การวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงไฟฟ้าเคมี

กราฟที่ได้จากการวัดค่าอิมพีแดนซ์และมุมเฟสของการวัดแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสกับ กราฟีนออกไซด์ 0.25 เปอร์เซ็นต์และแหล่งในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์เป็นเวลา 1 ชั่วโมงได้ค่าดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 และเมื่อนำไปจำลองวงจรสมมูลจะได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนโดยมีทั้งค่าของตัวเก็บประจุซึ่งบ่งบอกถึงการเก็บประจุไว้ภายในชั้นฟิล์มที่เคลือบและค่าของตัวต้านทานซึ่งบ่งบอกถึงความต้านทานการเกิดการกัดกร่อนของชั้นฟิล์มที่เคลือบลงบนแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

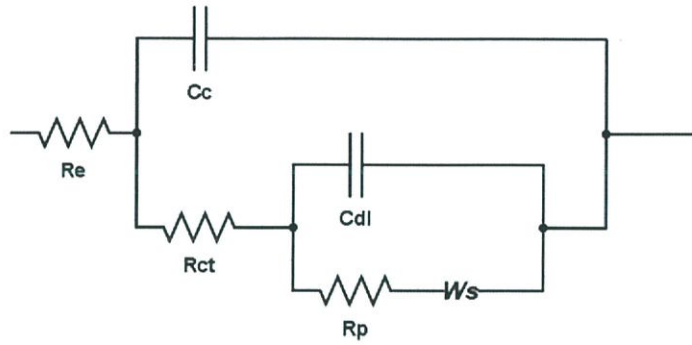


ภาพที่ 4.16 กราฟไนควิสต์ (Nyquist) ที่ได้จากการวัดแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลส กับ กราฟีนออกไซด์ 0.25 เปอร์เซ็นต์และแช่ลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

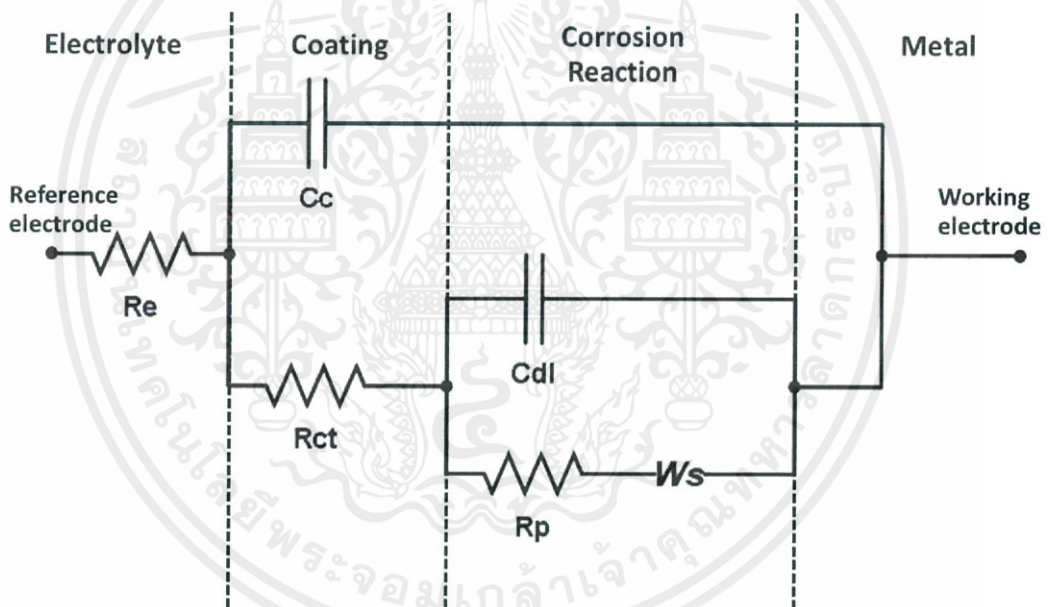


ภาพที่ 4.17 กราฟโบเด่ (Bode) แสดงค่าอิมพีแดนซ์และมุมเฟส (Phase angle) ที่ได้จากการวัดแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสกับกราฟีนออกไซด์ 0.25 เปอร์เซ็นต์และแช่ลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.18 วงจรสมมูลที่ได้จากการจำลองจากค่าของค่าอิมพีแดนซ์ของแผ่นทองแดงที่ทำการเคลือบด้วยเอทิลเซลลูโลสกับ กราฟีนออกไซด์ 0.25 เปอร์เซ็นต์และแช่ลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.5 เปอร์เซ็นต์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

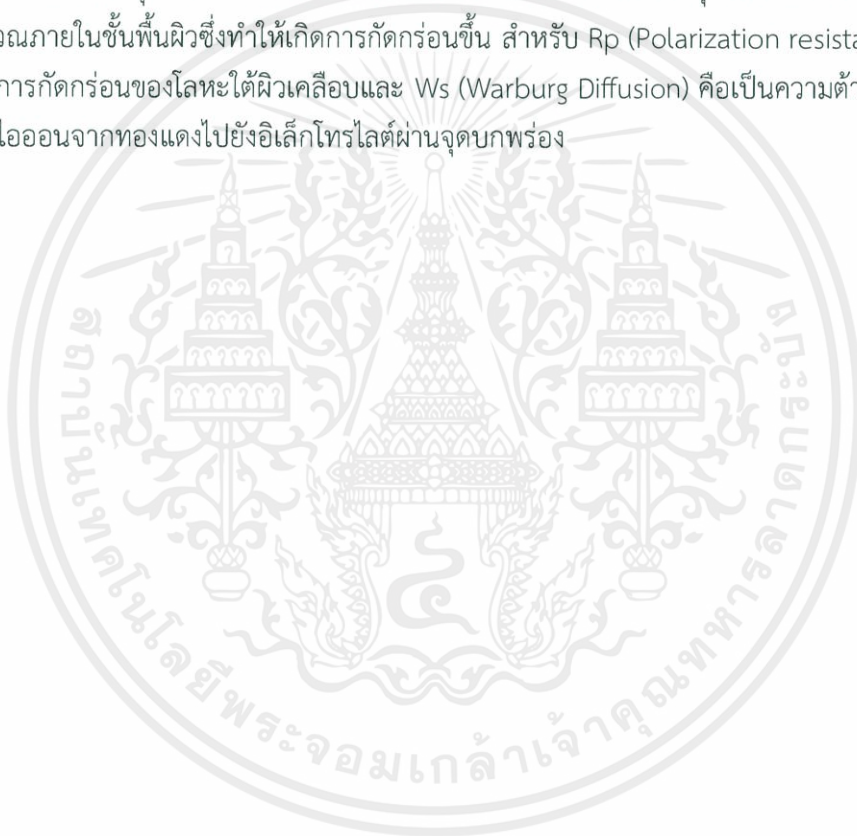


ภาพที่ 4.19 วงจรสมมูลและการเกิดปฏิกิริยาในแต่ละชั้นของตัวอย่างที่ใช้ในการเคลือบ

จากกราฟไนควิสและกราฟโบเต้สามารถจำลองการเกิดปฏิกิริยาการกัดกร่อนภายในของชิ้นงานได้ซึ่งจากกราฟไนควิส [22] จะเห็นได้ว่ามีส่วนของกราฟหลัก ๆ อยู่ 2 ส่วนคือส่วนของกราฟรูปครึ่งวงกลมและส่วนของกราฟที่เป็นเส้นตรงสำหรับในส่วนของกราฟที่เป็นครึ่งวงกลมเป็นผลรวมของการส่งผ่านของค่าความจุขนาดเล็ก (small charge transfer capacity) ระหว่างแผ่นทองแดงและชั้นออกไซด์และส่วนของกราฟที่เป็นเส้นตรงมีความสัมพันธ์กับค่าของความต้านทานการต่อต้านการแพร่ของสารที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนซึ่งสามารถจำลองจะอยู่ในรูปของวงจรสมมูลดังรูปที่ 4.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถนำมาตีความการเกิดปฏิกิริยาในแต่ละชั้นของฟิล์มได้ดังรูปที่ 4.19 ซึ่ง R_e (Electrolyte resistance) ก็คือความต้านทานความต้านทานของตัวอิเล็กโทรไลต์หรือสารละลายระหว่างขั้วทำงาน (Working electrode) และขั้วอ้างอิง (Reference electrode) ซึ่งเป็นชั้นของอิเล็กโทรไลต์และต่อมาคือชั้นของการเคลือบก็จะมี C_c (Coating Capacitance) คือค่าของความจุของสารเคลือบ และ R_{ct} (Charge transfer resistance) คือค่าของความต้านทานการถ่ายโอนประจุระหว่างพื้นผิวของโลหะและอิเล็กโทรไลต์ซึ่งสำหรับในงานนี้ค่า C_c และ R_{ct} มีความสัมพันธ์กับกราฟนอกไซด์และ โพสิเมอร์ที่ปกคลุมพื้นผิวที่สามารถป้องกันการเกิดการกัดกร่อนได้จากยับยั้งกันแทรกซึมของสารที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนไม่ว่าจะเป็นน้ำหรือพวกคลอไรด์ไอออนต่าง ๆ และในส่วนต่อมาเป็นส่วนของปฏิกิริยาการเกิดการกัดกร่อนจะมี C_{dl} (Double layer capacitance) หรือค่าของความจุของประจุในฝั่งของขั้วโลหะและประจุของอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งค่า C_{dl} จะเพิ่มขึ้นต่อเมื่อมีประจุหรือว่าอิเล็กโทรไลต์เข้ามายังบริเวณภายในชั้นพื้นผิวซึ่งทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น สำหรับ R_p (Polarization resistance) คืออัตราของการกัดกร่อนของโลหะใต้ผิวเคลือบและ W_s (Warburg Diffusion) คือเป็นความต้านทานการแพร่ของไอออนจากทองแดงไปยังอิเล็กโทรไลต์ผ่านจุดบกพร่อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากการศึกษาการเคลือบป้องกันการกัดกร่อนของโลหะโดยใช้พอลิเมอร์และสารเติมแต่งเป็นกราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในเงื่อนไขอุณหภูมิต่าง ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 การสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จากกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการทางความร้อน

สำหรับการสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จากกราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการทางความร้อนหรือวิธีการเผาพบว่าสมบัติของสารเปลี่ยนไปดังนี้

1. ปริมาณของคาร์บอนเกิดการหายไปด้วยเช่นกันอาจเกิดจากการถูกทำลายของโครงสร้างในระหว่างการให้ความร้อน
2. หมู่ฟังก์ชันที่ประกอบไปด้วยออกซิเจนไม่ได้ลดลงทุกหมู่ฟังก์ชัน หมู่ ไฮดรอกซิล (R-OH) เกิดการเพิ่มขึ้นเพื่อมีการให้อุณหภูมิการเผาที่มากขึ้นเนื่องจากอาจเกิดจากการสร้างพันธะใหม่ที่มีความเสถียรมากขึ้น

5.2 เอทิลเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุด

เอทิลเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุดเนื่องจากสามารถในการละลายเข้ากับตัวทำละลายได้ค่อนข้างดีซึ่งทำให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและมีแรงยึดเหนี่ยวที่ติดอกทั้งโครงสร้างของพันธะมีความเสถียรและแข็งแรงและมีหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบไปด้วยออกซิเจนซึ่งทำให้เป็นฉนวนหรือทำหน้าไฟฟ้าได้แย่งอีกด้วย

5.3 การใส่สารเติมแต่งในพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดี

การใส่สารเติมแต่งลงไปควรใส่ในปริมาณที่เหมาะสมไม่ควรมากจนเกินไปเพราะจะทำให้เกิดการกระจายตัวได้ไม่ทั่วถึงหรือไม่สม่ำเสมอทำให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนแย่งอีกด้วยและการใส่สารเติมแต่งในปริมาณที่มากทำให้กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เกิดการแตกตัวได้น้อยลงหรือเกิดการจับตัวเป็นก้อนขึ้นทำให้สมบัติการป้องกันการกัดกร่อนแย่งอีกด้วยเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การป้องกันการกัดกร่อนของกราฟีนออกไซด์

กราฟีนออกไซด์เป็นสารเติมแต่งที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้มากที่สุดในทุกสารเติมแต่งเนื่องจาก

1. ความเป็นฉนวนหรือว่ามีหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบไปด้วยออกซิเจนค่อนข้างมากทำให้การนำไฟฟ้าแย่งทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปสู่ชั้นของโลหะได้ยากมากยิ่งขึ้น
2. การแตกตัวและการกระจายตัว กราฟีนออกไซด์มีลักษณะทางกายภาพที่มีความเป็นแผ่นขนาดเล็กมากกว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์แต่งชนิดอื่นที่มีลักษณะเป็นก้อนมากยิ่งขึ้นเมื่อทำการเผาในอุณหภูมิที่สูงมากยิ่งขึ้นทำให้มีพื้นที่ผิวค่อนข้างสูง และอีกทั้งการกระจายตัวของกราฟีนออกไซด์ค่อนข้างที่จะสม่ำเสมอมากกว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ทำให้สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ค่อนข้างสม่ำเสมอและมีประสิทธิภาพกว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

5.5 เอทิลเซลลูโลสเติมแต่งด้วยกราฟีนออกไซด์ในปริมาณร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุด

เอทิลเซลลูโลสสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุดและเมื่อทำการผสมกับกราฟีนออกไซด์ในปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่าสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุดในงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งพบว่าค่าของศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเพิ่มสูงขึ้นถึง 1.49 เเทาและค่ากระแสไฟฟ้ากัดกร่อนลดลงถึง 380.14 เเทาและทำให้อัตราการกัดกร่อนต่อปี(Corrosion rate) ลดลงจาก 0.3090 มิลลิเมตรต่อปี เหลือเพียง 0.0008 มิลลิเมตรต่อปี

บรรณานุกรม

- [1] Pierre R. Roberge. 2008. **Corrosion Cost to Society**. [Online]. Available : <https://corrosion-doctors.org/Principles/Cost.htm>.
- [2] Denny A. Jones. 1996. **Principles and Prevention of Corrosion**. 2nd ed. United States of America : Prentice-Hall. 5-7, 9-19
- [3] Tim Keane. 2018. **5 Way to Prevent Corrosion of Metal Parts**. [Online]. Available : <https://plastico.ca/blog/prevent-corrosion-metal-parts.htm>.
- [4] Pierre R. Roberge. 2012. **Handbook of Corrosion Engineering**. 2nd ed. United States of America : The McGraw-Hill. 799-827
- [5] *Chemical Retrieval on the Web*. 2015. **Polymerdatabase**. [Online]. Available : <https://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Intro.html>.
- [6] Pierre R. Roberge. 2012. **Handbook of Corrosion Engineering**. 2nd ed. United States of America : The McGraw-Hill. 871-890
- [7] TCI Deutschland GmbH. 2015. **Graphene Oxide**. [Online]. Available : <https://www.tcichemicals.com/en/li/support-download/tcimap/application/167-06.html>
- [8] Chen, D., Feng, H., Li, J. 2012. "Graphene Oxide: Preparation, Functionalization and Electrochemical Applications." **ACS Publications**. 112 : 6027-6053
- [9] A. Bard, L. Faulkner 2011. **Electrochemical Methods – Fundamental and Applications**, 2nd Edition, John Wiley and sons
- [10] NPTEL Web Course. 1012. **Polarization Techniques – Corrosion Rate Determination**. [Online]. Available : <https://nptel.ac.in/courses/113108051/>.
- [11] Denny A. Jones. 1996. **Principles and Prevention of Corrosion**. 2nd ed. United States of America : Prentice-Hall. 109-113
- [12] Gammy Instruments. 2017. **Basics of Electrochemical Impedance Spectroscopy**. [Online]. Available : <https://www.gamry.com/application-notes/EIS/basics-of-electrochemical-impedance-spectroscopy/>.

- [13] Rajabi, M., Rashed, G. R., Zaarei, D. 2014. “ Assessment of graphene oxide/epoxy nanocomposite as corrosion resistance coating on carbon steel.” **Corrosion Engineering, Science and Technology**. 000 : 1-8
- [14] Ghauri, A. F., Raza, A. M., Baig, S. M., Ibrahim, S. 2017. “ Corrosion study of the graphene oxide and reduced graphene oxide based epoxy coatings.” **Materials Research Express**. 4 : 1-21
- [15] Krishnamoorthy, K., Jeyasubramanian, K., Premanathan, M., Subbiah, G., Shin, S. H., Kim, J. S. 2014. “ Graphene oxide nanopaint.” **Elsevier**. 72 : 328-337
- [16] Mohammed, A., Sammarraie, A. A., Raheema, H. M. 2016. “ Reduced Graphene Oxide Coating for Corrosion Protection Enhancement of Carbon Steel in Sea water.” **Iraqi Journal of Science**. 243-250
- [17] Xie, Y., Chen, M., Xie, D., Zhong, L., Zhang, X. 2017. “ A fast, low temperature zinc phosphate coating on steel accelerated by graphene oxide.” **Corrosion Science**. 128 : 1-8
- [18] Perumbilavil, S., Sankar, P., Thankamani, R. P., Philip, R. 2015. “ White light Z-scan measurements of ultrafast optical nonlinearity in reduced graphene oxide nanosheets in the 400–700 nm region.” **Applied Physics Letters**. 107(5) : 051104-1 - 051104-5
- [19] Emiru, F. T., Ayele, W. D. 2017. “Controlled synthesis, characterization and reduction of graphene oxide: A convenient method for large scale production.” **Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences**. 4(1) : 74-79
- [20] Juhra, T. F., Lee, W. J., Jung, G. W. 2013. “Facile and safe graphene preparation on solution based platform.” **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. 20(5) : 2883-2887
- [21] Arukalam, O., Madufor, C. I., Ogbobe, O., Oguzie, E. E. 2014 “Acidic Corrosion Inhibition of Copper by Hydroxyethyl Cellulose.” **British Journal of Applied Science & Technology**. 4(9) : 1445-1460
- [22] Krishnan, A. M., Aneja, S. K., Shaikh, A., Bohm, S., Sarkar, K., Bohm, M., and Raja, S. V. 2018 “Graphene-based anticorrosive coatings for copper.” **Royal Society of Chemistry**. 8 : 499-507

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล นายฤทธิเกียรติ วัลย์ดาว

วัน เดือน ปีเกิด 3 พฤศจิกายน พ.ศ. 2539

ที่อยู่ 181 หมู่ 3 ตำบล โพธิ์เสด็จ อำเภอ เมือง จังหวัด นครศรีธรรมราช

การศึกษา (2555) โรงเรียนเบญจมราชูทิศ นครศรีธรรมราช

(2558) วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุโนโน วิทยาลัยนาโนพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้