



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การประดิษฐ์สารหน่วงการกัดกร่อนแบบดูดซับความชื้น

โดย นายอภิชน เสาวรส

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

22 มีนาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ ผังวิวัฒน์)

กรรมการ

(ดร.ธนศาสตร์ สุขศรีเมือง)

กรรมการ

(ดร.วนิดา พงศ์ศักดิ์สวัสดิ์)

การประดิษฐ์สารหน่วงการกัดกร่อนแบบดูดซับความชื้น

นายอภิชน เสาวรศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายอภิชน เสาวรส
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การประดิษฐ์สารหน่วงการกัดกร่อนแบบดูดซับความชื้น
สาขาวิชา : วัสดุศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ ผังวิวัฒน์
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

สิ่งทีแวดล้อมมีผลกระทบต่อการกัดกร่อนของโลหะ โดยเฉพาะความชื้นในอากาศ น้ำธรรมชาติ น้ำบริสุทธิ์ น้ำกลั่น น้ำที่มีไอออนต่างๆ หรือน้ำทะเล เป็นต้น ซึ่งสิ่งแวดล้อมเหล่านี้เป็นสาเหตุที่ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนได้ทั้งนั้น ขึ้นอยู่กับว่าจะนำวัสดุไปใช้งานในสภาวะใด

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุผสมที่มีคุณสมบัติในการดูดซับความชื้น เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้งานในด้านการหน่วงการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอน โดยใช้แร่ดินขาว (Kaolinite) ทำการกราฟท์กับแป้งมันและอะครายลาไมด์ (Acrylamide) แล้วนำมาผสมกับส่วนของ Cr(III) – thiourea – polyacrylamide ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับความชื้นเช่นเดียวกัน จากนั้นนำวัสดุผสมที่ได้ไปเคลือบบนผิวของแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SK5 เพื่อทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้นและการหน่วงการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับเหล็กกล้าคาร์บอน ภายใต้สภาวะความชื้นที่สูง ($85\% \pm 5\%$) เมื่อดูผลจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณองค์ประกอบต่างๆของวัสดุผสม เช่น โพลีอะครายลาไมด์, โปดัสเซียมไดโครเมต และตัวริเริ่มปฏิกิริยาการกราฟท์ (ซีริกแอมโมเนียมไนเตรด) ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับความชื้นและการหน่วงการกัดกร่อน พบว่า ปริมาณของ โพลีอะครายลาไมด์, โปดัสเซียมไดโครเมต และตัวริเริ่มปฏิกิริยาการกราฟท์ที่เหมาะสมที่สุด คือ 1.76 %, 3.53 % และ 1.93 % ตามลำดับ โดยมีการทดสอบหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ไม่มีการเคลือบเทียบกับเหล็กกล้าคาร์บอนที่เคลือบวัสดุผสม หลังจากที่ตั้งทิ้งไว้ในบริเวณที่มีความชื้นสูงและเป็นเวลานาน โดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอไดนามิก พบว่า เหล็กกล้าคาร์บอนที่เคลือบวัสดุผสมมีอัตราการกัดกร่อนลดลงเป็นอย่างมาก โดยเหล็กกล้าคาร์บอนที่ไม่มีการเคลือบ มีอัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น 32.20 % ในขณะที่เหล็กกล้าคาร์บอนที่เคลือบวัสดุผสมมีอัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเพียง 8.00 % เท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาทดสอบที่ยาวนานขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุผสมมีส่วนช่วยหน่วงการกัดกร่อนในสภาวะที่ทดสอบได้

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนหน้าทั้งสิ้น 161 หน้า)

คำสำคัญ : สารหน่วงการกัดกร่อนแบบดูดซับความชื้น, วัสดุผสม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr.Apithon Saovaros
Thesis Title : Fabrication of Moisture Absorption Inhibitor for Steel
Major Field : Material Science
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Assistant Professor Dr.Narong Pungwiwat
Academic Year : 2006

Abstract

Environments around metal have influence on corrosion of the metal especially humidity, natural water, pure water, distilled water, aqueous ionic solution or sea water. These environments can cause corrosion which depends on the stage of application.

This research aimed to study composite material which has moisture absorption property for the advantage of inhibition of steel corrosion. (composed of kaolinite grafting with starch and acrylamide mixed with a mixture of Cr(III) – thiourea – polyacrylamide) the composite also has property of moisture absorption. After coating the composite on carbon steel grade SK5, moisture absorption and corrosion inhibition of the steel were investigated. Under high relative humidity ($85\% \pm 5\%$) it was found that varied amount of some components of the composite such as polyacrylamide, potassium dichromate and grafting initiator (i.e., ceric ammonium nitrate) had effects on moisture absorption and corrosion inhibition. The optimum amounts of polyacrylamide, potassium dichromate and grafting initiator were 1.76 %, 3.53 % and 1.93 %, respectively. Evaluation of corrosion rate of bare carbon steels compared with composite coated carbon steels after keeping these specimens under high relative humidity for a period of time indicated potentiodynamically that composite coated carbon steels showed greatly reduction of the corrosion rates. While bare carbon steel had increasing corrosion rate up to 32.20 %, composite coated carbon steel corrosion rate increased only 8.00 % after keeping these samples to a longer period of time which is suggested that the composite plays an important role in corrosion inhibition under testing condition.

(Total 161 pages)

Keywords : Moisture absorption inhibitor, Composite material

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การประดิษฐ์สารหน่วงการกัดกร่อนแบบดูดซับความชื้น สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ ผังวิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นความรู้และเป็นประโยชน์ต่อการวิจัย ตลอดจนติดตามผลการดำเนินงานตั้งแต่เริ่มต้นจนเสร็จสิ้นการวิจัย จนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ด้วยดี และทุนการวิจัยทั้งหมดได้รับการสนับสนุนจากสภาวิจัยแห่งชาติ และสำนักงานประมาณ จึงขอขอบพระคุณสภาวิจัยแห่งชาติ และสำนักงานประมาณ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนการวิจัย ในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของหน่วยงานทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านสถานที่และอุปกรณ์การดำเนินการวิจัย ตลอดจนขอขอบพระคุณกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาตรวจสอบและให้ข้อคิดเห็นต่อการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์แบบมากยิ่งขึ้น

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนในด้านการเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

อภิชน เสาวรศ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	6
1.5 วิธีการวิจัย	6
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
บทที่ 2 ทฤษฎี	11
2.1 การกัดกร่อน (Corrosion)	11
2.2 การกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่เป็นน้ำและสารละลายของน้ำ	12
2.3 การใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนและการเคลือบผิวด้วยโพลีเมอร์	15
2.4 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า	16
2.5 ความหนืด	18
2.6 การวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด	20
2.7 ดินขาว	23
2.8 โพลีอะครายลาไมด์	26
2.9 เหล็กกล้าคาร์บอน	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การทดลอง	35
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	35
3.2 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ	35
3.3 การเตรียมวัสดุผสมเพื่อเป็นผิวเคลือบ	36
3.4 การเตรียมแผ่นเหล็กที่ใช้ในการทดลอง	40
3.5 การเคลือบแผ่นเหล็ก	42
3.6 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้น	44
3.7 การทดสอบความสามารถในการยึดติดและการบวมตัว	45
3.8 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า	45
3.9 การถ่ายภาพผิวหน้าชิ้นงานตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์	46
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	47
4.1 ผลการตรวจสอบปฏิกิริยาการกราฟท์	47
4.2 ผลการทดสอบความหนืดของโพลีอะครายลาไมด์	51
4.3 ผลการทดลองความสามารถในการดูดซับความชื้นของสารเคลือบ	53
4.4 ผลการทดสอบความสามารถในการยึดติดและการบวมตัว	60
4.5 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กที่เคลือบวัสดุผสม	65
4.6 ผลการตรวจผิวเหล็กหลังจากการทดสอบ	117
บทที่ 5 วิจารณ์ผลการทดลอง	129
5.1 ผลจากการตรวจสอบปฏิกิริยาการกราฟท์	129
5.2 ผลการทดสอบความหนืดของโพลีอะครายลาไมด์	131
5.3 ผลการทดสอบความสามารถการดูดซับความชื้นของวัสดุผสม	131
5.4 ผลการทดสอบความสามารถในการยึดติดและการบวมตัว	133
5.5 ผลการทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กที่เคลือบวัสดุผสม	134
5.6 ผลการตรวจพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบและทดสอบการกัดกร่อนแล้ว	135
5.7 ผลของดินขาวที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของวัสดุผสม	136
5.8 ผลของโปตัสเซียมไดโครเมตที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของวัสดุผสม	137
5.9 ผลของโพลีอะครายลาไมด์ที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของวัสดุผสม	138
5.10 ผลของตัวริเริ่มที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของวัสดุผสม	142

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	147
6.1 สรุปผลการทดลอง	147
6.2 ประโยชน์ของสารหน่วงการกัดกร่อนแบบดูดซับความชื้น	148
6.3 ข้อเสนอแนะ	149
เอกสารอ้างอิง	151
ภาคผนวก ก	
การเทียบปรับมาตรฐานอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	155
ภาคผนวก ข	
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิก	157
ประวัติผู้วิจัย	161

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SK5	41
4-1 แสดงหมู่ฟังก์ชันน้ำตาลและตำแหน่งฟิสิกส์ที่ปรากฏของดินขาวและแป้งมัน	49
4-2 แสดงหมู่ฟังก์ชันน้ำตาลและตำแหน่งฟิสิกส์ที่ปรากฏของอะครายลาไมด์ และผลิตภัณฑ์จากการกราฟท์	50
4-3 แสดงผลการทดสอบความหนืดของโพลีอะครายลาไมด์ หน่วยเป็นวินาที	51
4-4 แสดงผลการทดสอบความหนืดของโพลีอะครายลาไมด์ หน่วยเป็น cSt	52
4-5 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการยึดติดและการบวมตัว	63
4-6 แสดงของประกอบของวัสดุผสมที่เคลือบผิวเหล็ก	65
4-7 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 0.00% และโปตัสเซียมไดโครเมต 0.00% (10 วัน)	66
4-8 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 1.76% และโปตัสเซียมไดโครเมต 3.53% (10 วัน)	67
4-9 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 1.76% และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.80% (10 วัน)	68
4-10 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 1.76% และโปตัสเซียมไดโครเมต 0.91% (10 วัน)	69
4-11 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 1.76% และโปตัสเซียมไดโครเมต 0.00% (10 วัน)	70
4-12 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่างกัน ทั้งไว้เป็นเวลา 10 วัน	72
4-13 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 3.47% และโปตัสเซียมไดโครเมต 3.53% (10 วัน)	75
4-14 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 5.11% และโปตัสเซียมไดโครเมต 3.53% (10 วัน)	76
4-15 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีปริมาณโพลีอะครายลาไมด์ต่างกัน ทั้งไว้เป็นเวลา 10 วัน	78

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-16 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีเอครายลาไมด์ 0.00% และ โปดัสเซียมไดโครเมต 0.00% (20 วัน)	81
4-17 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีเอครายลาไมด์ 1.76% และ โปดัสเซียมไดโครเมต 3.53% (20 วัน)	82
4-18 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีเอครายลาไมด์ 1.76% และ โปดัสเซียมไดโครเมต 1.80% (20 วัน)	83
4-19 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีเอครายลาไมด์ 1.76% และ โปดัสเซียมไดโครเมต 0.91% (20 วัน)	84
4-20 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีเอครายลาไมด์ 1.76% และ โปดัสเซียมไดโครเมต 0.00% (20 วัน)	85
4-21 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีปริมาณโปดัสเซียมไดโครเมตต่างกัน ทั้งไว้เป็นเวลา 20 วัน	87
4-22 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีเอครายลาไมด์ 3.47% และ โปดัสเซียมไดโครเมต 3.53% (20 วัน)	90
4-23 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีเอครายลาไมด์ 5.11% และ โปดัสเซียมไดโครเมต 3.53% (20 วัน)	91
4-24 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีปริมาณโพลีเอครายลาไมด์ต่างกัน ทั้งไว้เป็นเวลา 20 วัน	93
4-25 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีเอครายลาไมด์ 0.00% และ โปดัสเซียมไดโครเมต 0.00% (30 วัน)	96
4-26 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีเอครายลาไมด์ 1.76% และ โปดัสเซียมไดโครเมต 3.53% (30 วัน)	97
4-27 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีเอครายลาไมด์ 1.76% และ โปดัสเซียมไดโครเมต 1.80% (30 วัน)	98
4-28 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีเอครายลาไมด์ 1.76% และ โปดัสเซียมไดโครเมต 0.91% (30 วัน)	99

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-29 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 1.76% และโปตัสเซียมไดโครเมต 0.00% (30 วัน)	100
4-30 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่างกัน ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 วัน	102
4-31 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 3.47% และโปตัสเซียมไดโครเมต 3.53% (30 วัน)	105
4-32 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 5.11% และโปตัสเซียมไดโครเมต 3.53% (30 วัน)	106
4-33 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีปริมาณโพลีอะครายลาไมด์ต่างกัน ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 วัน	108
4-34 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเปล่า ทิ้งไว้ 10 วัน	111
4-35 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเปล่า ทิ้งไว้ 20 วัน	111
4-36 แสดงผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเปล่า ทิ้งไว้ 30 วัน	112
4-37 แสดงผลการทดสอบหาค่าอัตราการกัดกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิก	113
5-1 แสดงผลการตรวจสอบปฏิกิริยาการกราฟต์ดินขาว แป้งมัน และอะครายลาไมด์ ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี	129
5-2 แสดงขั้นตอนของกระบวนการการเกิดดินขาว	136
5-3 แสดงผลสรุปของโปตัสเซียมไดโครเมตในวัสดุผสมที่เคลือบผิวเหล็ก	137
5-4 แสดงผลสรุปของโพลีอะครายลาไมด์ ในวัสดุผสมที่เคลือบผิวเหล็ก	138

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 แสดงโครงสร้างของดินขาว	3
1-2 แสดงขั้นตอนการดำเนินการงานวิจัย	8
2-1 การเปลี่ยนจากสินแร่สู่โลหะและการเปลี่ยนย้อนกลับจากโลหะสู่สินแร่	11
2-2 แผนภาพโพแทสเซียม	12
2-3 อันตรกิริยาของน้ำกับผิวโลหะ	13
2-4 การเกิดการกัดกร่อนจากน้ำ (Water corrosion) ตาม Bockris mechanism	13
2-5 การเกิดฟิล์มป้องกันการกัดกร่อนจากอันตรกิริยาของน้ำ (Water passivation)	14
2-6 วงจรและเซลล์เคมีไฟฟ้าสำหรับทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานตัวอย่าง	16
2-7 ผลการทดสอบจากเทคนิค Potentiodynamic Polarization	17
2-8 ตัวอย่าง Viscometer แบบ Cannon-Fenske Routine สำหรับน้ำมันชนิดโปร่งแสง	19
2-9 แสดงภาพอ่างควบคุมอุณหภูมิ, Viscometer และลักษณะเมื่อใช้งาน	19
2-10 แสดงเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด	20
2-11 แผนผังแสดงส่วนประกอบของ Fourier Transform Infrared Spectrometer	23
2.12 แสดงลักษณะภายนอกของดินขาว	23
2.13 แสดงโครงสร้างของดินขาว	25
2-14 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ของอะครายลาไมด์โคโพลิเมอร์	27
2-15 แสดงโครงสร้างของโพลีอะครายลาไมด์	28
2-16 แสดงลักษณะของโพลีอะครายลาไมด์ก่อนและหลังการดูดน้ำ	29
2-17 แสดงลักษณะโมเลกุลของโพลีอะครายลาไมด์ก่อนแช่น้ำและหลังแช่น้ำ	29
2-18 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนต่างกัน	32
2-19 แสดงตัวอย่างชิ้นส่วนและผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโลหะในกลุ่มเหล็ก	33
3-1 แสดงชุดทดลองในการกราฟที่ดินขาว-แป้งมันกับอะครายลาไมด์	37
3-2 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์โพลีอะครายลาไมด์	38
3-3 แสดงผลการทดสอบด้วยเทคนิคอิมมูโนสแนปโครสโกปี	
เพื่อหาค่าประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน	40
3-4 แสดงแผ่นเหล็กที่เตรียมได้ก่อนการทดสอบ	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-5 แผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม แป้งมัน 3.00 กรัม โพลีอะครายลาไมด์ 0.00% และ โปตัสเซียมไดโครเมต 0.00 กรัม (0.00 %)	42
3-6 แผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %) , กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และ โปตัสเซียมไดโครเมต (ก)1.00 กรัม (3.53 %) (ข) 0.50 กรัม (1.80 %), (ค) 0.25 กรัม (0.91 %) และ (ง) 0.00 กรัม (0.00 %)	43
3-7 แผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม แป้งมัน 3.00 กรัม กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม, โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (3.53 %) และโพลีอะครายลาไมด์ (ก) 1.50 กรัม (5.11 %) , (ข) 1.00 กรัม (3.47 %)	43
3-8 แสดงการต่ออุปกรณ์สำหรับทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน	45
3-9 ชุดถ่ายภาพพิกัดด้วยกล้องจุลทรรศน์ Olympus BX 60M	46
4-1 แสดง IR spectrum ของ (ก) ดินขาว, (ข) แป้งมัน (ค) อะครายลาไมด์ และ (ง) ผลิตภัณฑ์จากการกราฟท์	47
4-2 แสดงน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่ประกอบด้วย (ก) ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 1.00 กรัม , กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และ โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (ข) ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, ไม่เติมโพลีอะครายลาไมด์ , กรดฟอร์มิก , ไทโอยูเรีย , และ โปตัสเซียมไดโครเมต โดยควบคุมความชื้นไว้ที่ 85 %	53
4-3 แสดงน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่ประกอบด้วย ดินขาว 2.00 กรัม แป้งมัน 3.00 กรัม , กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และ โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม โดยมีปริมาณโพลีอะครายลาไมด์เป็น(ก) 1.50 กรัม (5.11 %) , (ข) 1.00 กรัม (3.47 %) และ (ค) 0.50 กรัม (1.76 %) โดยควบคุมความชื้นไว้ที่ 85 %	55

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-4 แสดงน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่ประกอบด้วย ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม, กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร และไทโอยูเรีย 1.20 กรัม โดยมีปริมาณโปดัสเซียมไดโครเมต เป็น (ก) 0.00 กรัม (0.00 %) , (ข) 0.25 กรัม (0.91 %) , (ค) 0.50 กรัม (1.80 %) , (ง) 1.00 กรัม (3.53 %) และ (จ) 1.50 กรัม (5.20 %) โดยควบคุมความชื้นไว้ที่ 85 %	57
4-5 แสดงน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่ประกอบด้วย ดินขาว 2.00 กรัม แป้งมัน 3.00 กรัม โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม , กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปดัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม โดยมีปริมาณตัวริเริ่มเป็น (ก) 0.45 กรัม (1.59 %) , (ข) 0.55 กรัม (1.93 %) และ (ค) 0.65 กรัม (2.29 %) โดยควบคุมความชื้นไว้ที่ 85 %	59
4-6 การทดสอบการบวมตัวในน้ำของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่มีส่วนประกอบ ของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.00 กรัม (0.00 %)	61
4-7 การทดสอบการบวมตัวในน้ำของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่มีส่วนประกอบ ของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %) , กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปดัสเซียมไดโครเมต (ก) 1.00 กรัม (3.53 %) , (ข) 0.50 กรัม (1.80 %) , (ค) 0.25 กรัม (0.91 %) และ (ง) 0.00 กรัม (0.00 %)	61
4-8 การทดสอบการบวมตัวในน้ำของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่มีส่วนประกอบ ของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม, โปดัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (3.53 %) และ โพลีอะครายลาไมด์ (ก) 1.00 กรัม (3.47 %) , (ข) 1.50 กรัม (5.11 %)	62
4-9 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 0.00% และโปดัสเซียมไดโครเมต 0.00% (10 วัน)	66
4-10 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 1.76% และโปดัสเซียมไดโครเมต 3.53% (10 วัน)	67
4-11 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 1.76% และโปดัสเซียมไดโครเมต 1.80% (10 วัน)	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-12 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 1.76% และโปตัสเซียมไดโครเมต 0.91% (10 วัน)	69
4-13 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 1.76% และโปตัสเซียมไดโครเมต 0.00% (10 วัน)	70
4-14 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเปล่าและแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่างกัน ทั้งไว้เป็นเวลา 10 วัน	71
4-15 แสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากักกร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อน ของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่างกัน โดยทั้งหมดควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 10 วัน	73
4-16 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 3.47% และโปตัสเซียมไดโครเมต 3.53% (10 วัน)	75
4-17 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 5.11% และโปตัสเซียมไดโครเมต 3.53% (10 วัน)	76
4-18 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเปล่าและแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีปริมาณโพลีอะครายลาไมด์ต่างกัน ทั้งไว้เป็นเวลา 10 วัน	77
4-19 แสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากักกร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อน ของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโพลีอะครายลาไมด์ต่างกัน โดยทั้งหมดควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 10 วัน	79
4-20 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 0.00% และโปตัสเซียมไดโครเมต 0.00% (20 วัน)	81
4-21 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 1.76% และโปตัสเซียมไดโครเมต 3.53% (20 วัน)	82
4-22 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 1.76% และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.80% (20 วัน)	83
4-23 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 1.76% และโปตัสเซียมไดโครเมต 0.91% (20 วัน)	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-24 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 1.76% และโปตัสเซียมไดโครเมต 0.00% (20 วัน)	85
4-25 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเปล่าและแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่างกัน ทั้งไว้เป็นเวลา 20 วัน	86
4-26 แสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อน ของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่างกัน โดยทั้งหมดควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 20 วัน	88
4-27 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 3.47% และโปตัสเซียมไดโครเมต 3.53% (20 วัน)	90
4-28 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 5.11% และโปตัสเซียมไดโครเมต 3.53% (20 วัน)	91
4-29 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเปล่าและแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีปริมาณโพลีอะครายลาไมด์ต่างกัน ทั้งไว้เป็นเวลา 20 วัน	92
4-30 แสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อน ของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโพลีอะครายลาไมด์ต่างกัน โดยทั้งหมดควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 20 วัน	94
4-31 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 0.00% และโปตัสเซียมไดโครเมต 0.00% (30 วัน)	96
4-32 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 1.76% และโปตัสเซียมไดโครเมต 3.53% (30 วัน)	97
4-33 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 1.76% และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.80% (30 วัน)	98
4-34 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 1.76% และโปตัสเซียมไดโครเมต 0.91% (30 วัน)	99
4-35 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 1.76% และโปตัสเซียมไดโครเมต 0.00% (30 วัน)	100

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-36 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเปล่าและแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่างกัน ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 วัน	101
4-37 แสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อน ของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่างกัน โดยทั้งหมดควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 30 วัน	103
4-38 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลิอะครายลาไมด์ 3.47% และโปตัสเซียมไดโครเมต 3.53% (30 วัน)	105
4-39 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีโพลิอะครายลาไมด์ 5.11% และโปตัสเซียมไดโครเมต 3.53% (30 วัน)	106
4-40 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเปล่าและแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีปริมาณโพลิอะครายลาไมด์ต่างกัน ทิ้งไว้เป็นเวลา 30 วัน	107
4-41 แสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อน ของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโพลิอะครายลาไมด์ต่างกัน โดยทั้งหมดควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 30 วัน	109
4-42 แสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อน ของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมและแผ่นเหล็กเปล่า โดยควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 10 วัน , 20 วัน และ 30 วัน ตามลำดับ	114
4-43 แสดงภาพพื้นผิวของเหล็กเปล่าชิ้นที่ 1. ที่ไม่มีการเคลือบ ทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 50 วัน (กำลังขยาย 50 เท่า)	117
4-44 แสดงภาพพื้นผิวของเหล็กเปล่าชิ้นที่ 2. ที่ไม่มีการเคลือบ ทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 50 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า)	117
4-45 แสดงภาพพื้นผิวของเหล็กเปล่าชิ้นที่ 3. ที่ไม่มีการเคลือบ ทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 50 วัน (กำลังขยาย 50 เท่า)	118
4-46 แสดงภาพพื้นผิวของเหล็กเปล่าชิ้นที่ 3. ที่ไม่มีการเคลือบ ทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 50 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า)	118

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-47 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม แล้วทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า) โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โพลิอะครายลาไมด์ 0.00 กรัม (0.00%) , โปดัสเซียมไดโครเมต 0.00 กรัม (0.00%) ตัวริเริ่ม 0.55 กรัม	119
4-48 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม แล้วทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า) โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โปดัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (3.53%) , ตัวริเริ่ม 0.55 กรัม โดยมีปริมาณโพลิอะครายลาไมด์เป็น (ก) 0.50 กรัม (1.76 %) (ข) 1.00 กรัม (3.47 %) และ (ค) 1.50 กรัม (5.11 %)	119
4-49 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม แล้วทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า) โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โพลิอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76%) , ตัวริเริ่ม 0.55 กรัม โดยมีโปดัสเซียมไดโครเมตเป็น (ก) 1.00 กรัม(3.53%), (ข) 0.50 กรัม(1.80%) (ค) 0.25 กรัม(0.91%) และ (ง) 0.00 กรัม(0.00%)	120
4-50 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม แล้วทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า) โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โพลิอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76%) , โปดัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (3.53%) โดยมีปริมาณตัวริเริ่มเป็น (ก) 0.45 กรัม (1.59 %) (ข) 0.55 กรัม (1.93 %) และ (ค) 0.65 กรัม (2.29 %)	121
4-51 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม แล้วทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 35 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า) โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โพลิอะครายลาไมด์ 0.00 กรัม (0.00%) , โปดัสเซียมไดโครเมต 0.00 กรัม (0.00%) ตัวริเริ่ม 0.55 กรัม	122

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-52 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม แล้วทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 35 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า) โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โปดัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (3.53%) , ตัวริเริ่ม 0.55 กรัม โดยมีปริมาณโพลิอะครายลาไมด์เป็น (ก) 0.50 กรัม(1.76 %) (ข) 1.00 กรัม(3.47 %) และ (ค) 1.50 กรัม(5.11 %)	122
4-53 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม แล้วทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 35 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า) โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โพลิอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76%) , ตัวริเริ่ม 0.55 กรัม โดยมีโปดัสเซียมไดโครเมตเป็น (ก) 1.00 กรัม(3.53%), (ข) 0.50 กรัม(1.80%) (ค) 0.25 กรัม(0.91%) และ (ง) 0.00 กรัม(0.00%)	123
4-54 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม แล้วทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 35 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า) โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โพลิอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76%) , โปดัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (3.53%) โดยมีปริมาณตัวริเริ่มเป็น (ก) 0.45 กรัม(1.59 %) (ข) 0.55 กรัม(1.93 %) และ (ค) 0.65 กรัม(2.29 %)	124
4-55 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม แล้วทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 50 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า) โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โพลิอะครายลาไมด์ 0.00 กรัม (0.00%) , โปดัสเซียมไดโครเมต 0.00 กรัม (0.00%) ตัวริเริ่ม 0.55 กรัม	125
4-56 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม แล้วทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 50 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า) โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โปดัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (3.53%) , ตัวริเริ่ม 0.55 กรัม โดยมีปริมาณโพลิอะครายลาไมด์เป็น (ก) 0.50 กรัม(1.76 %) (ข) 1.00 กรัม(3.47 %) และ (ค) 1.50 กรัม(5.11 %)	125

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-57 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม แล้วทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 50 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า) โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76%) , คาร์บอน 0.55 กรัม โดยมีโปดัสเซียมไดโครเมตเป็น (ก) 1.00 กรัม(3.53%), (ข) 0.50 กรัม(1.80%) (ค) 0.25 กรัม(0.91%) และ (ง) 0.00 กรัม(0.00%)	126
4-58 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม แล้วทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 50 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า) โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76%) , โปดัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (3.53%) โดยมีปริมาณคาร์บอนเป็น (ก) 0.45 กรัม(1.59 %) (ข) 0.55 กรัม(1.93 %) และ (ค) 0.65 กรัม(2.29 %)	127
5-1 แสดงภาพสเกตซ์ของการเกิด crosslink	130
5-2 แสดงภาพถ่ายดินขาวและดินขาวที่มีโพลีอะครายลาไมด์ผสมอยู่ 1.50 กรัม (5.11%) ที่ได้จากเครื่อง Scanning Electron Microscope (กำลังขยาย 3,000 เท่า)	141
5-3 แสดงกลไกการเร่งปฏิกิริยากราฟท์โคโพลิเมอไรเซชันของโพลีแซคคาไรด์ กับอะครายลาไมด์โมโนเมอร์ โดยซิริกไอออน	144

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการกัดกร่อนเกิดขึ้นรอบตัวเราอยู่เสมอ ไม่ว่าจะเป็นตัวถังรถยนต์ที่เกิดเป็นสนิมทั้งที่ใช้งานได้เพียงไม่นาน หรือวัสดุอุปกรณ์และโครงสร้างเหล็กชนิดต่างๆ ที่นำมาใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ที่ใช้ในสวน และอุปกรณ์ในครัวที่มีคราบสนิมเกิดขึ้นซึ่งมักจะปรากฏผลเสียในรูปแบบต่างๆ เช่น เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผิวของโลหะ โดยส่วนมากจะปรากฏเป็นคราบสนิมเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้สภาพผิวดำลงทั้งด้านคุณภาพของชิ้นงานและสภาพหรือรูปลักษณะภายนอกที่เห็น

สิ่งที่แวดล้อมโลหะล้วนมีผลกระทบต่อการกัดกร่อนทั้งสิ้น แตกต่างกันไปเพียงแต่มีฤทธิ์การกัดกร่อนที่ต่างกัน จึงทำให้เกิดความรุนแรงในการกัดกร่อนที่ต่างกัน สิ่งแวดล้อมเหล่านี้ ได้แก่ อากาศ ความชื้นในอากาศ น้ำธรรมชาติ น้ำบริสุทธิ์ น้ำกลั่น น้ำที่มีไอออนต่างๆ น้ำทะเล หรือสารละลาย เช่น กรดเกลือ กรดซัลฟูริก กรดไนตริก รวมถึงกรดอินทรีย์ต่างๆ เช่น กรดอะซิติก กรดซิตริก เป็นต้น ซึ่งสิ่งแวดล้อมเหล่านี้ เป็นสาเหตุที่ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนได้ทั้งนั้น ขึ้นอยู่กับว่าจะนำวัสดุไปใช้งานในสภาวะใด

เมื่อการกัดกร่อนเกิดขึ้นกับวัสดุแล้ว จะทำให้เกิดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการกัดกร่อนเกิดขึ้น ทั้งที่เป็นมูลค่าความเสียหายของวัสดุเมื่อเกิดการกัดกร่อนแล้ว และค่าใช้จ่ายของการป้องกันการกัดกร่อน รวมไปถึงค่าใช้จ่ายในการบำรุงดูแลรักษาเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการกัดกร่อน ดังนั้น การดูแลเรื่องการกัดกร่อนจึงต้องตระหนักถึงตั้งแต่ขั้นเริ่มต้น เช่น การเลือกใช้วัสดุให้ถูกต้องกับสภาวะการนำไปใช้งาน การออกแบบรูปร่างวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ให้ถูกต้อง และเลือกวิธีป้องกันการกัดกร่อนเสียตั้งแต่แรก เหล่านี้เป็นสิ่งที่ต้องดูแลเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในภายหลัง

การป้องกันการกัดกร่อนโดยวิธีการเคลือบ (Coating) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนได้ โดยวิธีการเคลือบผิวโลหะเป้าหมายเพื่อป้องกันการกัดกร่อน ซึ่งเป็นวิธีการเช่นเดียวกับการเคลือบผิววัสดุอื่นๆ เช่น ไม้, คอนกรีต เป็นต้น เพียงแต่การเคลือบผิวโลหะและโลหะผสม มีทั้งการเคลือบวัสดุอุปกรณ์ (Coating) และการเคลือบผิวโครงสร้างขนาดใหญ่ (Linings) เช่น ท่อ โดยผิวเคลือบต้องให้ผลปกป้องโลหะเป้าหมาย ไม่ให้สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม

ต่างๆ เช่น น้ำ ความชื้น สารเคมี ของเหลว และก๊าซต่างๆที่อยู่ในบรรยากาศรอบๆ ซึ่งการเคลือบผิวเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่จะใช้กับโครงสร้างโลหะในที่ชุมชน เช่น ป้าย อาคาร สะพาน และอื่นๆ เทคนิคการเคลือบผิวมีหลายวิธี ขึ้นกับวัสดุที่ใช้และวิธีการเคลือบ ซึ่งได้แก่

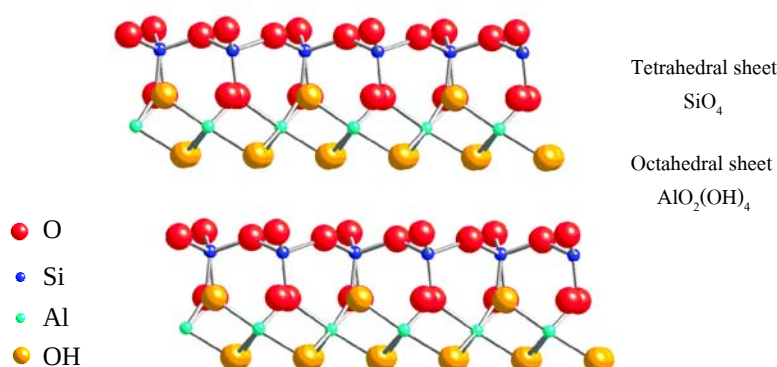
1. การเคลือบด้วยสารโลหะที่เป็นของเหลวของสารเคมี เช่น สีน้ำมันชนิดต่างๆ
2. การเคลือบด้วยสารโลหะที่เป็นชั้นหนา เช่น โพลีเมอร์และพลาสติกชนิดต่างๆ
ยางมะตอย หรือกระเบื้องเคลือบ
3. การเคลือบด้วยโลหะ เช่น สังกะสี โครเมียม ทองแดง ดีบุก โดยวิธีการต่างๆ เช่น ชุบโดยการจุ่มชุบขณะร้อน ชุบด้วยไฟฟ้า เป็นต้น

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เริ่มจากในปี 2003 Jihuai Wu และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมวัสดุผสมที่ดูดซับความชื้นได้ดีมาก จากการกราฟท์อะครายลาไมด์, แป้งมันและดินขาว (Kaolinite) พบว่าวัสดุผสมดังกล่าวมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ในปริมาณที่มาก เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุทั่วไป ภายใต้ความดันที่ด้านทานการดูดซับ และยังพบว่าวัสดุผสมดังกล่าวมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้สูงกว่าสารประกอบที่มีส่วนผสมของเบนโตไนท์ (Bentonite) หรือเซอร์ไซต์ (Sericite) เพราะว่าผงของดินขาวสามารถที่จะเป็นตัวกลางในการกระจายในน้ำ และสามารถต่อเชื่อมกับแป้งและอะครายลาไมด์ได้ดี เนื่องจากผงแร่เบนโตไนท์ มีการไฮเดรชันและการโป่งพองที่สูง เมื่อเติมตัวเชื่อมปฏิกิริยาลงไป ทำให้ไม่มีช่องว่างพอสำหรับโมเลกุลของน้ำที่จะเข้าไปในโครงร่างตาข่ายได้ จึงเป็นตัวกลางในการกระจายในน้ำได้ไม่ดี ส่วนผงแร่เซอร์ไซต์ มีการไฮเดรชันและการโป่งพองที่ต่ำ จึงทำให้ปฏิกิริยาการกราฟท์โคโพลิเมโรเซชันมีประสิทธิภาพต่ำ จึงทำให้สามารถต่อเชื่อมกับแป้งและอะครายลาไมด์ได้ไม่ดีเท่าแร่ดินขาว และยังทำการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณดินขาว, ปริมาณตัวเชื่อมปฏิกิริยาการกราฟท์ และปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาการกราฟท์ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำ พบว่า ปริมาณของสารตั้งต้นทั้งสามชนิดนี้มีผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของวัสดุผสมทั้งสิ้น และทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผสมที่ได้จากปฏิกิริยาการกราฟท์ในอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่เหมาะสมแล้ว พบว่า ความเร็วของการบวมตัวของวัสดุผสม ซึ่งแสดงความสามารถในการดูดซับน้ำที่ดีนั้น มันสามารถที่จะดูดซับน้ำได้ถึง 3000 กรัม / น้ำหนักวัสดุผสม 1.00 กรัม ภายในเวลา 30 นาที และสามารถดูดซับน้ำได้ถึง 4000 กรัม / น้ำหนักวัสดุผสม 1.00 กรัม ภายในเวลา 120 นาที ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมของวัสดุผสมดังกล่าว

ต่อมาในปีเดียวกัน Y.Hu และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติพื้นผิวของแร่ดินขาว โครงสร้างผลึก และสมบัติทางเคมีของผลึกในแร่ดินเหนียวสีขาว (Clay) ดินเหนียวสีขาวที่นำมาวิจัยในครั้งนี้มาจากแหล่งที่ต่างกัน 4 แห่ง ซึ่งพบว่าสามารถแบ่งเป็นชนิดได้ 2 ชนิด โดยอาศัยหลักการของค่าดัชนีผลึก Hinckley Index (HI) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกความเป็นผลึกของสารตัวอย่าง สารตัวอย่างใดที่มีค่า $HI > 0.90$ จะแสดงคุณสมบัติที่เป็นผลึกสูง และเรียกดินขาวนี้ว่า Soft Kaolin ถ้า $HI < 0.90$ ดินขาวมีความเป็นผลึกต่ำ เรียกว่า Hard Kaolin และการลอยตัวของ Hard Kaolin จะมีค่าต่ำกว่า Soft Kaolin เนื่องจาก Soft Kaolin มีช่องว่างที่เป็นรูพรุนมากกว่า Hard Kaolin

ในปีเดียวกันนี้ Paint and Coating Industry [3] ในสหรัฐอเมริกา ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับบทบาทของ Kaolin Clay พบว่าโครงสร้างของดินขาว (Kaolinite) ประกอบด้วยชั้นซิลิเกต (silicate sheet) และชั้นยิบไซต์ (gibbsite sheet) ที่รวมตัวกันในอัตราส่วน 1:1 เรียกว่าเป็นเลเยอร์ชนิด 1:1 และแต่ละชั้นของโครงสร้างดินขาวจะเชื่อมต่อกันโดยมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) ของชั้นยิบไซต์ สร้างพันธะไฮโดรเจนกับอะตอมของออกซิเจนที่อยู่บริเวณผิวของชั้นซิลิเกตที่อยู่ชั้นถัดไป ทำให้ดินขาวเกิดปฏิกิริยาอินเตอร์คาเลชั่นได้ค่อนข้างยากมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเคลย์ชนิดอื่น โดยโครงสร้างแต่ละชั้นของดินขาวจะมีความหนาประมาณ 0.72 นาโนเมตร และเลเยอร์ของดินขาวมีลักษณะเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่ที่จริงแล้วดินขาวจะมีประจุอยู่บ้างเล็กน้อย โดยประจุนั้นเกิดจากการที่ไอออนในโครงสร้างถูกแทนที่ด้วยไอออนอื่น



ภาพที่ 1-1 แสดงโครงสร้างของดินขาว (Kaolinite)

ส่วนลักษณะรูปแบบของดินขาว จะเป็นอนุภาคที่มีรูปแบบเป็นระนาบหกเหลี่ยม (Hexagonal Plate) ซึ่งระนาบเหล่านี้จะเกิดขึ้นแบบซ้อนกัน และดินขาวมีหมู่ของไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ทำให้สามารถกระจายในน้ำได้อย่างรวดเร็ว

ต่อมาในปี 2004 An Li และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์และคุณสมบัติของเคลย์ (Clay) ในรูปของสารดูดซับความชื้น พบว่าสารดูดซับความชื้นของกรดอะคริลิก (Acrylic acid), อะครายลาไมด์ (Acrylamide) และพวกสารอนินทรีย์ (Inorganic) เช่น เคลย์ เมื่อผ่านการโพลีเมอไรเซชันจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำและน้ำเกลือได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับ Poly (acrylic acid – co – acrylamide) ที่เชื่อมต่อกัน (Crosslinked) และยังศึกษาเกี่ยวกับผลของปริมาณตัวริเริ่ม (แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต) และปริมาณผงแร่ attapulgite ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของสารประกอบดูดซับยิ่งยวด (Superabsorbent Composite) พบว่า เมื่อปริมาณของตัวริเริ่มมีค่ามาก จะทำให้ฟรีแรดิคัลโพลีเมอไรเซชัน มีค่าลดลง และทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงด้วย ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนของสายโซ่สั้นๆ ให้กับโพลีเมอร์ด้วย ซึ่งสายโซ่สั้นๆ นี้ไม่มีส่วนช่วยในการดูดซับน้ำ ทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง และเมื่อปริมาณของตัวริเริ่มมีค่าน้อย ทำให้เป็นการลดจำนวนการผลิตฟรีแรดิคัล ทำให้โครงร่างตาข่ายไม่สามารถที่จะฟอร์มตัวให้มีประสิทธิภาพได้ ทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลงเช่นกัน ส่วนปริมาณผงแร่ attapulgite ที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำ เพราะว่าเมื่อเพิ่มปริมาณผงแร่ attapulgite จะเป็นการเพิ่มโครงร่างตาข่ายและความหนาแน่นของตัวเชื่อมสารประกอบให้เพิ่มขึ้นด้วย

ในปี 2005 Junping Zhang และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาวิจัยและปรับปรุงระดับการ Organification ของผงแร่ Attapulgite (APT) เพื่อเสริมความสามารถในการดูดซับน้ำ อัตราการบวมตัว และความสามารถในการ Reswelling ให้มีค่าสูงที่สุด โดยการนำ Organo–APT ปริมาณน้อยๆ เข้ามาผสมกับสารโพลีเมอร์ ซึ่งระดับการ Organification ของผงแร่ Attapulgite กำหนดโดยการวิเคราะห์แบบเทอร์โมแกรวิเมตริก (Thermogravimetric) กับช่วงอุณหภูมิ คือ 25 ถึง 800 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และมีการเป่าไนโตรเจนแห้งด้วยอัตรา 50.00 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งพบว่าตัวดูดซับความชื้นที่ได้มีความสามารถในการดูดซับน้ำ และมีความสามารถในการ Reswelling สูงสุดที่ระดับ Organification ของ Attapulgite (APT) เท่ากับ 8.02 wt %

ต่อมาในปีเดียวกัน Golden Pak Chemical [6] ในแคนาดา ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับโพลีเมอร์ดูดซับน้ำยิ่งยวด (Superabsorbent Polymer) พบว่าโพลีเมอร์ชนิดนี้มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ถึง 1000 เท่าต่อน้ำหนักของมัน ในน้ำที่บริสุทธิ์และอยู่ภายใต้ความดันทานการดูดซับ ซึ่งโพลีเมอร์ดูดซับน้ำยิ่งยวดนี้ มีลักษณะเป็นของแข็งและเป็นเม็ดเล็กๆ โดยโพลีเมอร์จะมีโครงร่างเป็นตาข่าย เพื่อที่จะสามารถดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็วและมีการกักเก็บสารละลายน้ำไว้ได้ในปริมาณมากๆ ซึ่งจากการทดลองพบว่า โพลีเมอร์ดูดซับน้ำยิ่งยวดโดยทั่วไป จะสามารถ

ดูดซับน้ำได้ประมาณ 400 เท่าของมวลน้ำกลั่น ในขณะที่สามารถดูดซับน้ำได้เกือบ 300 เท่าของมวลน้ำก๊อก และในโพลีเมอร์ดูดซับน้ำยิ่งยวดชนิดเดียวกันดูดซับน้ำได้เพียง 30 - 40 เท่าของมวลของสารละลาย 1 % โซเดียมคลอไรด์ และยังศึกษาชนิดของโพลีเมอร์ดูดซับน้ำยิ่งยวดพบว่า โพลีเมอร์ดูดซับน้ำยิ่งยวดมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ อะครายเลท และ อะครายลาไมด์ ซึ่งการเชื่อมต่ออะครายเลทของโพลีเมอร์ดูดซับน้ำยิ่งยวด เป็นโพลีเมอร์ที่ไม่เป็นพิษ โดยสามารถผลิตได้ในโซเดียมหรือโพแทสเซียมอะครายเลท แต่การเชื่อมต่ออะครายลาไมด์ของโพลีเมอร์ดูดซับน้ำยิ่งยวดนั้น จะเป็นการสังเคราะห์แบบ neurotoxin ซึ่งสายโซ่โพลีเมอร์ที่ยาวจะใช้เป็นตัวควบคุมภาคประจุบวก (วัสดุสารอินทรีย์ เช่น คาร์บอน หรือของเสียของมนุษย์) หรืออนุภาคประจุลบ (วัสดุที่เฉื่อย เช่น ทราช หรือ ดินขาว)

ในปี 2006 Jigar M. Joshi และคณะ[7] ได้ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับซีริกแอมโมเนียมไนเตรด (Ceric Ammonium Nitrate) ที่ใช้เป็นตัวริเริ่มในปฏิกิริยาการกราฟท์โพลีอะครายลาไมด์ลงบนคาร์บอกซีเมทิลไคโตซาน สรุปได้ว่า ปริมาณความเข้มข้นของซีริกแอมโมเนียมไนเตรดมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกราฟท์ ซึ่งจากการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์การกราฟท์จะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของตัวริเริ่มมีค่ามากขึ้น เนื่องจากซีริกแอมโมเนียมไนเตรดได้สัมผัสโดยตรงกับหมู่ NH_2 ของสายโซ่หลักของคาร์บอกซีเมทิลไคโตซาน ทำให้สามารถที่จะผลิตฟรีเรดิคัลได้ ซึ่งจะนำไปสู่การเริ่มปฏิกิริยาการกราฟท์โพลีเมอร์ไรเซชัน โดยการฟอร์มตัวของไฮโปโพลีเมอร์จะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยที่ความเข้มข้นของตัวริเริ่มมีค่าต่ำ และเมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นของตัวริเริ่มให้สูงมากขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์การกราฟท์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เปอร์เซ็นต์การกราฟท์จะมีค่าสูงที่สุดที่ค่าความเข้มข้นของตัวริเริ่มค่าหนึ่งเท่านั้น ถ้าตัวริเริ่มมีความเข้มข้นสูงเกินไปจะทำให้เปอร์เซ็นต์การกราฟท์มีค่าลดลง

1.3 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.3.1. ศึกษาปัจจัยในการเตรียมวัสดุผสมดูดซับความชื้น เพื่อใช้ในการหน่วงการกักตร่อน
- 1.3.2. ศึกษาอัตราการดูดซับความชื้น เมื่อนำวัสดุผสมดังกล่าวไปเคลือบบนผิวหลัก
- 1.3.3. ศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุผสมดูดซับความชื้นในการหน่วงการกักตร่อนของหลัก

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาแนวทางในการเตรียมวัสดุผสมดูดซับความชื้นที่เหมาะสมในการดูดซับความชื้นเพื่อหน่วยการกักกรอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ แร่ที่ถูกเลือกมาสังเคราะห์เป็นวัสดุผสมดูดซับความชื้นคือแร่ดินขาว(Kaolinite) ผสมกับอะครายลาไมด์ (Acrylamide) และแป้งมัน สำหรับโพลิเมอร์ที่ถูกเลือกมาใช้งานวิจัยนี้ คือโพลิอะครายลาไมด์ (Polyacrylamide)

1.4.2 ศึกษาปัจจัยของการดูดซับความชื้น โดยวิธีการวิเคราะห์อัตราส่วนของสารประกอบต่างๆ เพื่อให้วัสดุผสมดูดซับความชื้นมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดีที่สุด

1.4.3 หาวิธีการและเทคนิคที่ง่ายและเหมาะสม ในการติดตามความสามารถการดูดซับความชื้นของวัสดุผสม และการหน่วงการกักกรองที่เกิดขึ้นกับเหล็ก โดยวัสดุผสมจะถูกเคลือบบนแผ่นเหล็ก ในสภาวะจำลองที่มีความชื้นสูง

1.4.4 วิเคราะห์และประเมินผลเปรียบเทียบกับกรณีแผ่นเหล็กมีการเคลือบวัสดุผสมดูดซับความชื้น และไม่มีการเคลือบวัสดุผสมดูดซับความชื้น

1.5 วิธีการวิจัย

การดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน คือ

1.5.1 รวบรวมข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมดูดซับความชื้น ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ และพฤติกรรมอื่นๆ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสม

1.5.2 จัดหาเครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมีที่จะใช้ในการสังเคราะห์วัสดุผสมดูดซับความชื้น

1.5.3 การเตรียมวัสดุผสมดูดซับความชื้น โดยมีขั้นตอนดังนี้

1.5.3.1 การทำดินขาวให้บริสุทธิ์

1.5.3.2 การกราฟท์อะครายลาไมด์ แป้งมันและดินขาว โดยปฏิกิริยา Saponification

1.5.3.3 การสังเคราะห์โพลิอะครายลาไมด์

1.5.3.4 การเตรียม Cr(III) – thiourea – polyacrylamide

1.5.3.5 การผสมกันระหว่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกราฟท์ กับ

Cr(III) – thiourea – polyacrylamide

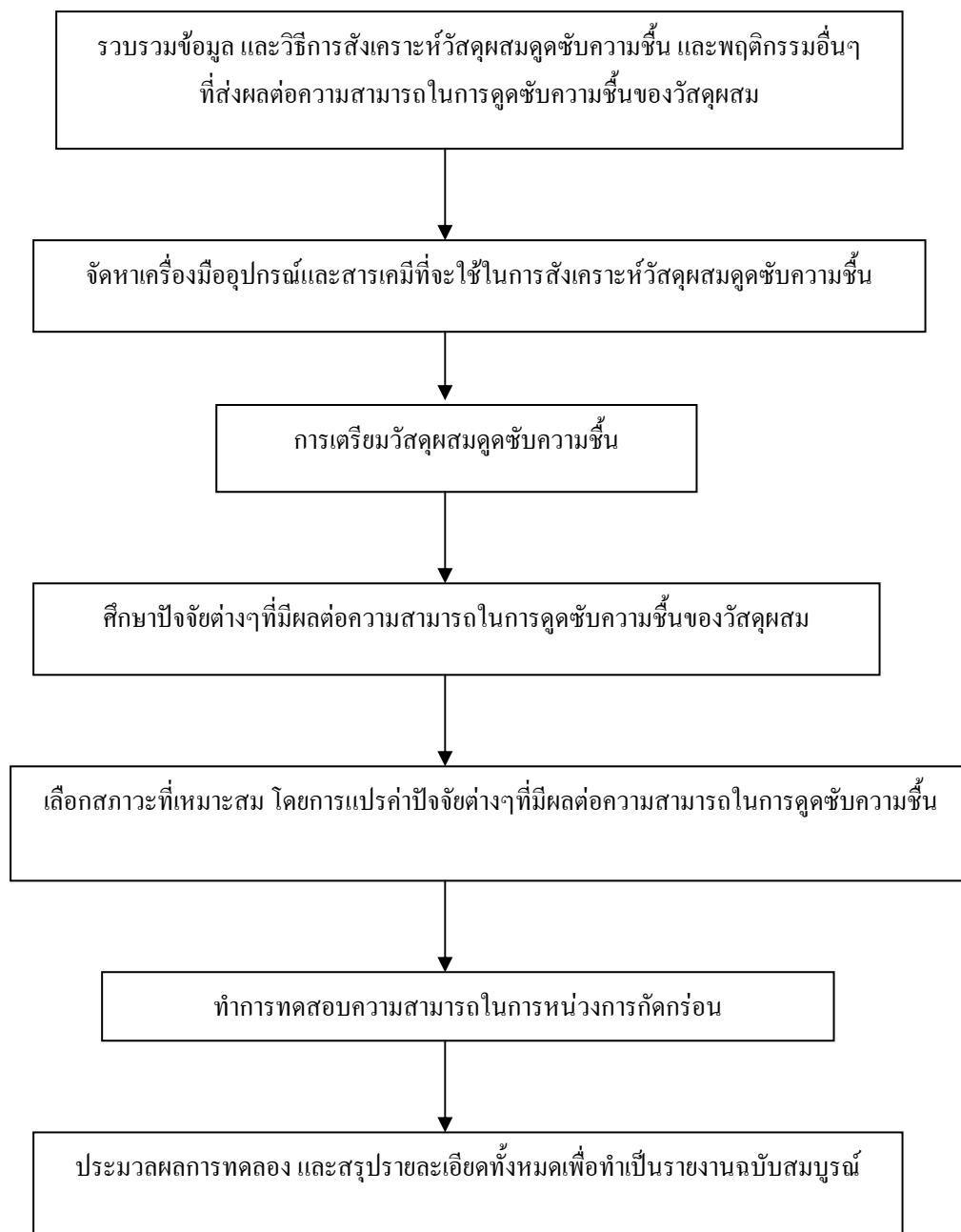
1.5.3.6 การกรองวัสดุผสม เพื่อที่จะนำไปทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้นต่อไป

1.5.4 ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสม เช่น อัตราส่วนของสารประกอบต่างๆ ที่จะทำใหวัสดุผสมดูดซับความชื้นมีค่าสูงสุด

1.5.5 เลือกสถานะที่เหมาะสม โดยการแปรค่าปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสม

1.5.6 ทำการทดสอบความสามารถในการหน่วงการกักกร่อน โดยการนำไปเคลือบบนแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนที่ขัดจนสะอาดแล้ว และนำไปไว้ในที่ที่มีความชื้นสูง โดยมีการควบคุมความชื้นที่ $85 \% \pm 5 \%$ ในระบบปิด เป็นเวลา 30 วัน บันทึกผลดูน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปและลักษณะภายนอกของผิวเคลือบ เมื่อครบกำหนดจะทำการทดสอบการยึดติดของผิวเคลือบ และนำแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนไปทดสอบ การเกิดการกักกร่อนต่อไป

1.5.7 ประมวลผลการทดลอง และสรุปรายละเอียดทั้งหมดเพื่อทำเป็นรายงานฉบับสมบูรณ์



ภาพที่ 1-2 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทำให้ทราบว่าวิธีการเคลือบนี้มีผลต่อการหน่วงการกัดกร่อนเพียงใด เพราะเป็นวิธีการที่ไม่ต้องใช้กระแสไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่อาศัยวัสดุผสมดูดซับความชื้น ค่อยๆดูดซับความชื้นจากบรรยากาศภายนอก

1.6.2 สามารถนำไปใช้งานได้ง่าย โดยเสียค่าใช้จ่ายไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นของแผ่นเหล็ก

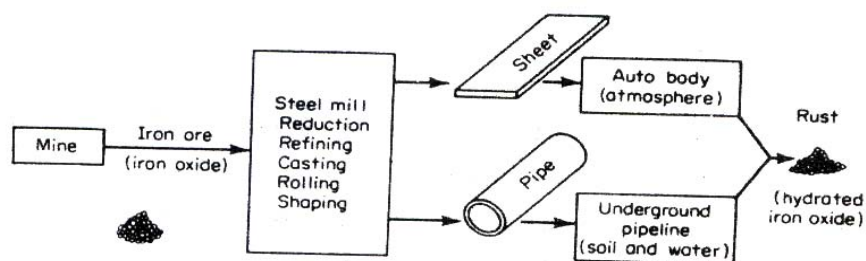
1.6.3 เป็นแนวทางที่ใช้ในการป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นเหล็ก ด้วยเทคนิคที่ง่ายและไม่ซับซ้อนจนเกินไป

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 การกัดกร่อน (Corrosion)

หมายถึง การเสื่อมสภาพของโลหะจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือเคมีไฟฟ้าของโลหะกับสิ่งแวดล้อมโลหะที่ทำให้โลหะนั้นบางลงหรือน้ำหนักหายไปหรือเป็นรูลึกหรือแตกหักเสียหาย ทั้งนี้เพราะโลหะเกิดปฏิกิริยาให้ e^- หรือโลหะ อีออนโลหะ + e^- โดยโลหะจะเป็นขั้ว Anode ของเซลล์การกัดกร่อน ซึ่งเป็นเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบกัลวานิก ค่าศักย์ไฟฟ้าของโลหะแต่ละชนิดสามารถใช้บอกลำดับความยากง่ายของการเกิดการกัดกร่อนได้เรียกว่า Galvanic Series เทคนิคการตรวจวัดพฤติกรรมของการกัดกร่อนของโลหะสามารถทำได้ง่ายด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสจะให้ข้อมูลต่างๆ เช่น อัตราการกัดกร่อนแบบทั่วผิวหน้า การเกิดของฟิล์มปกป้อง ความต้านทานการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ เช่น การกัดกร่อนแบบรูเข็ม และการกัดกร่อนแบบรอยร้าว สำหรับในเหล็กกล้าไร้สนิม ความต้านทานการกัดกร่อนนี้อาจจะลดลงเนื่องจากการใช้งาน เช่น การใช้งานจากงานเชื่อม (การกัดกร่อนตามขอบเกรน) โลหะส่วนใหญ่ปรากฏในธรรมชาติในรูปของสารประกอบโลหะ หรือที่เรียกว่า สินแร่ การถลุงโลหะจากสินแร่ต้องใช้พลังงานจำนวนหนึ่ง และพลังงานจำนวนนั้นจะคายออกจากโลหะสู่สิ่งแวดล้อม เมื่อโลหะเกิดการกัดกร่อน ดังนั้น การกัดกร่อนจึงเป็นปรากฏการณ์ที่โลหะเปลี่ยนจากสารที่มีธาตุเดียวของโลหะไปเป็นสารประกอบของโลหะที่อาจเป็นชนิดเดียวกัน หรือคล้ายคลึงกับสินแร่ที่นำไปถลุง จึงอาจกล่าวได้ว่า การกัดกร่อน คือปฏิกิริยาย้อนกลับของการถลุงโลหะนั่นเอง



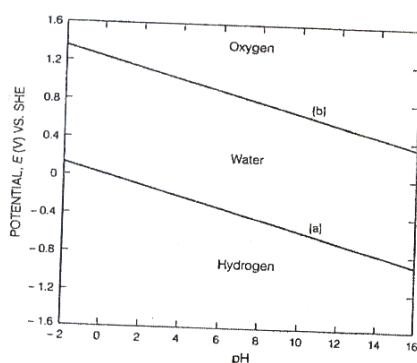
ภาพที่ 2-1 การเปลี่ยนจากสินแร่สู่โลหะและการเปลี่ยนย้อนกลับจากโลหะสู่สินแร่ [8]

สินแร่หลักส่วนใหญ่เป็นสารประกอบของเหล็กออกไซด์ ดังนั้น เมื่อใช้เหล็กแล้วเกิดการกัดกร่อนจากการสัมผัสกับน้ำและออกซิเจนเกิดเป็นสนิมเหล็ก ซึ่งก็คือสารประกอบเหล็กออกไซด์นั่นเอง ส่วนวัสดุโลหะเช่น เซรามิกส์เป็นสารประกอบของอ็อกไซด์กับอ็อกไซด์ในธรรมชาติ เช่น ออกไซด์ซิลิเกต เช่นที่มีในสินแร่ต่างๆ วัสดุเซรามิกส์จึงมีเสถียรภาพมาก คือไม่ค่อยเกิดปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อมที่อยู่แต่ก็เกิดการเสื่อมสภาพได้จากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง ได้จากการถูกกระทำด้วยแรงทางกลหรือแรงกระทบ ส่วนวัสดุจำพวกโพลีเมอร์หรือพลาสติกมีสมบัติค่อนข้างเสถียรกว่าโลหะ ทั้งนี้เพราะมีพันธะโควาเลนต์ของคาร์บอนที่เสถียร ดังนั้น พฤติกรรมการเสื่อมสภาพของพลาสติกจึงแตกต่างจากพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะ โดยวัสดุพลาสติกจะเกิดการเสื่อมสภาพที่เรียกว่า Degradation ขณะที่โลหะจะเกิดการเสื่อมสภาพแบบ Corrosion

2.2 การกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่เป็นน้ำและสารละลายของน้ำ

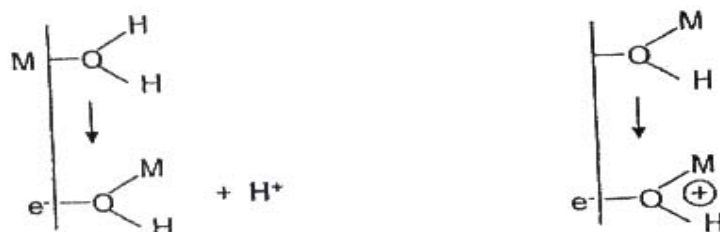
น้ำเป็นโมเลกุล Amphoteric ที่สามารถมีพฤติกรรมเป็นได้ทั้งกรด ($\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$) หรือเป็นเบส Bronsted ($\text{H}_2\text{O} + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+$) ในที่ที่มีอิเล็กตรอน เช่น โลหะให้อิเล็กตรอนประพจน์เป็นสารออกซิไดซ์ คือ เกิดปฏิกิริยา $\text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{OH}^- + \frac{1}{2} \text{H}_2$ หรืออาจเป็นสารรีดิวซ์ คือ เกิดปฏิกิริยา $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}^+ + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^-$

ธรรมชาติของการเป็นสารออกซิไดซ์หรือสารรีดิวซ์ของน้ำ ขึ้นกับความแตกต่างของระดับพลังงานของระดับ Fermi ของโลหะกับระดับพลังงานของระบบรีดอกซ์ของสิ่งแวดล้อมโลหะ หรือเป็นความแตกต่างของพลังงานศักย์ของโลหะกับสารละลายนั่นเอง ดังนั้น น้ำจึงเป็นสารที่มีสมบัติที่เรียกว่า acido - basic nature หรือ oxido - reducing nature ตามข้อมูลของแผนภาพ E - pH ที่เป็นข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์ หรือที่เรียกว่า แผนภาพโพเบ (Pourbaix Diagram) ของน้ำ ดังนี้



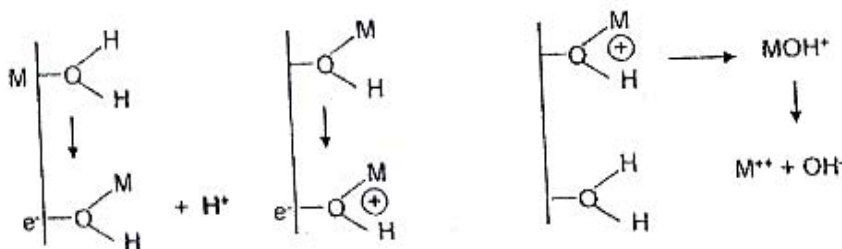
ภาพที่ 2-2 แผนภาพโพเบของน้ำ [8]

เมื่อน้ำอยู่ที่ผิวของโลหะจะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ของน้ำกับผิวโลหะ ดังภาพ



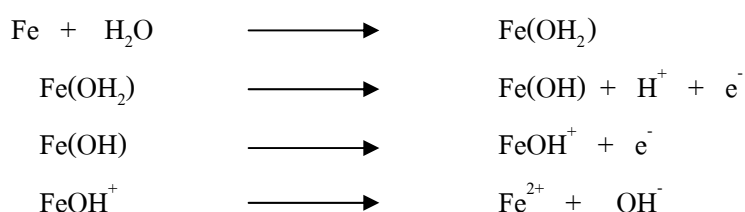
ภาพที่ 2-3 อันตรกิริยาของน้ำกับผิวโลหะ [8]

โดยที่น้ำเป็นโมเลกุลที่มีสองขั้ว (Bipolar) น้ำจึงสามารถยึดเกาะผิวโลหะได้ดีด้วยอันตรกิริยาทั้งทางฟิสิกส์และเคมี จากนั้นน้ำจะให้ทั้งโปรตอนและอิเล็กตรอนแก่โลหะ จะเกิดเป็นสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ (MOH) ของน้ำกับโลหะไอออนที่ผิว อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นต่อไปคือการขยายขนาดของสารประกอบเชิงซ้อนของน้ำกับโลหะนั้น แล้วมีผลเกิดขึ้น 2 แบบ คือ เกิดเป็นการกัดกร่อนจากน้ำ (Water corrosion) หรือเกิดการป้องกันการกัดกร่อนจากน้ำ (Water passivation) โดยมีขั้นตอนการเกิดแต่ละแบบแตกต่างกัน ดังภาพ



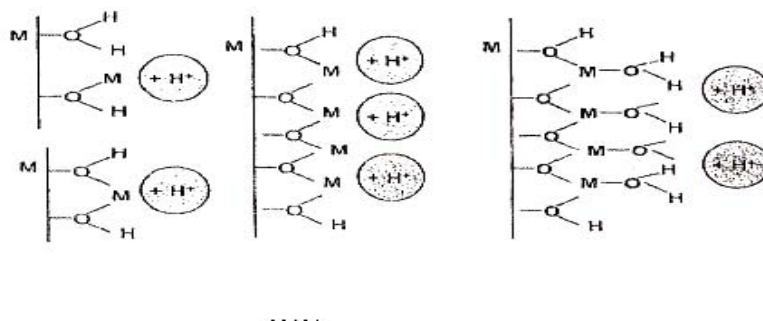
ภาพที่ 2-4 การเกิดการกัดกร่อนจากน้ำ (Water corrosion) ตาม Bockris mechanism [8]

ตัวอย่างของการเกิดการกัดกร่อนจากน้ำ เช่น เหล็กในน้ำ ที่ผิวเหล็กจะมีไอออนเหล็ก (Fe^{2+}) จากการละลายของเหล็ก เมื่อมีน้ำมาเกาะที่ผิวจะมีการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนเหล็ก (Fe^{2+}) กับโปรตอน (H^+) โดย Fe^{2+} เคลื่อนที่เข้าแทนที่ H^+ ในน้ำ ทำให้ไอออน H^+ หลุดออกจากโมเลกุลน้ำ แต่ยังคงยึดเกาะกับอิเล็กตรอนที่ผิวโลหะที่เกิดจากการแตกตัวของโลหะ ดังนั้นสารประกอบเชิงซ้อนที่ผิวเหล็ก จึงเริ่มจากเป็น $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})]$ ก่อน แล้วเปลี่ยนเป็น $\text{Fe}(\text{OH})$ และเป็น FeOH^+ และเป็น Fe^{2+} ในท้ายที่สุด ปฏิบัติตามขั้นตอนของ Bockris เป็นดังนี้



สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะไฮดรอกไซด์นี้ก็คือ สนิม (rust) เช่น ของเหล็กก็คือ สนิมเหล็ก สีน้ำตาลแดงของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ สารประกอบนี้เมื่อเกิดขึ้นแล้วไม่ได้เกิดทั่วผิวโลหะ จึงไม่เป็นแผ่นฟิล์มบางหุ้มโลหะ จึงไม่มีสภาพปกป้อง (non - protective) โลหะจากการถูกกัดกร่อน การกัดกร่อนจึงดำเนินต่อไปเรื่อยๆ เรียกว่า เกิด Water corrosion

ในกรณีที่สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นเสถียร ไม่ละลายในน้ำ และสามารถสร้างเป็นโครงข่าย (network) ได้จากการขยายขนาดของสารประกอบดังกล่าว พร้อมกับการคายโปรตอน (deprotonated) ได้เป็นฟิล์มบางหุ้มทั่วผิวโลหะและมีสภาพปกป้อง (Protective film) ที่สามารถลดอัตราการกัดกร่อนได้เหมือนเป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน (Inhibitor) เรียกฟิล์มนี้ว่า Passive film ขบวนการเกิดฟิล์มนี้เรียกว่า Water passivation ดังภาพ



ภาพที่ 2-5 การเกิดฟิล์มป้องกันการกัดกร่อนจากอันตรกิริยาของน้ำ (Water passivation) [8]

น้ำในชั้นต่อไปจะยึดเกาะกับสารประกอบโลหะออกไซด์ แล้วสร้างโครงข่ายพร้อมกับคายโปรตอน จนที่สุดได้ฟิล์มบางที่ยึดเกาะกับผิวโลหะได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างเช่น เหล็กกล้าไร้สนิม มีฟิล์มบางใสของโครเมียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์หนาราว 10.00 นาโนเมตร ติดแน่นกับโลหะและสามารถลดอัตราการกัดกร่อนได้จนเรียกว่า ไร้สนิม

2.3 การใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนและการเคลือบผิวด้วยโพลีเมอร์

สารยับยั้งการกัดกร่อน หรือ Inhibitor เป็นสารเคมีที่ใช้เติมลงในน้ำหรือสารละลายของน้ำที่แวดล้อมโลหะอยู่ แล้วทำให้มีผลลดการกัดกร่อนที่เกิดจากความชื้นหรือจากน้ำได้ ซึ่งสารเคมีเหล่านี้ มักเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ซึ่งช่วยให้การกัดกร่อนลดต่ำลง เมื่อเติมลงในสารละลายในปริมาณน้อยๆ โดยกลไกการทำงานของสารยับยั้งการกัดกร่อนมีด้วยกันหลายแบบ แต่กลุ่มหลักๆ คือ การดูดซับบนผิวโลหะ ซึ่งการดูดซับจะต้องเกิดในช่วงของศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อน และลดอัตราของปฏิกิริยาแคโทดิก หรือแอโนดิก หรือทั้งสองอย่างได้

สารยับยั้งการกัดกร่อนที่ทำงานในกระบวนการละลายของโลหะ กลุ่มแรกได้แก่พวกเอมีน ทั้งที่เป็นอะโรมาติก และอะลิฟาติก หรือสารประกอบต่างๆของกำมะถัน หรือโมเลกุลที่มีหมู่คาร์บอนิล, สารประกอบของฟอสฟอรัส, อาร์เซนิก และแอนติโมนี ซึ่งมีผลต่อกระบวนการเกิดไฮโดรเจนเป็นอย่างมาก สารยับยั้งการกัดกร่อนกลุ่มที่สอง จะทำให้เกิดตะกอนบนผิวโลหะ และอาจเร่งกระบวนการเกิดชั้น Passive film ได้แก่พวกฟอสเฟต และไบคาร์บอเนต ซึ่งการออกซิไดซ์โลหะนำไปสู่การเป็นอ็อกไซด์และเกลือฟอสเฟตและเกลือคาร์บอเนตของอ็อกไซด์บางอย่าง ซึ่งจะไม่ละลายได้ง่าย สารยับยั้งการกัดกร่อนอื่นๆ เช่น สารรีดอกซ์ ซึ่งสามารถเลื่อนค่าศักย์ไฟฟ้าของผิวโลหะไปยังค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการป้องกันแบบแคโทดิกหรือแบบแอโนดิกได้ เช่น สารยับยั้งการกัดกร่อนจำพวกไดโครเมต โดยมักจะทำให้เกิดกระบวนการ Passivation ที่พื้นผิวชิ้นงาน

ส่วนการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยโพลีเมอร์ มีการนำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง เพื่อป้องกันการกัดกร่อน (corrosion protection) ที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นงาน, ป้องกันการสึกหรอ (wear protection) ลดการเสียดสี (reduced friction) เป็นฉนวนทางไฟฟ้า (electrical insulation) หรือแม้แต่ในงานที่ต้องการความสวยงาม โดยที่ผ่านมามีการนำโพลีเมอร์มาเคลือบบนชิ้นงาน ตัวอย่างเช่น มีการใช้ Poly(2-methacryloyloxy(ethyl)acetoacetate) มาเคลือบบนผิวอะลูมิเนียม เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของอะลูมิเนียม โดยได้ทำการทดสอบสมบัติความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยเทคนิค Potentiodynamic Polarization พบว่า ผิวเคลือบโพลีเมอร์สามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของอะลูมิเนียมได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นเพราะว่าโครงสร้าง

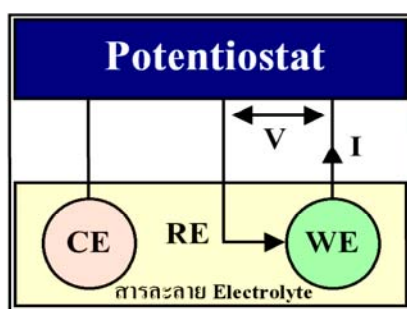
ของโพลีเมอร์ ทำให้สามารถเกิดการจับตัวกับผิวอะลูมิเนียมได้ดี โดยการสร้างแรงยึดเหนี่ยวทางเคมี ซึ่งโพลีเมอร์สามารถเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน โดยมีค่าน้ำหนักต่อพื้นที่ผิวเคลือบเป็น 0.28 กรัมต่อตารางเซนติเมตร [9] เป็นต้น

2.4 การทดสอบการกัดกร่อนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า [8, 10, 11]

2.4.1 การทดสอบคุณภาพ

การทดสอบคุณภาพฟิล์มด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า จะทำให้ทราบค่าอัตราการกัดกร่อน หรือ ค่าความต้านทานการกัดกร่อนได้ วิธีเคมีไฟฟ้าที่นำเสนอเป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว และไม่ทำให้เกิดมลภาวะแก่สิ่งแวดล้อม โดยใช้เครื่อง potentiostat ป้อนศักย์ไฟฟ้าแรงโลหะตัวอย่างให้เกิดการกัดกร่อนด้วยเซลล์เคมีไฟฟ้า เพื่อให้ได้ข้อมูลพฤติกรรมของการกัดกร่อนของโลหะตัวอย่างในสารละลายที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ ข้อมูลที่ได้มีทั้งด้านเทอร์โมไดนามิกส์ (ศักย์ของการกัดกร่อน) และด้านจลนพลศาสตร์ (กระแสการกัดกร่อน) โดยที่ชิ้นงานตัวอย่างเป็นขั้ว WE (working electrode) ที่ประกอบกับเซลล์เคมีไฟฟ้ากับขั้วอ้างอิงมาตรฐาน (reference electrode) และมีขั้วที่สามเป็นขั้วช่วยผ่านพลังงานไปเร่งการกัดกร่อน โดยใช้โลหะแพลตินัม เรียกว่า counter หรือ auxiliary electrode (เมื่อเกิดการกัดกร่อนจะมีกระแสไฟฟ้าในวงจรเพิ่มขึ้น และจะลดลงเมื่อเกิด passive film และจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อ passive film แตก แล้วเกิดการกัดกร่อนเฉพาะที่ เช่น เป็นรู หรือ pitting และเป็นรอยตามรอยซ้อน หรือ crevice) จากนั้นป้อนศักย์ไฟฟ้าย้อนกลับ เพื่อให้เกิดฟิล์มใหม่ (Repassivation ability)

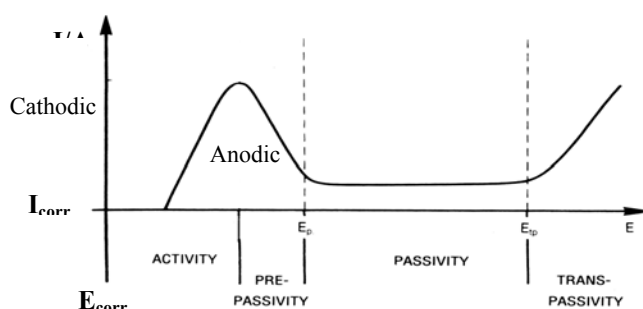
ซึ่งเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบเป็นประเภทเซลล์ 3 ขั้ว ประกอบด้วยขั้วทำงาน (Working Electrode) คือ ชิ้นงานโลหะตัวอย่าง ขั้วอ้างอิงมาตรฐาน (Reference Electrode) และขั้วที่ 3 (Counter Electrode) ใช้เครื่อง Potentiostat หรือ Galvanostat ในการป้อนศักย์และกระแสไฟฟ้าตามลำดับ วงจรและเซลล์เคมีไฟฟ้าตามภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 วงจรและเซลล์เคมีไฟฟ้าสำหรับทดสอบการกัดกร่อนของชิ้นงานตัวอย่าง

2.4.2 วิธีทดสอบแบบเคมีไฟฟ้า

เทคนิคในวิธีเคมีไฟฟ้า ได้แก่ เทคนิค Potentiodynamic Polarization มีรายละเอียด ดังนี้ เทคนิค Potentiodynamic Polarization เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานโลหะในสิ่งแวดล้อมที่กำหนด ซึ่งกราฟ Polarization ของการทดสอบโดยเทคนิค Potentiodynamic เป็นดังภาพ 2-7 เริ่มจากการป้อนศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในทางบวก คิดตามวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป ณ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่างๆ โดยกระแสไฟฟ้าจะลดลงเมื่อเกิด Passive film และจะเพิ่มขึ้นทันทีเมื่อฟิล์มแตก (Film Breakdown) เส้นโค้งของความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าและค่า $\log i$ ($i = I / A$ หรือ ความหนาแน่นของกระแส) หรือ Polarization Curve จะเห็นพฤติกรรมการกัดกร่อนของโลหะนั้น ทั้งการเกิดขึ้นของฟิล์ม, การคงอยู่ของฟิล์ม, ความแข็งแรงของฟิล์ม, สมบัติการปกป้องของฟิล์ม และการแตกของฟิล์ม ข้อมูลที่ได้สามารถตีความเป็นความต้านทานการกัดกร่อนได้ เช่น ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}) คือ ค่าความต้านทานการเกิดการกัดกร่อน หรือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ลดลงขณะที่เกิดฟิล์ม ($I_{passive}$) แสดงสมบัติปกป้อง (Protective) หรือความแข็งแรงของฟิล์มบางต่อโลหะนั้น



ภาพที่ 2-7 ผลการทดสอบจากเทคนิค Potentiodynamic Polarization

การเกิด Passive Film ที่ผิวโลหะตัวอย่าง ทำให้สภาพการนำของโลหะตัวอย่างที่เป็นขั้วทำงานลดลงจนอยู่ในสภาพกึ่งตัวนำ คือ มีกระแสน้อยมากและคงที่ แม้จะเพิ่มศักย์ไฟฟ้าบวกมากขึ้นก็ตาม และเมื่อถึงจุดหนึ่งที่ Passive Film แตกสภาพการนำจะกลับมาอีกครั้ง โดยค่ากระแสจะสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งแสดงถึงการกัดกร่อนแบบเฉพาะที่ ค่ากระแสสูงสุดก่อนเกิดฟิล์มให้ข้อมูลความเร็วในการเกิด Passive Film และค่าศักย์ที่ฟิล์มทนทานก่อนแตกให้ข้อมูลความแข็งแรงและความทนทานของฟิล์ม อย่างไรก็ตาม ลักษณะของเส้นโค้ง Polarization นอกจากจะชี้ถึงสมบัติของโลหะที่ใช้เป็นขั้วทำงานแล้ว ยังมีลักษณะเป็นไปตามสารละลายและสภาวะที่ใช้ทดสอบ

2.5 ความหนืด

คือการแสดงถึงความยากหรือง่ายในการที่ของเหลวอย่างหนึ่งจะสามารถไหลไปได้โดยตัวของมันเอง เช่น มีของเหลวอยู่สองชนิดที่มีอุณหภูมิเท่ากัน ชนิดหนึ่งไหลไปได้อย่างง่ายดายหรือเร็ว ในขณะที่อีกชนิดหนึ่งไหลไปได้อย่างเชื่องช้า เราจะพูดว่าของเหลวชนิดแรกมีความหนืดต่ำ ส่วนชนิดที่สองมีความหนืดสูง ดังนั้นจึงอาจให้คำจำกัดความอย่างง่าย ๆ ได้ว่า ความหนืด คือความสามารถในการต้านทานการไหล ของเหลวใดที่มีความหนืดมากจะมีความสามารถในการต้านทานการไหลสูง ของเหลวใดที่มีความหนืดน้อยจะมีความสามารถในการต้านทานการไหลต่ำ วิธีหาความหนืดใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “ Viscometer ” ซึ่งเป็นการจับเวลาที่ของเหลวจำนวนหนึ่งไหลผ่านรูมาตรฐานที่กำหนดไว้ ณ อุณหภูมิที่กำหนด และ Viscometer ที่ใช้ในการหาความหนืดมีอยู่หลายระบบด้วยกัน เช่น

1. Saybolt Universal Viscometer มีหน่วยเป็น “SUS” ซึ่งย่อมาจาก Saybolt Universal
2. Saybolt Furol Viscometer มีหน่วยเป็น “SFS” ย่อมาจาก Saybolt Furol Second
3. Redwood Viscometer มีหน่วยเป็น “Rw” นิยมใช้ในสหราชอาณาจักร
4. Engler Viscometer มีหน่วยเป็น “E” นิยมใช้ในญี่ปุ่นและยุโรป
5. Kinematic Viscometer มีหน่วยเป็น “cSt” เป็นระบบสากล

ปัจจุบันทั่วโลกได้ตกลงใช้ระบบเดียวกันคือ Kinematic Viscometer (cSt) แต่อย่างไรก็ตาม แม้ว่าหน่วยจะต่างกันและวัดที่อุณหภูมิต่างกัน ก็สามารถเทียบกลับมายังหน่วยและอุณหภูมิที่ต้องการได้โดยอาศัยกราฟน้ำมัน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิ

2.5.1 การคำนวณ (Calculations)

การคำนวณโดยใช้สูตรดังนี้

$$V = C t$$

(2-1)

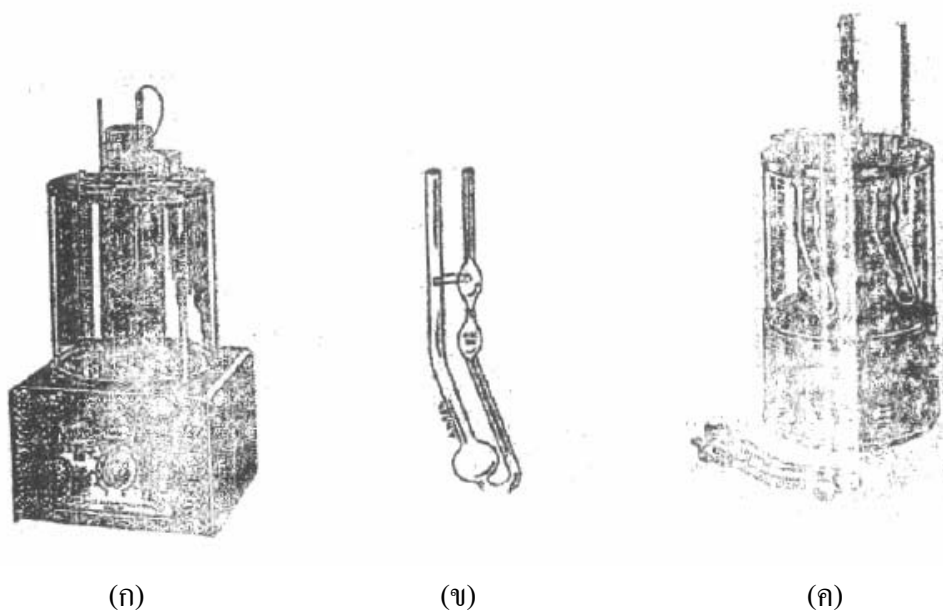
โดยที่ V = Kinematic Viscosity มีหน่วยเป็น cSt
(Centistokes หรือ Millimeters Square per Second: mm²/s)

C = ค่าคงที่ของ Viscometer มีหน่วยเป็น cSt/s

T = Flow Time ที่ได้จากการจับเวลา มีหน่วยเป็น s (วินาที)



ภาพที่ 2-8 ตัวอย่าง Viscometer แบบ Cannon-Ubbelohde Routine สำหรับน้ำมันชนิดโปร่งแสง [12]



ภาพที่ 2-9 แสดงภาพ (ก) อ่างควบคุมอุณหภูมิ, (ข) Viscometer และ (ค) ลักษณะเมื่อใช้งาน

2.6 การวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด

การทดสอบหมู่ฟังก์ชันของสารเคมีอินทรีย์และเคมีอนินทรีย์ สามารถทดสอบโดยการวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด

2.6.1 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรด

ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ อะตอมทุกตัวในโมเลกุลจะมีการสั่นอยู่ตลอดเวลา เมื่อความถี่ของการสั่นมีค่าเท่ากับความถี่ของรังสีอินฟราเรดที่ฉายมายังโมเลกุล โมเลกุลก็จะดูดกลืนรังสี จำนวนแถบการดูดกลืนทั้งหมดที่สังเกตได้จะมีค่าไม่เท่ากับการสั่นมูลฐานของโมเลกุลทั้งหมด โดยจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะจะมีบางแถบพลังงานที่ไม่มีการตอบสนองต่อพลังงานในช่วงรังสีอินฟราเรด



ภาพที่ 2-10 แสดงเครื่องมือวิเคราะห์สารด้วยอินฟราเรด

2.6.2 Infrared Spectroscopy (IR)

เป็นหนึ่งในเทคนิค Spectroscopic ทั่วๆ ไปที่ใช้ในทางเคมีอินทรีย์และเคมีอนินทรีย์ โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่มีความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละพันธะหรืออาจเรียกได้ว่าเป็นลายพิมพ์โมเลกุล โดยที่ Infrared Spectroscopy (IR) สามารถแยกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.6.2.1 Dispersive Infrared Spectroscopy

2.6.2.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy

2.6.2.1 Dispersive Infrared Spectroscopy

เครื่องมือที่ใช้เทคนิค Dispersive Infrared Spectroscopy หรือที่เรียกว่า Dispersive Infrared Spectrometer นั้น ได้มีการนำมาใช้งานในกลางทศวรรษ 1940 และหลังจากนั้นเป็นต้นมา เครื่องมือนี้ก็ได้นำไปใช้อย่างแพร่หลาย โดยส่วนประกอบของ Dispersive Infrared Spectrometer มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ

1. แหล่งกำเนิดรังสี โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดรังสีของ IR Spectrometer คือสารเนื้อเยื่อที่ถูกทำให้ร้อน จนมีอุณหภูมิ 1,000-1,800 องศาเซลเซียส สารที่นิยมใช้ ได้แก่ เนินสต์โกลเวอร์ (Nernst Glower) ซึ่งทำด้วยออกไซด์ของพวงธาตุแรร์เอิร์ท (rare earth oxides), โกลบาร์ (Globar) ซึ่งเป็นแท่งซิลิกอนคาร์ไบด์ และขดลวดนิโครม (Nichrome Coil) ซึ่งสารทั้งสามนี้จะให้รังสีที่ต่อเนื่องแต่จะมีพลังงานที่แตกต่างกัน

2. โมโนโครเมเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกระจายสเปกตรัมของรังสีและควบคุมแถบพลังงานในช่วงความยาวคลื่นหรือความถี่ที่ต้องการให้มีความต่อเนื่อง โดยปริซึมหรือเกรตติงถูกนำมาใช้ร่วมกับ slit แบบต่างๆ ซึ่งกระจกและฟิลเตอร์ เช่น เกรตติง จะถูกหมุนเพื่อให้รังสีลงบน slit ซึ่ง slit ที่แคบจะทำให้เครื่องมือสามารถแยกแยะค่าความถี่ต่างๆ ที่ใกล้เคียงกันได้ดี ในขณะที่ slit ที่มีความกว้างกว่าจะทำให้รังสีสามารถผ่านไปยังเครื่องตรวจจับได้มากกว่า เป็นต้น

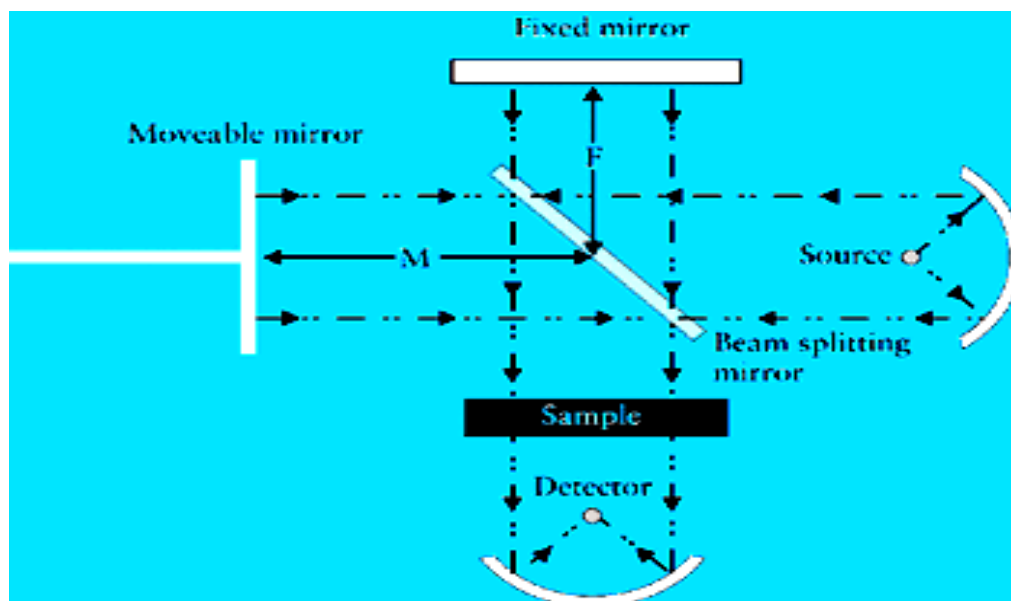
3. เครื่องตรวจจับ ที่ใช้โดยส่วนใหญ่จะมี 2 ประเภท คือ Thermal detector และ Photon detector โดย Thermal detector ได้แก่ Thermocouple, Thermistor และ Pneumatic device (Golay) อุปกรณ์เหล่านี้จะอาศัยสมบัติการเปลี่ยนแปลงความร้อนของสารเมื่อได้รับรังสีอินฟราเรด โดยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างจะถูกตรวจวัดในเชิงปริมาณ เช่น การกระจายตัวของแก๊สที่ไม่ดูดกลืนรังสี (Golay) ความต้านทานไฟฟ้า (Thermistor) หรือศักย์ไฟฟ้าตรงบริเวณรอยต่อของโลหะต่างชนิด (Thermocouple) เป็นต้น ส่วน Photon detector นั้นจะขึ้นกับอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างรังสีอินฟราเรดและสารกึ่งตัวนำ โดยอิเล็กตรอนที่ไม่นำกระแส จะถูกกระตุ้นจนกระทั่งเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าเล็กๆเกิดขึ้น Thermal detector จะให้การตอบสนองความถี่หลายๆ ค่าในช่วงกว้าง แต่จะใช้เวลาในการตอบสนองและมีความไวน้อยกว่า Photon detector

การทำงานโดยทั่วไป รังสีจากแหล่งกำเนิดจะส่งผ่านตัวอย่าง และถูกกระจายออกในช่วงความถี่ต่างๆ ด้วยโมโนโครเมเตอร์ หลังจากนั้นลำรังสีจะตกลงบนเครื่องตรวจจับ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วทำการบันทึกผลของสัญญาณนั้น

Infrared Spectrometer แบบนี้จะมีทั้งชนิดลำแสงเดี่ยว (single beam) และลำแสงคู่ (double beam) แต่โดยส่วนมากที่พบเห็นจะเป็นแบบลำแสงคู่ เพราะ background ที่เกิดจากแก๊สในบรรยากาศ เช่น ไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์จะหาคำปัญหาไป การทำงานของเครื่องแบบนี้ ลำแสงสองลำจะส่งผ่านไปยังตัวอย่างและ chamber อ่างอิง จากนั้นจะใช้ตัวตัดแสง เช่น sector mirror แยกลำรังสีอ่างอิงและรังสีจากตัวอย่างให้ตกลงบนเครื่องตรวจจับ

2.6.2.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy

Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy มีประโยชน์มากสำหรับการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส โดย FTIR ได้เข้ามาแทนที่ Dispersive Infrared Spectrometer เมื่อไม่นานมานี้ เพื่อให้สามารถใช้ในงานที่ต้องการความเร็วและความไวสูง นอกจากนี้ยังช่วยให้สามารถวิเคราะห์สารในช่วงที่ทำการวิเคราะห์ได้ยาก หรือ เกือบจะเป็นไปไม่ได้ในการวิเคราะห์เลย ซึ่งในระบบ FTIR มีส่วนประกอบหลักด้วยกัน 3 ส่วน คือ (1) แหล่งกำเนิดรังสี (2) Interferometer และ (3) เครื่องตรวจจับ โดยระบบ FTIR จะใช้แหล่งกำเนิดรังสีชนิดเดียวกับแบบ Dispersive ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดรังสีที่มีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ จะให้กำลังและความเสถียรมากกว่าแหล่งกำเนิดทั่วไป แต่สำหรับตัวแยกรังสีของ FTIR จะเป็น Interferometer แทนที่โมโนโครเมเตอร์ ใน Dispersive โดย Interferometer จะแยกลำรังสีออก ทำให้เกิด Path difference ระหว่างลำแสง แล้วทำการรวมสัญญาณการแทรกสอดซึ่งเป็นฟังก์ชันกับ Path difference โดยเครื่องตรวจจับ ซึ่งเครื่องตรวจจับที่นิยมใช้มากที่สุดสำหรับ FTIR คือ Deuterated Triglycine Sulfate (DTGS) และ Mercury Cadmium Telluride (MCT) เวลาในการตอบสนองของเครื่องตรวจจับโดยส่วนใหญ่ที่ใช้ใน Dispersive Infrared Spectrometer เช่น Thermocouple หรือ Thermistor จะช้ากว่าเวลาที่ Interferometer ทำการสแกนมาก DTGS เป็นเครื่องตรวจจับประเภท Pyroelectric ที่สามารถส่งสัญญาณการตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว เพราะอุปกรณ์ตัวนี้ทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ สำหรับ MCT เป็นเครื่องตรวจจับโปรตอนซึ่งขึ้นกับ quantum nature ของรังสี และให้ผลการตอบสนองที่รวดเร็วมาก ในขณะที่ DTGS ทำงานที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว (77 เคลวิน) MCT จะทำงานได้ดีกว่า โดยทั่วไป MCT จะเร็วกว่าและมีความไวมากกว่า DTGS



ภาพที่ 2-11 แผนผังแสดงส่วนประกอบของ Fourier Transform Infrared Spectrometer

2.7 ดินขาว (Kaolin หรือ China clay)



ภาพที่ 2-12 แสดงลักษณะภายนอกของดินขาว

ดินขาว หมายถึง ดินที่มีสีขาวหรือสีจางๆ แหล่งดินชนิดนี้มี 2 แบบ คือ แหล่งต้นกำเนิด และ แหล่งสะสมที่ลุ่ม [13] โดยแหล่งต้นกำเนิด (Residual Deposits) มักพบในลักษณะเป็นภูเขา หรือ ที่ราบ ซึ่งเดิมเป็นแหล่งแร่หินฟันม้า (Feldspar) เมื่อหินฟันม้าผุพังโดยบรรยากาศ (Weathering) ผลสุดท้ายเหลือเป็นดินขาวอยู่ ณ ที่นั้น

2.7.1 คุณสมบัติทางกายภาพของแร่ดินขาว

2.7.1.1 ขนาด (Particle size)

คุณสมบัตินี้มีความสำคัญมากอย่างหนึ่ง เพราะว่าจะขนาดจะมีความเกี่ยวข้องทางด้าน ความเหนียว(Plasticity) และการหดตัวเมื่อแห้ง (Drying Shrinkage) กล่าวคือ โดยทั่วไปเม็ดดิน ที่มีความละเอียด จะให้ความเหนียวและการหดตัวเมื่อแห้งมากกว่าเม็ดดินที่มีความหยาบ

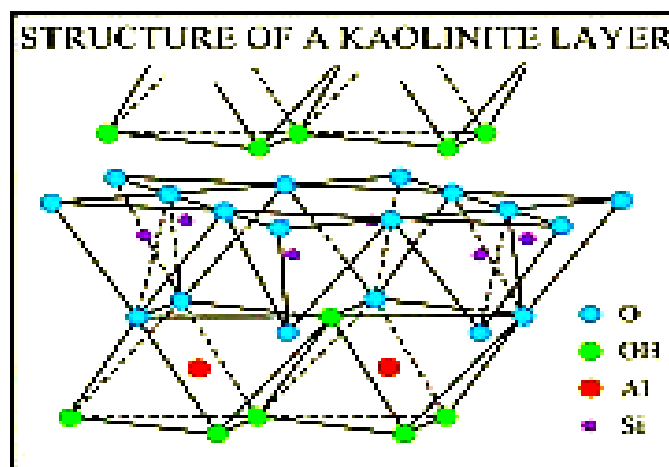
2.7.1.2 รูปร่าง (Particle Shape)

โดยทั่วไปอนุภาคของแร่ดินขาว มีรูปร่างเป็นแผ่นหกเหลี่ยม มีขนาดจาก 0.05 ถึง 10.00 ไมครอน โดยเฉลี่ยแล้วขนาดของดินขาวอยู่ระหว่าง 0.50 ไมครอน โดยที่ความสามารถในการ แลกเปลี่ยนอนุมูล (Base Exchange Capacity) สำหรับแร่ดินขาวมีน้อยมาก เพราะว่าในแร่พวกนี้ มีการแทนที่กันของพวกอนุมูลบวกในโครงสร้างน้อยมาก โดยเฉพาะผลึกดินขาวที่บริสุทธิ์ จะไม่มี ความสามารถในการแลกเปลี่ยนอนุมูลเลย ดินขาวจะแลกเปลี่ยนได้ก็ต่อเมื่อดินขาวไม่เป็นผลึก ที่สมบูรณ์หรืออาจจะดูเอาผลึกขนาดเล็กของแร่พวก three layer เข้าไว้ที่ผิวของดินขาว

2.7.2 โครงสร้างของดินขาว

2.7.2.1 โครงสร้างของสารประกอบพวกซิลิเกต

สารประกอบพวกซิลิเกตจะมีโครงสร้างได้หลายแบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับ การเชื่อมโยงกันของ silicon-oxygen tetrahedron disilicates ซึ่งเป็นโครงสร้างที่พบในแร่ดิน โดยโครงสร้างของ ซิลิเกตจะเกิดจากการเชื่อมโยงกันของออกซิเจนกับออกซิเจนอะตอมสามคู่ของ tetrahedron แต่ละหน่วย ซึ่งการเชื่อมโยงกันเป็นไปอย่างต่อเนื่องในลักษณะที่เป็นแผ่น (sheet) ซึ่งจะมี อัตราส่วนของซิลิกอนต่อออกซิเจนในอัตราส่วนเป็น 2 : 5 โดยที่รูปร่างของ tetrahedron sheet จะมีลักษณะคล้ายร่างสี่ ตรงกลางของแต่ละเซลล์เป็นโพรงใหญ่ [14]



ภาพที่ 2-13 แสดงโครงสร้างของดินขาว

2.7.2.2 โครงสร้างแบบ Octahedron sheet

จะประกอบด้วยแต่ละคู่ของ octahedral-packed OH sheets ซึ่งมีอนุภาคมูลบวอยู่ระหว่าง octahedron เหล่านั้น มาเรียงซ้อนกันอย่างเหมาะสม พวกอนุภาคมูลบวอาจเป็น Al^{+3} , Fe^{+2} หรือ Mg^{+2} โดยในดินที่มีคุณภาพสูง เราจะพบแต่ Al^{+3} นอกจากนี้ใน octahedral sheet ยังมีโพรงเช่นเดียวกันกับ tetrahedral sheet ซึ่งในโพรงเหล่านี้พวกอนุภาคมูลบวสามารถที่จะเข้าไปอยู่ได้ในหนึ่งเซลล์ ถ้ามีอนุภาคมูลบวเข้าไปอยู่เต็มที่ 6 ตัว เรียกแร่เหล่านี้ว่า trioctahedral แต่ถ้ามีอนุภาคมูลบวเข้าไปอยู่เพียง 2 ใน 3 หรืออยู่ 4 ตัว เรียกแร่เหล่านี้ว่า dioctahedral

โครงสร้างของดินขาวจะประกอบด้วยแผ่นซิลิกาหนึ่งแผ่น ประกบกับแผ่นอะลูมิเนียมอีกหนึ่งแผ่น โดยที่ซิลิกอนและอะลูมิเนียมจะร่วมกันเกาะกับออกซิเจนตัวเดียวกันในด้านที่ประกบเข้าหากัน ทำให้แผ่นทั้งสองเชื่อมเข้ากันได้ดี รวมกันเป็นผลึกของแร่ดินขาว โครงสร้างแบบนี้จึงเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่าเป็นโครงสร้างผลึกประเภท 1 : 1 แผ่นผลึกดินขาวนี้เป็นรูปหกเหลี่ยม มีขอบชัดเจน ซึ่งในธรรมชาติผลึกนี้จะเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ คล้ายกับแผ่นแร่ไมก้า (mica) โดยชั้นต่างๆนี้จะยึดกันแน่นไว้ ด้วยแรงของพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ดังนั้น ช่องว่างระหว่างชั้นนั้นจะมีระยะห่างที่ไม่เปลี่ยนแปลง ไม่สามารถขยายให้กว้างขึ้นหรือหดให้แคบลงได้ ช่องว่างระหว่างชั้นนี้อาจเรียกว่า หลักระหว่างแผ่นผลึก (inter layer) ซึ่งเป็นระยะทางที่วัดจากขอบบนของผลึกแผ่นบนจนถึงขอบบนของผลึกแผ่นล่างถัดลงมา โดยรวมทั้งระยะความกว้างของหลับนั่นเรียกว่า basal spacing ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของผลึกแร่แต่ละชนิด สำหรับแร่ดินขาวนั้นมีค่า basal spacing เท่ากับ 7.0 แองสตรอม (Angstrom, $\text{\AA}$) [15]

พันธะไฮโดรเจนที่ยึดชั้นผลึกของแร่ดินขาวไว้นั้น เกิดขึ้นระหว่างอะตอมออกซิเจนของแผ่นซิลิกากับอะตอมไฮโดรเจนของแผ่นอะลูมินา แรงยึดของพันธะไฮโดรเจนนี้ค่อนข้างเหนียวแน่นมาก จึงทำให้หลักระหว่างแผ่นผลึกนั้นมีระยะที่แคบและขยายออกไม่ได้ ทำให้โมเลกุลของน้ำและแคทไอออน (cation) ต่างๆ ไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ในหลัสนั้นได้ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลึกของแร่ดินขาวนี้ไม่สามารถที่จะขยายตัวหรือหดตัวเมื่อเปียกน้ำและแห้งได้ ส่วนพื้นที่ผิวภายในหลั (internal surface) ไม่มีประโยชน์ในการดูดน้ำหรือไอออนอื่นๆ ดังนั้นจึงถือได้ว่าแร่ดินขาวไม่มี internal surface มีแต่ external surface เท่านั้นที่มีผลต่อการดูดน้ำหรือไอออน ส่วนพฤติกรรมการดูดน้ำของดินขาว พบว่า เมื่อนำแร่ดินขาวไปส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงๆ จะเห็นว่า ผลึกของดินขาวจะมีลักษณะเป็นแผ่นรูปหกเหลี่ยมแบนๆ ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวนี้มีลักษณะพิเศษคือ เมื่ออนุภาคของแร่ดินขาวได้รับน้ำที่มีสภาพเป็นกลาง หรือเป็นกรดอ่อนๆ หรือด่างอ่อนๆ โครงสร้างที่เป็นส่วนด้านหน้าของแผ่นจะทำปฏิกิริยากับน้ำที่เข้ามา เกิดเป็นผิวที่มีประจุเป็นลบในขณะที่ด้านขอบของแผ่นเกิดโครงสร้างที่มีประจุเป็นบวก จึงทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วบวกกับขั้วลบตรงบริเวณระหว่างส่วนหน้าของแผ่นหนึ่งกับส่วนขอบของอีกแผ่นหนึ่งต่อเนื่องกันไป ด้วยเหตุนี้จึงทำให้แร่ดินขาวสามารถที่จะดูดซับน้ำไว้ได้ [16]

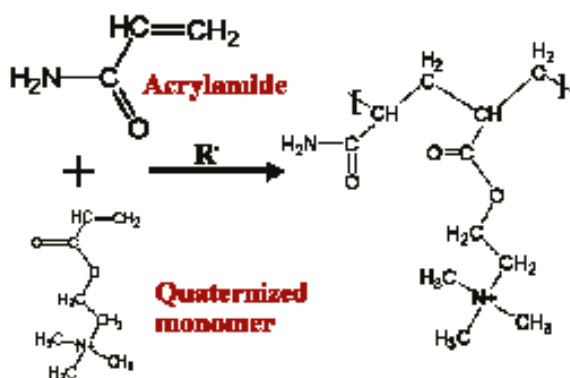
2.8 โพลีอะครายลาไมด์

2.8.1 โพลีเมอร์

ชื่อทาง IUPAC ของอะครายลาไมด์ คือ prop – 2 – enamide [17]

โพลีเมอร์สามารถแบ่งได้อย่างกว้างๆ เป็น 2 ชนิด คือ

1. โพลีเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ มีอยู่หลายชนิด เช่น เซลลูโลส (Cellulose), เจลาติน (Gelatin) และแป้ง (Starch)
2. โพลีเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ซึ่งเกิดขึ้นในปี ค.ศ.1979 ได้มีการสังเคราะห์โพลีเมอร์ขึ้นอย่างสมบูรณ์ และที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ โพลีอะครายลาไมด์ ที่สร้างขึ้นจากโมโนเมอร์ที่มารวมกันเป็นสายโซ่ยาว โดยจำนวนโมเลกุลจะประกอบด้วยน้ำหนักรวมโมเลกุลในปริมาณเป็นล้านหน่วย



ภาพที่ 2-14 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ของอะครายลาไมด์โคโพลิเมอร์ [18]

โดยองค์ประกอบและรูปแบบทางด้านกายภาพของโพลิเมอร์มีรูปร่างเป็นโซ่ยาว(long chain) ซึ่งเป็นสารเคมีชนิดพิเศษ สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้อย่างสมบูรณ์จากโมโนเมอร์หลายๆอันมารวมกัน หรือสามารถทำได้โดยการเติมสารเคมีลงไป เพื่อไปเพิ่มหน้าที่ของโมโนเมอร์ ซึ่งเป็นตัวแบ่งประเภทของโพลิเมอร์ที่เกิดขึ้น มีอยู่ 2 แบบ คือ

1. แอนไอออนิกโพลิเมอร์ (Anionic Polymer)

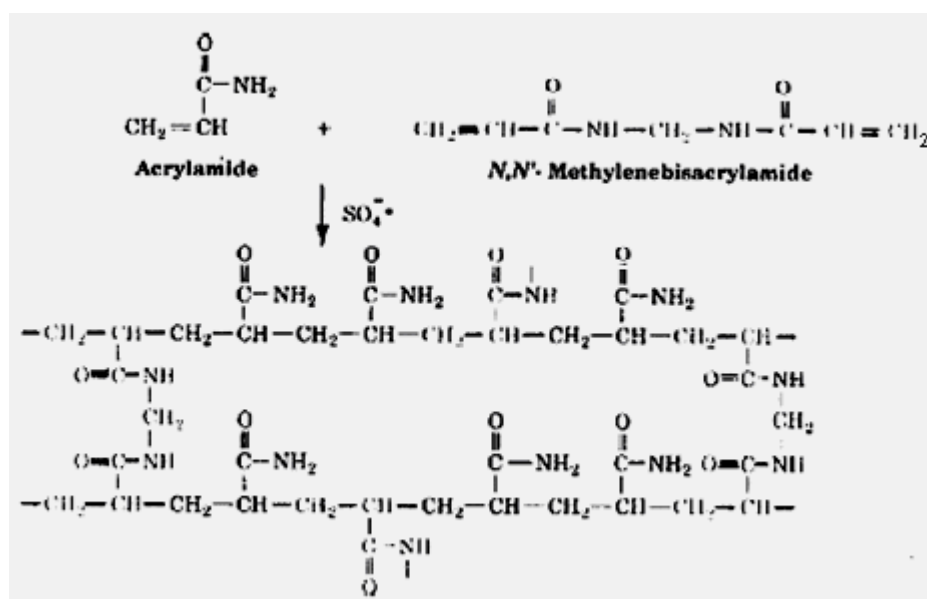
โดยจะมีประจุลบบนส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ ซึ่งจำนวนของประจุลบขึ้นอยู่กับจำนวนกลุ่มของอะครายลาไมด์ที่ละลายอยู่ในกรดอะครายลิก โดยชนิดของแอนไอออนิกโพลิเมอร์ เช่น กรดโพลิอะครายลาไมด์ (Polyacrylamide acid), ไฮโดรไลต์โพลิอะครายลาไมด์ (hydrolyzed polyacrylamide) และโพลีสไตรีนซัลเฟต (Polystyrene sulfate) เป็นต้น

สารรวมตะกอนโพลิอะครายลาไมด์ประเภทแอนไอออนิก มีประจุไฟฟ้าเป็นลบเมื่อละลายน้ำ และทำให้เกิดเป็นกลุ่มเอไมด์ (NH_2) เกิดขึ้น หรือเกิดจากการรวมกลุ่มของแอนไอออนิกโมโนเมอร์ จนเกิดเป็นอะครายลาไมด์โพลิเมอร์

2. แคตไอออนิกโพลิเมอร์ (Cationic Polymer)

โดยจะมีประจุบวกบนส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ ระดับประจุบนโพลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับจำนวนไอออนของกลุ่มไนโตรเจน (nitrogen groups) ที่มีประสิทธิภาพสูงในการปรับสภาพของตะกอนซึ่งมีประจุลบ โดยตัวอย่างของแคตไอออนิกโพลิเมอร์ เช่น Polydiallyldimethyl Ammonium (PDADMA, cat-floc) ซึ่งสารรวมตะกอนโพลิอะครายลาไมด์ประเภทแคตไอออนิก เตรียมได้โดยการเปลี่ยนแปลงรูปแบบสารเคมีชนิด non-ionic-polyacrylamide หรือการรวมแคตไอออนิกโมโนเมอร์ด้วยอะครายลาไมด์ โพลิเมอร์ชนิดแคตไอออนิกโพลิเมอร์ จะนิยมใช้ในงานปรับสภาพตะกอน เนื่องจากของแข็งในน้ำตะกอนนั้นมีประจุเป็นลบ

โพลีอะครายลาไมด์ ได้มาจากการเชื่อมไขว้กันระหว่าง อะครายลาไมด์โมโนเมอร์ กับ เมทิลีน-บิส-อะครายลาไมด์ (N,N' - Methylene - bis - acrylamide) ด้วยพันธะเปปไทด์ได้ ลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาคือแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (ammonium persulphate) แสดงลักษณะการเชื่อมไขว้ของโพลีอะครายลาไมด์ ดังนี้



ภาพที่ 2-15 แสดงโครงสร้างของโพลีอะครายลาไมด์ [19]

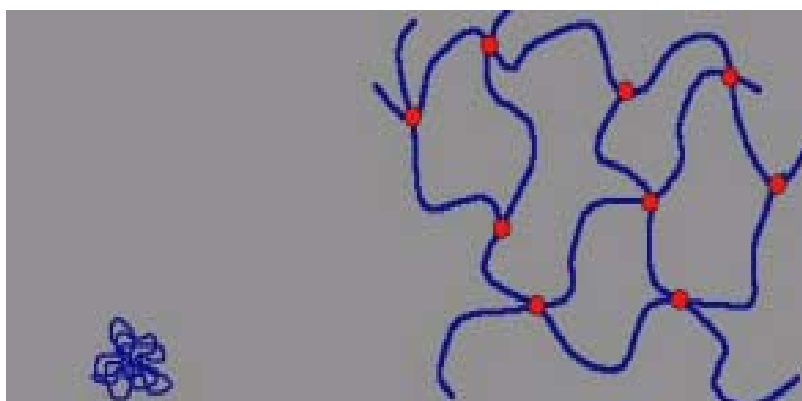
2.8.2 ความสามารถในการดูดซับน้ำของโพลีอะครายลาไมด์

โพลีอะครายลาไมด์เป็นโพลิเมอร์ที่มีสมบัติการดูดซับน้ำไว้ในโมเลกุลได้เป็นจำนวนมาก ซึ่งผลการทดลองในห้องปฏิบัติการพบว่า โพลีอะครายลาไมด์สามารถดูดซับน้ำกลั่นได้ในปริมาณที่มากกว่าน้ำหนักของโพลิเมอร์ถึง 800 เท่า [20] แต่หากทดลองกับน้ำชนิดอื่น อย่างเช่น น้ำประปา ความสามารถในการดูดซับน้ำจะลดลง เพราะโดยทั่วไปน้ำประปามีสารต่างๆ เจือปนและแขวนลอยอยู่ โพลีอะครายลาไมด์นิยมใช้เป็นดินวิทยาศาสตร์ ที่มีลักษณะเหมือนวุ้นใส มีสีใส สวยงาม เพราะสามารถเก็บกักน้ำได้มาก ซึ่งช่วยให้ไม่ต้องเสียเวลาในการรดน้ำบ่อย



ภาพที่ 2-16 แสดงลักษณะของโพลีอะครายลาไมด์ก่อนและหลังการดูดน้ำ

ในทางวิชาการ สารที่มีสมบัติดูดซับน้ำได้ในปริมาณมากจะถูกเรียกว่า สารโพลิเมอร์ดูดซับยิ่งยวด (Super Absorbent Polymer - SAP)



ภาพที่ 2-17 แสดงลักษณะโมเลกุลของโพลีอะครายลาไมด์ก่อนแช่น้ำ (ซ้าย) และหลังแช่น้ำ (ขวา)

โดยทั่วไปการละลายของสาร คือ การที่สารชนิดหนึ่งแพร่กระจายจนมีความเข้มข้นของสารเท่ากันหมดทั่วทั้งของเหลว แต่เนื่องจากโพลีเอครายลาไมด์เป็นโพลิเมอร์ดูดซับยังยวดยิ่งซึ่งเป็นโพลิเมอร์ที่โมเลกุลมีขนาดใหญ่มาก อีกทั้งโครงสร้างโมเลกุลมีลักษณะคล้ายร่างแหหรือตาข่าย ดังนั้นเมื่อมีโมเลกุลของน้ำแทรกซึมเข้าไปในโมเลกุลของโพลีเอครายลาไมด์แล้ว โมเลกุลของโพลีเอครายลาไมด์จึงเพียงแค่ถูกทำให้คลายตัวออกมา แต่ไม่สามารถแพร่กระจายออกได้ เพราะการยึดติดกันของเส้นสายโพลิเมอร์ในโมเลกุลเอง จึงทำให้ลักษณะภายนอกหลังจากโพลีเอครายลาไมด์ดูดน้ำเข้าไปแล้ว มีลักษณะเป็นก้อนคล้ายวุ้นหรือเจลใส ส่วนการที่โมเลกุลของน้ำสามารถยึดเกาะกับโมเลกุลของสารโพลีเอครายลาไมด์ได้นั้น เนื่องจากหมู่เอมีน ($-NH_2$) ของสารโพลีเอครายลาไมด์ เกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลน้ำ (H_2O) ซึ่งแรงนี้เป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนที่เกิดเฉพาะอะตอมของไฮโดรเจน (H) กับอะตอมของออกซิเจน (O) หรือไนโตรเจน (N) หรือฟลูออรีน (F) เท่านั้น

2.9 เหล็กกล้าคาร์บอน

การศึกษาแผนภูมิสมดุลของเหล็กกับคาร์บอนมีความสำคัญมาก เพราะคุณสมบัติของเหล็กที่ใช้อยู่ในงานวิศวกรรมเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็ก และการที่จะเข้าใจถึงคุณสมบัติต่างๆ ของเหล็กได้ดี ย่อมต้องเข้าใจเรื่องของแผนภูมิสมดุลของเหล็กกับคาร์บอนเป็นหลัก และจะต้องทำความเข้าใจความหมายของศัพท์ที่เกี่ยวข้องเสียก่อน ดังต่อไปนี้ [21]

1. เฟอไรต์ (Ferrite) บางทีเรียกว่า เหล็กอัลฟา ซึ่งคาร์บอนสามารถละลายได้ในเหล็กมากที่สุด 0.0218 % ที่อุณหภูมิ 727 องศาเซลเซียส มีระบบผลึกเป็น bcc. (Body Centered Cubic)

2. ออสเทนไนต์ (Austenite) บางทีเรียกว่า เหล็กแกมมา ซึ่งคาร์บอนสามารถละลายได้ในเหล็กแกมมามากที่สุด 2.11 % ที่อุณหภูมิ 1,148 องศาเซลเซียส มีระบบผลึกเป็น fcc. (Face - Centered Cubic) สังเกตว่าคาร์บอนเป็นตัวที่ช่วยให้ออสเทนไนต์มีความเสถียรภาพมากขึ้น จะพบว่าเหล็กที่บริสุทธิ์ จะมีช่วงเป็นออสเทนไนต์เพียง 912 องศาเซลเซียส ถึง 1394 องศาเซลเซียส แต่ขอบเขตนี้จะกว้างขึ้น เมื่อมีคาร์บอนละลายอยู่

3. เฟอไรต์เดลต้า คือ สารละลายของแข็งของเหล็กกับคาร์บอนในช่วงอุณหภูมิใกล้จุดหลอมตัวของเหล็ก (ประมาณ 1,394 องศาเซลเซียส ถึง 1,538 องศาเซลเซียส) โดยที่คาร์บอนสามารถละลายได้สูงสุด 0.09 % ที่อุณหภูมิ 1,495 องศาเซลเซียส มีระบบผลึกเป็น bcc (Body - Centered Cubic) เช่นเดียวกับเหล็กเฟอไรต์หรือเหล็กอัลฟา

4. ซีเมนไต์ (Cementite หรือ Iron Carbide) เมื่อปริมาณคาร์บอนในระบบเหล็ก – คาร์บอน มีมากกว่าที่มันจะละลายในเฟอร์ไรต์หรือออสเตนไนต์ได้หมด ซึ่งคาร์บอนที่เหลือจะจับตัวกับเหล็ก เกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound) ระหว่างเหล็กกับคาร์บอน โดยมีคาร์บอนผสมอยู่ 6.67 % มีสูตรคือ Fe_3C ซึ่งเป็นเหล็กที่มีความแข็งสูง แต่จะเปราะแตกหักได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระแทก

5. เพิร์ลไลต์ (Pearlite) คือ ผลึกที่เกิดขึ้นระหว่างเฟอร์ไรต์ (0.0218 % คาร์บอน) กับ ซีเมนไต์ (6.67 % คาร์บอน) โดยเกิดจากปฏิกิริยา Eutectoid ในขณะที่ทำให้เหล็กเย็นลงอย่างช้าๆ ตรงที่อุณหภูมิ 727 องศาเซลเซียส การเกิดเฟอร์ไรต์และซีเมนไต์ จะเกิดขึ้นพร้อมกันที่อุณหภูมิ คงที่ เกิดผลึกมีลักษณะเป็นแถบยาวๆ สลับกันระหว่างเฟอร์ไรต์และซีเมนไต์ เรียกโครงสร้าง แบบนี้ว่า Lamellar Structure ดังนั้น เพิร์ลไลต์ จึงไม่ใช่เฟสเดียว แต่เป็นโครงสร้างที่เกิดจาก สองเฟสประกอบกัน

2.9.1 เหล็กกล้า (Steel)

เนื่องจากเหล็กบริสุทธิ์มีกำลังต่ำเกินกว่าที่จะนำไปใช้งานวิศวกรรมได้ จึงมีการเติมธาตุผสม (alloying elements) เข้าไปในเนื้อเหล็ก เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ สามารถแบ่งเหล็กออกได้เป็น 2 ชนิด คือ เหล็กกล้าและเหล็กหล่อ โดยอาศัยปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ กล่าวคือ เหล็กกล้า คือเหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกิน 2.00 % ถ้ามีคาร์บอนมากกว่านั้น จะเป็นเหล็กหล่อ

โดยทั่วไปเหล็กกล้าจะอยู่ในรูปของ เหล็ก + คาร์บอน + ธาตุผสม + สารมลทิน โดยที่ ปริมาณเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนในเหล็กกล้านั้น จะมีตั้งแต่ 0.05 % คาร์บอน ถึง 1.40 % คาร์บอน โดยน้ำหนัก เมื่อเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนสูงขึ้น กำลังวัสดุ (Strength) และความแข็ง (Hardness) ของเหล็กกล้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะส่งผลทำให้ความเหนียว (Ductility) ของเหล็กกล้านั้นมีค่าลดลง

เหล็กกล้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ เหล็กกล้าคาร์บอน (Plain Carbon Steels) และ เหล็กกล้าผสม (Alloy Steels)

2.9.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอน (Plain Carbon Steels)

คือ เหล็กกล้าที่มีคาร์บอนเป็นธาตุผสมหลัก และมีปริมาณของธาตุผสมอื่นๆ อยู่ในปริมาณ น้อย ตามนิยามของ AISI (American Iron and Steel Institute) ได้จำกัดปริมาณของธาตุผสมไว้ดังนี้ คือ ธาตุแมงกานีสไม่เกิน 1.65 %, ธาตุซิลิกอนไม่เกิน 0.60 %, ธาตุทองแดงไม่เกิน 0.60 % และ ปริมาณของธาตุฟอสฟอรัสรวมกับธาตุกำมะถันไม่เกิน 0.05 % ซึ่งถือได้ว่าเฉพาะธาตุคาร์บอน เท่านั้นที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของเหล็กกล้า โดยธาตุผสมในเหล็กกล้านี้ นอกจากคาร์บอนแล้ว จะมีซิลิกอนและแมงกานีส ส่วนกำมะถันและฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปของสารมลทิน เราแบ่งชนิด ของเหล็กกล้าคาร์บอนตามเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนที่อยู่ในเนื้อเหล็กดังนี้คือ

2.9.1.1.1 เหล็กกล้าละมุน หรือ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Mild Steel หรือ Low Carbon Steel) มีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.25 %

2.9.1.1.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel) มีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 0.25 % แต่ไม่ถึง 0.45 %

2.9.1.1.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel) มีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 0.45 % แต่ไม่ถึง 1.50 %

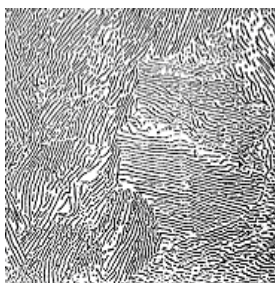
โดยโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอน จะขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุคาร์บอนที่ผสมอยู่เป็นหลัก และสามารถพิจารณาได้จากแผนภูมิสมดุลของเหล็ก - คาร์บอน



(ก)



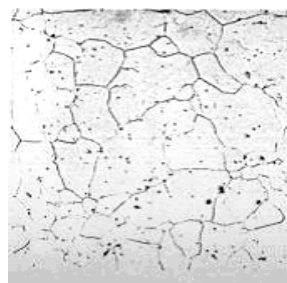
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพที่ 2-18 แสดงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าที่มีปริมาณคาร์บอนต่างๆ คือ

(ก) เฟอไรต์ 0.00 % คาร์บอน, (ข) เฟอไรต์ + เพิร์ลไลต์ 0.40 % คาร์บอน

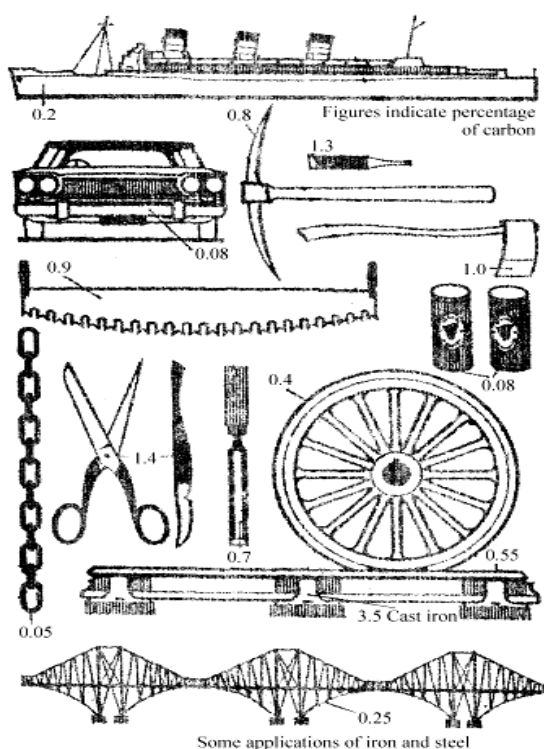
(ค) เพิร์ลไลต์ 0.77 % คาร์บอน,

(ง) เพิร์ลไลต์ + ซีเมนไต์ที่ขอบเกรน 1.40 % คาร์บอน, (จ) ออสเทนไนต์

อาจแบ่งประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนโดยอาศัยลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคก็ได้ กล่าวคือ เหล็กกล้าที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอน 0.77 % จะมีโครงสร้างจุลภาคเป็นเพิร์ลไลต์อย่างเดียวย เราเรียก

เหล็กประเภทนี้ว่า Eutectoid Steels แต่สำหรับเหล็กกล้าที่มีคาร์บอนต่ำกว่า 0.77 % เราเรียกว่า Hypoeutectoid Steels (โครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยโปรยูเทคตอยด์ของเฟอร์ไรท์กับเพิร์ลไลต์) และเหล็กกล้าที่มีคาร์บอน สูงกว่า 0.77 % เราเรียกว่า Hypereutectoid Steels (โครงสร้างจุลภาคจะประกอบด้วยโปรยูเทคตอยด์ของซีเมนไตท์กับเพิร์ลไลต์)

คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนจะขึ้นตรงกับประเภทและปริมาณของโครงสร้างจุลภาคภายในเนื้อเหล็กนั้นๆ โดยที่เฟอร์ไรท์จะมีกำลังวัสดุและความแข็งไม่สูงมากนัก แต่จะมีความเหนียว ส่วนซีเมนไตท์จะมีความแข็งสูงแต่เปราะ ในขณะที่เพิร์ลไลต์จะมีกำลังวัสดุสูง และสามารถยืดตัวได้ดีภายใต้แรงดึง และอสเทนไนท์จะมีกำลังวัสดุต่ำ นุ่ม สามารถรีดให้เข้ารูปได้ง่าย เป็นต้น ส่วนประเภทและปริมาณของโครงสร้างจุลภาคจะขึ้นกับส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้านั้นๆ ภาพที่ 2-19 แสดงตัวอย่างการใช้งานโลหะประเภทเหล็ก โดยระบุเปอร์เซ็นต์คาร์บอนของเหล็กที่นำไปทำชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ



ภาพที่ 2-19 แสดงตัวอย่างชิ้นส่วนและผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโลหะในกลุ่มเหล็ก โดยตัวเลขระบุถึงเปอร์เซ็นต์คาร์บอนของเหล็กนั้นๆ

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมี

1. ดินขาว (Kaolin , China clay)
2. อะครายลาไมด์ โมโนเมอร์ (Acrylamide Monomer) : AR Grade
3. แป้งมัน (Potato starch)
4. ซีริก แอมโมเนียม ไนเตรต (Ceric Ammonium Nitrate) : APS
5. เมทิลีน-บิส- อะครายลาไมด์ (N,N' – Methylene – bis – acrylamide) : AR Grade
6. กรดออกซาลิก (Oxalic acid)
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide)
8. ก๊าซไนโตรเจน (N_2)
9. น้ำกลั่น (Distilled Water)
10. โพตัสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate) : AR Grade
11. ไทโอยูเรีย (Thiourea): AR Grade
12. แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium Persulfate)
13. กรดฟอร์มิก (Formic acid) : AR Grade
14. เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด SK5

3.2 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.2.1 ขวด 3 คอ และขวด 4 คอ (3-neck และ 4-neck round bottom flask)
- 3.2.2 เครื่องกวน (Mechanical Stirrer)
- 3.2.3 คอนเดนเซอร์ (Condenser)
- 3.2.4 เทอร์โมมิเตอร์อ่านอุณหภูมิได้ถึง $100^{\circ}C$ (Thermometer)
- 3.2.5 อ่างน้ำแข็ง (ice bath)
- 3.2.6 อ่างน้ำมัน (oil bath)
- 3.2.7 ปิ๊มสูญญากาศ
- 3.2.8 แผ่นเหล็ก

- 3.2.9 เครื่องโพเทนชิโอสเตท (Potentiostat) ยี่ห้อ Autolab รุ่น PGSTAT10
- 3.2.10 เครื่องคอมพิวเตอร์
- 3.2.11 เครื่องพิมพ์
- 3.2.12 ไฮโกรมิเตอร์
- 3.2.13 เครื่องชั่งอ่านได้ละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น BP 210 S.
- 3.2.14 เครื่องขัดชิ้นงานทดสอบ ยี่ห้อ Struers
- 3.2.15 เครื่องให้ความร้อนและควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ PNP รุ่น HS-2
- 3.2.16 เซลล์การทดลองประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี
 - 3.2.16.1 Ag / AgCl Reference Electrode
 - 3.2.16.2 Separate Pt Electrode
 - 3.2.16.3 Luggin Probe
- 3.2.17 กล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope) ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX 60M
- 3.2.18 โปรแกรมถ่ายภาพ Vidicap
- 3.2.19 กระดาษทรายเบอร์ 240 และ 1000
- 3.2.20 เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum 2000
- 3.2.21 เครื่องทดสอบความหนืด (Viscometer) ยี่ห้อ Cannon เบอร์ 350
- 3.2.22 เครื่องมือทดสอบด้วยเทคนิคมิสชันสเปกโตรสโกปียี่ห้อ Spectrolap Model : M8

3.3 การเตรียมวัสดุผสมเพื่อเป็นผิวเคลือบ

3.3.1 การทำให้ดินขาว (Kaolinite) มีความบริสุทธิ์ขึ้น [22]

โดยการนำดินขาวมาผสมกับกรดออกซาลิก (0.15 M) ในอัตราส่วน 20.00 กรัม : 100.00 มิลลิลิตร กวนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (27 °C) เป็นระยะเวลา 2-3 วัน นำไปกรองแบบลดความดัน เพื่อเก็บส่วนที่เป็นตะกอนดินขาวที่อยู่ส่วนบนของกรวยกรอง นำไปอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

3.3.2 ขั้นตอนการกราฟต์ดินขาว-แป้งมันกับอะครายลาไมด์ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

3.3.2.1 ส่วนที่ 1 โดยนำแร่ดินขาวที่มีความบริสุทธิ์แล้วมา 2.00 กรัม (คิดเป็น 7.06 %), อะครายลาไมด์โมโนเมอร์ 20.00 กรัม (คิดเป็น 70.58 %), ตัวเชื่อมปฏิกิริยา (crosslinker คือ N,N' - Methylene – bis – acrylamide) 0.09 กรัม (คิดเป็น 0.32 %) และน้ำกลั่น 40.00 มิลลิลิตร เทใส่ลงไปในขวด 4 คอ ที่ต่อเชื่อมอยู่กับเครื่องกวน (Mechanical Stirrer), คอนเดนเซอร์,

เทอร์โมมิเตอร์ และท่อก๊าซไนโตรเจนสำหรับทำการไล่ออกซิเจน และทำการกวนเป็นระยะเวลา 20 นาที

3.3.2.2 ส่วนที่ 2 นำแป้งมัน 3.00 กรัม (คิดเป็น 10.59 %) ผสมลงในน้ำกลั่น 70.00 มิลลิลิตร ให้อุณหภูมิที่ 80 °C พร้อมกับกวนตลอด เป็นระยะเวลา 10 นาที จากนั้นเติมตัวริเริ่ม (Initiator คือ Ceric Ammonium nitrate) 0.2 M 5.00 มิลลิลิตรลงไป (คิดเป็นน้ำหนัก 0.548 กรัม หรือ 1.93 %) และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นระยะเวลา 10 นาที จนสารละลายเปลี่ยนสีจากสีส้มเป็นสีเหลือง จากนั้นนำส่วนที่ 2 เติมลงไปในส่วนที่ 1 อย่างช้าๆ และกวนสม่ำเสมอ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการกราฟท์ (Graft copolymerization) เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งขั้นตอนนี้จะต้องมีการพ่นก๊าซไนโตรเจนตลอดเวลา และต้องอยู่ในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจน จากนั้นเติมสารละลาย 1M NaOH 300.00 มิลลิลิตรลงไป แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 90 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยา Saponification จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปตรวจสอบการเกิดปฏิกิริยาการกราฟท์ ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี



ภาพที่ 3-1 แสดงชุดทดลองในการกราฟท์ดินขาว-แป้งมันกับอะครายลาไมด์

3.3.3 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการกราฟท์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

3.3.3.1 นำสารตั้งต้นที่ใช้ในปฏิกิริยาการกราฟท์วัสดุผสม เช่น แร่ดินขาว, แป้งมัน และอะครายลาไมด์โมโนเมอร์ มาทำการวิเคราะห์เพื่อที่จะหาหมู่ฟังก์ชันต่างๆ โดยวิธีการอัดเป็น KBr dish ก่อน แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

3.3.3.2 นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการกราฟท์ มาทำการวิเคราะห์ เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันต่างๆที่เกิดขึ้น โดยนำฟิล์มที่ได้มาเปรียบเทียบกับฟิล์มของสารตั้งต้น เพื่อพิสูจน์ว่าปฏิกิริยาการกราฟท์ของวัสดุผสมนั้นเกิดขึ้นจริง

3.3.4 การสังเคราะห์โพลีอะครายลาไมด์

โดยการละลายอะครายลาไมด์ โมโนเมอร์ 2.50 กรัม และแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต 0.17 กรัม ในน้ำกลั่น ปริมาตรเป็น 50.00 มิลลิลิตร จากนั้นเทสารละลายทั้งหมดลงในขวด 3 คอที่แช่อยู่ในอ่างน้ำแข็ง ทำการกำจัดก๊าซออกซิเจนออก (Degas) โดยการพ่นก๊าซไนโตรเจนในสารละลายนาน 3 นาที จากนั้นปิดก๊าซไนโตรเจน แล้วเปิดเครื่องปั๊มสุญญากาศที่ 50.00 มิลลิบาร์ ประมาณ 10 นาที ทำการกำจัดก๊าซออกซิเจนซ้ำ 3 ครั้ง ทิ้งให้อุณหภูมิของขวด 3 คอเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิห้อง นำไปแช่ลงในอ่างน้ำมันที่มีอุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ได้หยดลงในเมทานอล จะเกิดเป็นตะกอนสีขาว ทำการกรองตะกอนดังกล่าว จะได้โพลีอะครายลาไมด์ ซึ่งสามารถตรวจสอบความใกล้เคียงของมวลโมเลกุลของโพลีอะครายลาไมด์ในการสังเคราะห์แต่ละครั้งได้โดยใช้วิธีการวัดความหนืด



ภาพที่ 3-2 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์โพลีอะครายลาไมด์

3.3.5 การทดสอบความหนืดของโพลีอะครายลาไมด์

โดยการนำโพลีอะครายลาไมด์ที่สังเคราะห์ได้ในแต่ละครั้งมาทำการวัดความหนืด โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

3.3.5.1 การทดสอบความหนืดในที่นี้ใช้เครื่องวัดความหนืด (viscometer) ของ Cannon เบอร์ 350

3.3.5.2 การทดสอบความหนืดในที่นี้ ใช้ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณคือ $0.50 \text{ cSt} / \text{s}$ และสภาวะที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่อุณหภูมิ 31.5°C

3.3.5.3 ขั้นตอนการทดสอบความหนืดของโพลีอะครายลาไมด์ มีดังนี้

3.3.5.3.1 นำโพลีอะครายลาไมด์ 2.00 กรัมใส่ลงในบีกเกอร์ แล้วนำมาละลายโดยการเติมกรดฟอร์มิกลงไปปริมาณ 50.00 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง โดยทำลักษณะเดียวกันทั้งหมด 4 ชุด

3.3.5.3.2 นำสารละลายโพลีอะครายลาไมด์ ที่เตรียมไว้ในแต่ละชุดมาทำการทดสอบความหนืด โดยการนำสารละลายโพลีอะครายลาไมด์ใส่ในเครื่องวัดความหนืด โดยการเทสารละลายโพลีอะครายลาไมด์จากบีกเกอร์ลงไป จนได้ปริมาณของสารละลายโพลีอะครายลาไมด์ตามที่ต้องการ

3.3.5.3.3 นำเครื่องวัดความหนืดมาแขวนไว้ที่อ่างน้ำมัน โดยส่วนล่างของเครื่องวัดความหนืดจุ่มลงในอ่างน้ำมันที่มีการควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 31.5°C

3.3.5.3.4 ใช้ลูกยางทำการดูดสารละลายโพลีอะครายลาไมด์ ให้อยู่สูงกว่าจุดจับเวลาจุดแรก (Start Mark) ประมาณ 5.00 มิลลิเมตร ปล่อยให้สารละลายโพลีอะครายลาไมด์ไหลโดยอิสระภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก เริ่มจับเวลาเมื่อระดับบนไหลถึงจุดจับเวลาจุดแรก และหยุดเมื่อถึงจุดจับเวลา จุดที่สอง (Stop Mark) บันทึกเวลาที่ได้เป็นวินาที

3.3.6 การเตรียม $\text{Cr(III)} - \text{thiourea} - \text{polyacrylamide}$

โดยการละลายโพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.76 %) ในน้ำกลั่น 10.00 มิลลิลิตร เติมไทโอยูเรีย 1.20 กรัม (คิดเป็น 4.23 %) กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตรและโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (คิดเป็น 3.53 %) ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 100 ชั่วโมง [23] (จากปริมาณสารที่เป็นของแข็งทั้งหมด ยกเว้นตัวริเริ่มของปฏิกิริยาการกราฟท์ในหัวข้อ 3.3.2. และ 3.3.6. เมื่อนำมาหาน้ำหนักรวมแล้วสามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของสารแต่ละชนิดตามวงเล็บแนบท้าย)

3.3.7 การผสมดินขาวส่วนที่กราฟท์กับสารละลาย $\text{Cr(III)} - \text{thiourea} - \text{polyacrylamide}$

โดยการนำผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนที่ 3.3.6 ใส่ลงในขวด 4 คอของขั้นตอนที่ 3.3.2 ทำการกวนและพ่นก๊าซไนโตรเจนตลอดเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นปรับสภาพเพื่อลดความเป็นกรดด้วยการเติม 3M NaOH ทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส จากนั้นนำไปกรอง ส่วนที่อยู่บนกระดาษกรองคือวัสดุผสมที่จะนำไปทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้นและความสามารถในการหน่วงการกัดกร่อน โดยการนำไปเคลือบบนชิ้นงานทดสอบที่เป็นแผ่นเหล็กต่อไป

3.4 การเตรียมแผ่นเหล็กที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดสอบเหล็กด้วยเทคนิคอิมิตชันสเปกโตรสโกปี (Emission Spectroscopy) เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีและอัตราส่วนขององค์ประกอบแต่ละตัวที่พบในเหล็กที่ใช้สำหรับการทดลองในครั้งนี้ เพื่อที่จะนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน แล้วทำการเทียบเกรดของเหล็กว่าเป็นเหล็กชนิดใด ได้รับการยืนยันจากศูนย์ทดสอบของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย (Iron and Steel Institute of Thailand) ซึ่งทำการทดสอบที่สภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิ 24.9 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 58 % RH ด้วยเครื่องทดสอบยี่ห้อ Spectrolab Model : M8, Type : LAVWA 18A, S/N : 4N0149 ได้ผลการทดสอบดังนี้


สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย
IRON AND STEEL INSTITUTE OF THAILAND

TESTING CENTER
Page 2/2

Attachment : Testing Results of Chemical Composition

Request No.	: 000890	September 13, 2006
Date Tested	: September 13, 2006	
Customer	: Mr. Apithon Saovarose	
Sample	: Steel Plate SK 5	
Temperature	: 24.9°C , Humidity : 58 %RH	
Tested by	: Spectrolab Model : M8, Type : LAVWA 18A, S/N : 4N0149	
Last Calibration	: January 19, 2006	

Sample Name	Steel Plate SK 5	JIS G 4401
Operation No.	TC 491800	Designation of grade
Element	Result	SK85 (SK 5)
C	0.8554	0.80 to 0.90
Si	0.2233	0.10 to 0.35
Mn	0.3687	0.10 to 0.50
P	0.0068	0.030 max.
S	0.0051	0.030 max.



1. The above results are valid exclusively for tested/analysed samples as mentioned in this report.

2. Publication of the results on testing and analysis is prohibited unless written permission is obtained from the governor of ISIT

ISIT-17025-TC-002(24.01.49) Rev.01

สำนักงานพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน ชั้น 5 ซอยติวานันท์ ถนนพหลโยธิน 4 แขวงพระโขนง เขตคลองเตย กรุงเทพมหานคร 10110 โทร: 02-713-6290-2, 02-712-4402-7, 02-713-6547-49 โทรสาร: 02-713-6290

5th Fl., Bureau of Supporting Industries Development, Soi Tiwanan, Rama IV Road, Prakanong, Klong-Toey, Bangkok 10110 Tel : 02-713-6290-2, 02-712-4402-7, 02-713-6547-49 Tele fax : 02-713-6290

ภาพที่ 3-3 แสดงผลการทดสอบด้วยเทคนิคอิมิตชันสเปกโตรสโกปี
เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอน

จากผลการทดสอบด้วยเทคนิคอิมิตชันสเปกโตรสโกปี พบว่า องค์ประกอบทางเคมีและอัตราส่วนขององค์ประกอบแต่ละตัวที่พบในเหล็ก มีดังนี้

1. ธาตุคาร์บอน (C)	มีปริมาณ	0.8554	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
2. ธาตุซิลิกอน (Si)	มีปริมาณ	0.2233	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
3. ธาตุแมงกานีส (Mn)	มีปริมาณ	0.3687	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
4. ธาตุฟอสฟอรัส (P)	มีปริมาณ	0.0068	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
5. ธาตุซัลเฟอร์ (S)	มีปริมาณ	0.0051	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

จากผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและอัตราส่วนขององค์ประกอบแต่ละตัวที่พบในเหล็กนั้น เมื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานเพื่อหาชนิดของเหล็กตามตารางที่ 3-1 พบว่าเหล็กที่ใช้สำหรับการทดลองในครั้งนี้ เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SK5 จากมาตรฐาน JIS ซึ่งสามารถเทียบกับมาตรฐาน AISI ได้ว่าเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด W1-8

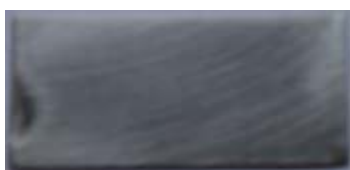
ตารางที่ 3-1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนตามมาตรฐาน JIS เกรด SK5 [24]

Carbon	Silicon	Manganese	Nickel	Chromium	Molybdenum	Copper
0.80-0.90	0.35 max	0.50 max	0.25 max	0.30 max	-	0.25 max

เหล็กกล้าคาร์บอนเกรด SK5 เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนสูง ชุบแข็งได้ง่าย ทนทานต่อการเสียดสีได้ดี มีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติเป็นสปริงสูง ใช้สำหรับทำชิ้นส่วนที่เป็นสปริงในเครื่องจักรกล นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ทำใบมีดสำหรับตัดได้ดีอีกด้วย

การเตรียมแผ่นเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ ทำได้ดังนี้

นำแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน ขนาดประมาณ 2.50 x 4.50 ตารางเซนติเมตร มาทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 240 จนสนิมขนาดใหญ่หลุดออกและแผ่นเหล็กเริ่มเรียบ จากนั้นขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1000 จนแผ่นเหล็กเรียบและมีความเงาพอสมควร จากนั้นนำแผ่นเหล็กไปล้างด้วยอะซิโตน 2 ครั้ง เพื่อทำความสะอาดแล้วนำไปเป่าจนแห้ง และนำไปชั่งน้ำหนักก่อนการทดสอบ



ภาพที่ 3-4 แสดงแผ่นเหล็กที่เตรียมได้ก่อนการทดสอบ

3.5 การเคลือบแผ่นเหล็ก

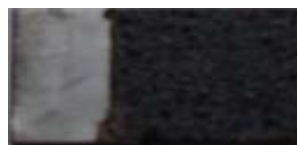
นำวัสดุผสมที่ได้ มาทำการบดให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้โกร่งและหินบด เมื่อบดให้เข้ากันได้แล้วจึงนำไปเคลือบบนแผ่นเหล็กที่ได้เตรียมไว้ให้ทั่ว จากนั้นทำการเป่าด้วยลมร้อนให้แห้งพอประมาณ ทำการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักชนิดที่อ่านทศนิยมได้ 4 ตำแหน่ง จดบันทึกน้ำหนักแล้วนำไปแขวนในกล่องที่มีการควบคุมความชื้นและอยู่ในสภาวะปิดต่อไป



ภาพที่ 3-5 แผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม แป้งมัน 3.00 กรัม
โพลิอะครายลาไมด์ 0.00 กรัม (0.00 %) และโปตัสเซียมไดโครเมต 0.00 กรัม (0.00 %)



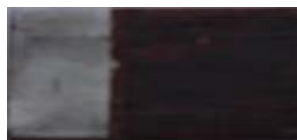
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 3-6 แผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม แป้งมัน 3.00 กรัม
 โพลีเอครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %), กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร,
 ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต
 (ก) 1.00 กรัม (3.53 %), (ข) 0.50 กรัม (1.80 %),
 (ค) 0.25 กรัม (0.91 %), (ง) 0.00 กรัม (0.00 %)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3-7 แผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม แป้งมัน 3.00 กรัม
 กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม,
 โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (3.53 %)
 และโพลีเอครายลาไมด์ (ก) 1.50 กรัม (5.11 %), (ข) 1.00 กรัม (3.47 %)

3.6 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับความชื้นของวัสดุผสมที่เคลือบบนแผ่นหลัก

3.6.1 เตรียมกล่องพลาสติกที่มีฝาปิดมิดชิด นำมาเจาะรูเพื่อทำการจิ้งลวดไว้สำหรับแขวนชิ้นงานทดสอบ

3.6.2 ทำการปิดรูที่เกิดจากการเจาะทั้งหมด เพื่อให้กล่องนั้นเป็นสภาวะปิด

3.6.3 นำไฮโกรมิเตอร์และบีกเกอร์ที่มีการใส่น้ำมาวางไว้ในกล่องที่เตรียมไว้แล้ว เพื่อทำการควบคุมความชื้นให้มีค่าที่ $85 \% \pm 5 \%$

3.6.4 นำชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวเรียบร้อยแล้ว มาแขวนไว้ในกล่องที่อยู่ในสภาวะปิดและมีการควบคุมความชื้น ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ในแต่ละครั้ง จะนำมาเคลือบแผ่นหลักอย่างน้อย 3 แผ่น เพื่อนำค่าต่างๆ ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยต่อไป

3.6.5 ทำการชั่งน้ำหนักชิ้นงานทุกวัน เพื่อดูความเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่เกิดขึ้น แล้วเมื่อครบกำหนดระยะเวลา จึงนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย จากนั้นนำค่าเฉลี่ยที่ได้ในแต่ละผลิตภัณฑ์ มาทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับความชื้น เพื่อจะดูว่าผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์จากอัตราส่วนใดมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดีที่สุด

3.6.6 ทำการศึกษาผลของโพลียเอครายลาไมด์ในผิวเคลือบ ต่อน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของชิ้นงาน โดยการเคลือบผิวหลักด้วยวัสดุผสมที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลียเอครายลาไมด์ 1.00 กรัม, กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปดัสเซียม - ไดโครเมต 1.00 กรัม เปรียบเทียบกับการเคลือบผิวหลักด้วยวัสดุผสมที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม โดยไม่มีการเติมโพลียเอครายลาไมด์, กรดฟอร์มิก, ไทโอยูเรีย และโปดัสเซียมไดโครเมต

3.6.7 ทำการศึกษาผลของปริมาณโพลียเอครายลาไมด์ในผิวเคลือบ ต่อน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของชิ้นงาน โดยการเคลือบผิวหลักด้วยวัสดุผสมที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปดัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม แต่เปลี่ยนปริมาณโพลียเอครายลาไมด์เป็น 0.50 กรัม, 1.00 กรัม และ 1.50 กรัม ตามลำดับ

3.6.8 ทำการศึกษาผลของปริมาณโปดัสเซียมไดโครเมตในผิวเคลือบ ต่อน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของชิ้นงาน โดยการเคลือบผิวหลักด้วยวัสดุผสมที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลียเอครายลาไมด์เป็น 0.50 กรัม, กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร และ ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม แต่เปลี่ยนปริมาณโปดัสเซียมไดโครเมต เป็น 0.00 กรัม, 0.25 กรัม, 0.50 กรัม, 1.00 กรัม และ 1.50 กรัม ตามลำดับ

3.6.9 ทำการศึกษาผลของปริมาณตัวริเริ่ม (ซีริก แอมโมเนียมไนเตรด) ของปฏิกิริยาการกราฟท์ แป้งมันและอะครายลาไมด์ ต่อน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของชิ้นงาน โดยการเคลือบผิวเหล็กด้วยวัสดุผสมที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์เป็น 0.50 กรัม, กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม แต่ใช้ตัวริเริ่มในปริมาณเป็น 0.45 กรัม, 0.55 กรัม และ 0.65 กรัม ตามลำดับ

3.7 การทดสอบความสามารถในการยึดติดและการบวมตัวของฟิล์มเคลือบ

3.7.1 นำชิ้นงานที่เคลือบมาตั้งทิ้งไว้ในสภาวะปิดและมีการควบคุมความชื้นที่ $85\% \pm 5\%$ เป็นระยะเวลา 30 วัน จากนั้นนำกระดาษกาวมาทำการปิดลงไปที่ยื่นงานให้ครอบคลุมผิวเคลือบทั้งหมด จากนั้นทำการลอกกระดาษกาวออกมา ตรวจสอบดูว่ามีฟิล์มเคลือบติดออกมามากน้อยเพียงใด ในแต่ละผลิตภัณฑ์ที่ทำการสังเคราะห์ แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบความสามารถในการยึดเกาะของฟิล์มเคลือบต่อไป

3.7.2 นำชิ้นงานที่เคลือบมาตั้งทิ้งไว้ในสภาวะปิดและมีการควบคุมความชื้นที่ $85\% \pm 5\%$ เป็นระยะเวลา 30 วัน นำมาจุ่มแช่ลงบีกเกอร์ที่ใส่น้ำสะอาดอยู่ โดยที่จะแขวนชิ้นงานให้จุ่มอยู่ในน้ำส่วนหนึ่ง แล้วอีกส่วนหนึ่งให้อยู่เหนือระดับผิวน้ำ เพื่อที่จะทดสอบการบวมตัวของผิวเคลือบ โดยที่ทำการจุ่มแช่ลงไปเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำขึ้นมาตรวจสอบดูความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของผิวเคลือบว่ามีการบวมตัวมากน้อยเพียงใด เมื่อเทียบกับส่วนที่อยู่เหนือระดับผิวน้ำ

3.8 การทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า (Electrochemical tests)



ภาพที่ 3-8 แสดงการต่ออุปกรณ์สำหรับทดสอบความต้านทานการกัดกร่อน

3.8.1 การจัดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

ในการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าใช้ flat cell โดยใช้ชิ้นงานเหล็กที่เคลือบเป็นขั้ว WE (Working Electrode) และใช้อิเล็กโทรด Ag / AgCl เป็นขั้วอ้างอิง (Reference Electrode) โดย Ag / AgCl Electrode จุ่มอยู่ในสารละลายอิ่มตัว KCl โดยมี Luggin Probe เชื่อมจากสารละลายอิ่มตัว KCl สู่อานะทดสอบอีกที่หนึ่งและขั้ว CE (Counter Electrode) เป็นแพลตตินัม (Pt –Electrode)

3.8.2 เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์คือสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 M ลงในเซลล์

3.8.3 เปิดเครื่อง Potentiostat เปิดคอมพิวเตอร์และเปิดไฟล์โปรแกรม GPES.

3.8.4 การทดสอบโดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอไดนามิก ตั้งค่า Scan Rate เป็น 1.60 มิลลิโวลต์ต่อวินาที เริ่มจากค่าเริ่มต้นที่ศักย์ไฟฟ้า -1.00 โวลต์ ไปสิ้นสุดที่ศักย์ไฟฟ้า +1.00 โวลต์

3.8.5 กด start บนจอคอมพิวเตอร์รออนการ scan สิ้นสุดที่ +1.00 โวลต์

3.8.6 ตั้งชื่อผลการทดสอบ และสั่งพิมพ์ผลการทดสอบ

3.8.7 ถ่ายสารละลายออกและทำความสะอาดชุดทดสอบ แล้วถอดชิ้นงานออกจากที่จับ นำมาล้างทำความสะอาด เป่าให้แห้งด้วยลมร้อน

3.9 การถ่ายภาพผิวหน้าชิ้นงานตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์

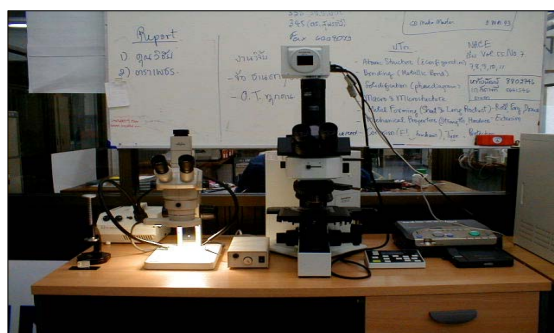
3.9.1 นำชิ้นงานตัวอย่างมาล้างด้วยน้ำกลั่นและถูผิวเคลือบออกให้หมด จากนั้นนำมาเป่าให้แห้งก่อนการถ่ายภาพผิว

3.9.2 ติดตั้งชิ้นงานตัวอย่างในตำแหน่งที่พร้อมถ่าย

3.9.3 เลือกกำลังขยายให้เป็น 50 เท่า หรือ 100 เท่า ปรับโฟกัส และแสงตามต้องการ

3.9.4 เลื่อนชิ้นงานตัวอย่างขึ้น-ลง ซ้าย-ขวา จนได้ภาพผิวที่ต้องการตามวัตถุประสงค์

3.9.5 ถ่ายภาพด้วยโปรแกรม Vidicap และโปรแกรม Photoshop



ภาพที่ 3-9 ชุดถ่ายภาพผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ Olympus BX 60M

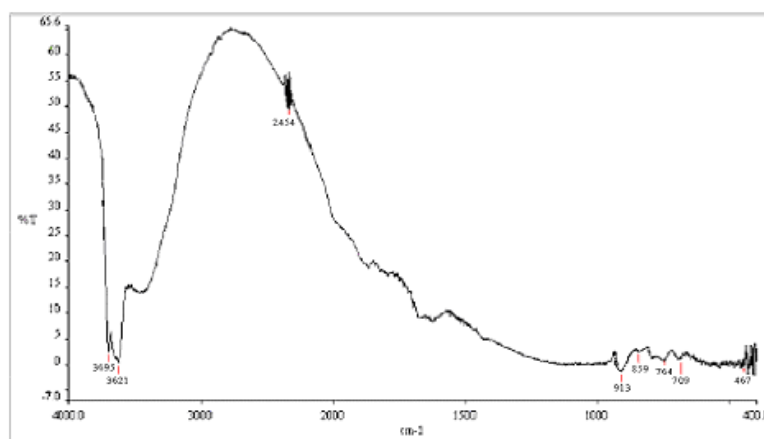
บทที่ 4

ผลการทดลอง

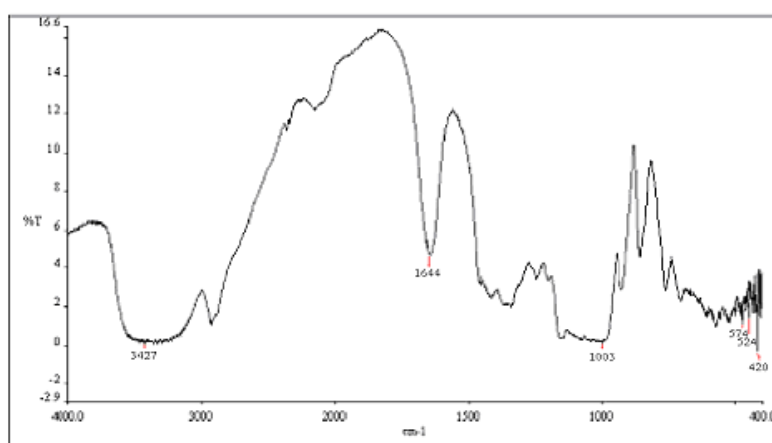
4.1 ผลการตรวจสอบปฏิกิริยาการกราฟต์ดินขาว แป้งมัน และอะครายลาไมด์

ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

จากผลการตรวจสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ให้สเปกตรัมของดินขาว, แป้งมัน, อะครายลาไมด์ และผลิตภัณฑ์จากการกราฟต์ ดังภาพที่ 4-1(ก), (ข), (ค) และ (ง) ตามลำดับ

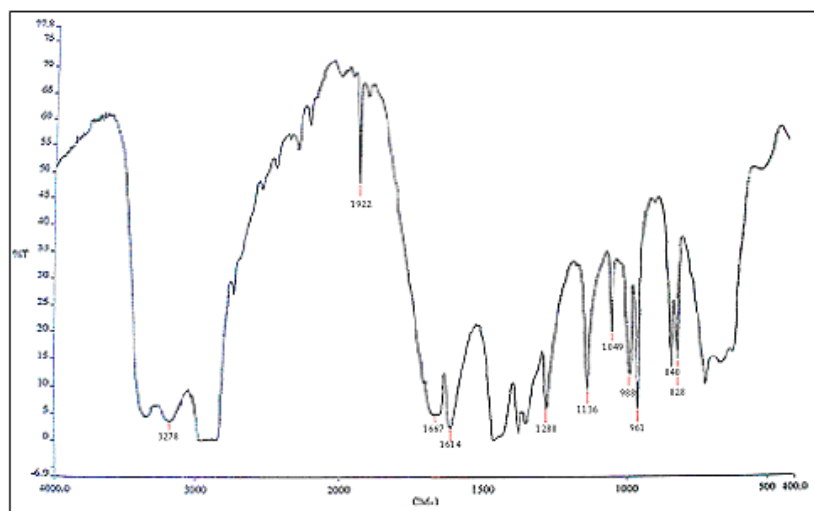


(ก)

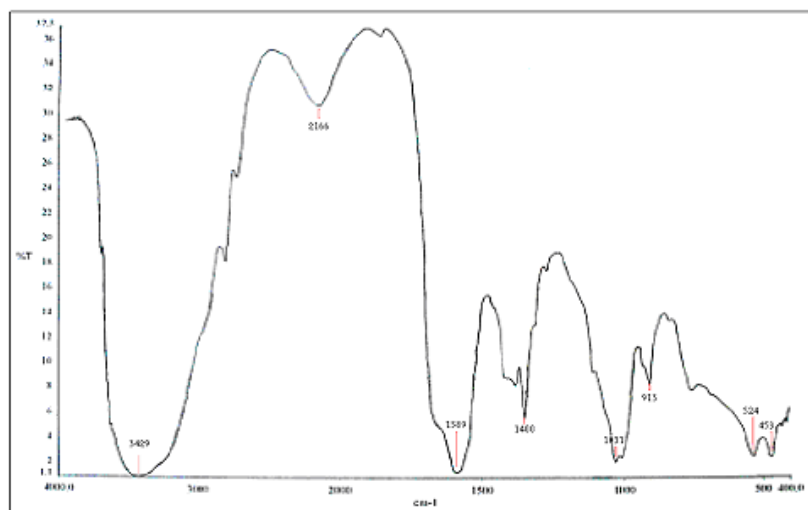


(ข)

ภาพที่ 4-1 แสดง IR spectrum ของ(ก) ดินขาว,(ข) แป้งมัน, (ค) อะครายลาไมด์, (ง) ผลิตภัณฑ์จากการกราฟต์



(ก)



(ง)

ภาพที่ 4-1 (ต่อ)

ตารางที่ 4-1 แสดงหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ และตำแหน่งของพีคที่ปรากฏของดินขาวและแป้งมัน [1]

หมู่ฟังก์ชัน	ความยาวคลื่นจากผลการทดลอง (cm^{-1})
Al-OH of Kaolinite	3,695 3,621 913
C-OH of Starch	3,427 1,003 574 524 420

ตารางที่ 4-2 แสดงหมู่ฟังก์ชันหลักที่สำคัญ และตำแหน่งของพีคที่ปรากฏของอะครายลาไมด์ และผลิตภัณฑ์จากการกราฟท์ [25]

หมู่ฟังก์ชัน		ความยาวคลื่นจากผลการทดลอง (cm^{-1})
$\text{C} = \text{C}$ $\text{C} - \text{NH}_2$ $\text{CO} - \text{NH}_2$ NH	อะครายลาไมด์	962 1,049 1,614 , 1,667 3,178
OH of Starch $-\text{COO}^-$ $-\text{COO}^-$, COOH COH of Starch OH of Kaolinite OH of Starch	ผลิตภัณฑ์จากการกราฟท์	3,429 1,589 1,400 1,031 913 ^[1] 524 , 453 ^[1]

4.2 ผลการทดสอบความหนืดของ โพลีเอครายลาไมด์

เนื่องจากในวัสดุผสมที่ใช้เคลือบผิวเหล็กมีการนำโพลีเอครายลาไมด์ เข้ามาเป็นส่วนผสมด้วย ดังนั้นเพื่อให้แน่ใจว่าโพลีเอครายลาไมด์ที่สังเคราะห์และนำมาใช้ในแต่ละครั้งนั้นมีคุณสมบัติเดียวกัน จึงทำการทดสอบหาความหนืดซึ่งเป็นสมบัติอย่างหนึ่งของโพลีเอครายลาไมด์

ตารางที่ 4-3 ผลการทดสอบความหนืดของโพลีเอครายลาไมด์ หน่วยเป็นเวลา (วินาที)

ครั้งที่ ชุดที่	ครั้งที่ 1. (วินาที)	ครั้งที่ 2. (วินาที)	ครั้งที่ 3. (วินาที)	ครั้งที่ 4. (วินาที)	ครั้งที่ 5. (วินาที)
ชุดที่ 1.	256.73	258.17	257.22	257.45	257.36
ชุดที่ 2.	301.77	302.89	307.44	306.06	309.69
ชุดที่ 3.	249.78	252.36	251.96	255.04	253.61
ชุดที่ 4.	289.15	288.76	292.94	290.13	293.92

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคูณกับค่าคงที่ คือ 0.5 cSt/s [12]

เช่น ค่าที่ 1 ที่ทดสอบได้ คือ 256.73 s. นำไปคูณกับ 0.5 cSt/s

เท่ากับ 128.37 cSt เป็นต้น

ตารางที่ 4-4 แสดงความหนืดของสารละลายโพลิอะครายลาไมด์ ในหน่วย (cSt)

ครั้งที่ ชุดที่	ครั้งที่ 1. (cSt)	ครั้งที่ 2. (cSt)	ครั้งที่ 3. (cSt)	ครั้งที่ 4. (cSt)	ครั้งที่ 5. (cSt)	ค่าเฉลี่ย ในแต่ละชุด
ชุดที่ 1.	128.37	129.09	128.61	128.73	128.68	128.69
ชุดที่ 2.	150.89	151.45	153.72	153.03	154.85	152.79
ชุดที่ 3	124.89	126.18	125.98	127.52	126.81	126.28
ชุดที่ 4.	144.58	144.38	146.47	145.07	146.96	145.49
				ค่าเฉลี่ยทั้ง 4 ชุด		138.31

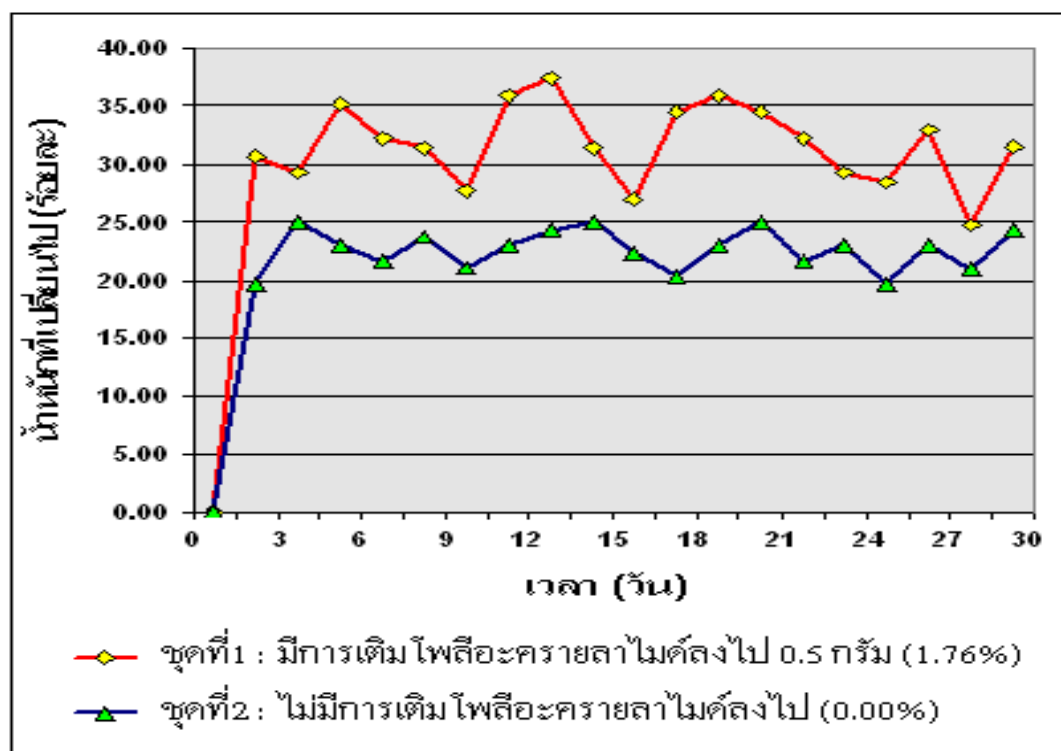
ค่าเฉลี่ยความหนืดของสารละลายโพลิอะครายลาไมด์ทั้ง 4 ชุดการทดลอง คือ 138.31 cSt

4.3 ผลการทดลองความสามารถในการดูดซับความชื้นของสารเคลือบ

4.3.1 ผลการศึกษาผลของโพลีอะครายลาไมด์ในผิวเคลือบต่อน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของชิ้นงาน

ชุดที่ 1 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม และมีการเติมโพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.76 %)

ชุดที่ 2 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม โดยไม่มีการเติมโพลีอะครายลาไมด์ (คิดเป็น 0.00 %)



ภาพที่ 4-2 แสดงน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่ประกอบด้วย

- ◆ ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม, กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม โดยควบคุมความชื้นไว้ที่ 85 %
- ▲ ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, ไม่เติมโพลีอะครายลาไมด์, กรดฟอร์มิก, ไทโอยูเรีย และโปตัสเซียมไดโครเมต โดยควบคุมความชื้นไว้ที่ 85 %

จากการทดสอบสามารถสรุปจากกราฟที่แสดงความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ว่า วัสดุผสมที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม และมีการเติม โพลีอะครายลาไมด์ลงไป มีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดีกว่าวัสดุผสมที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม กับ แป้งมัน 3.00 กรัม เพียงอย่างเดียว เนื่องจากโพลีอะครายลาไมด์ มีคุณสมบัติในการดูดซับความชื้นเช่นเดียวกัน

นอกจากนี้ยังพบว่าผิวเคลือบของวัสดุผสมที่มีโพลีอะครายลาไมด์ผสมอยู่ มีการเปลี่ยนแปลง สีเกิดขึ้น กล่าวคือ มีสีเป็นสีแดงค่อนข้างดำ ในขณะที่วัสดุผสมที่ไม่มีการเติม โพลีอะครายลาไมด์ลงไป สียังคงเป็นสีน้ำตาลนวลอยู่

4.3.2 ผลการศึกษาผลของปริมาณ โพลีอะครายลาไมด์ในผิวเคลือบต่อน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของชิ้นงาน

ชุดที่1 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 1.50 กรัม (คิดเป็น 5.11 %) , กรดฟอร์มิก

20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และ โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม

ชุดที่2 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน

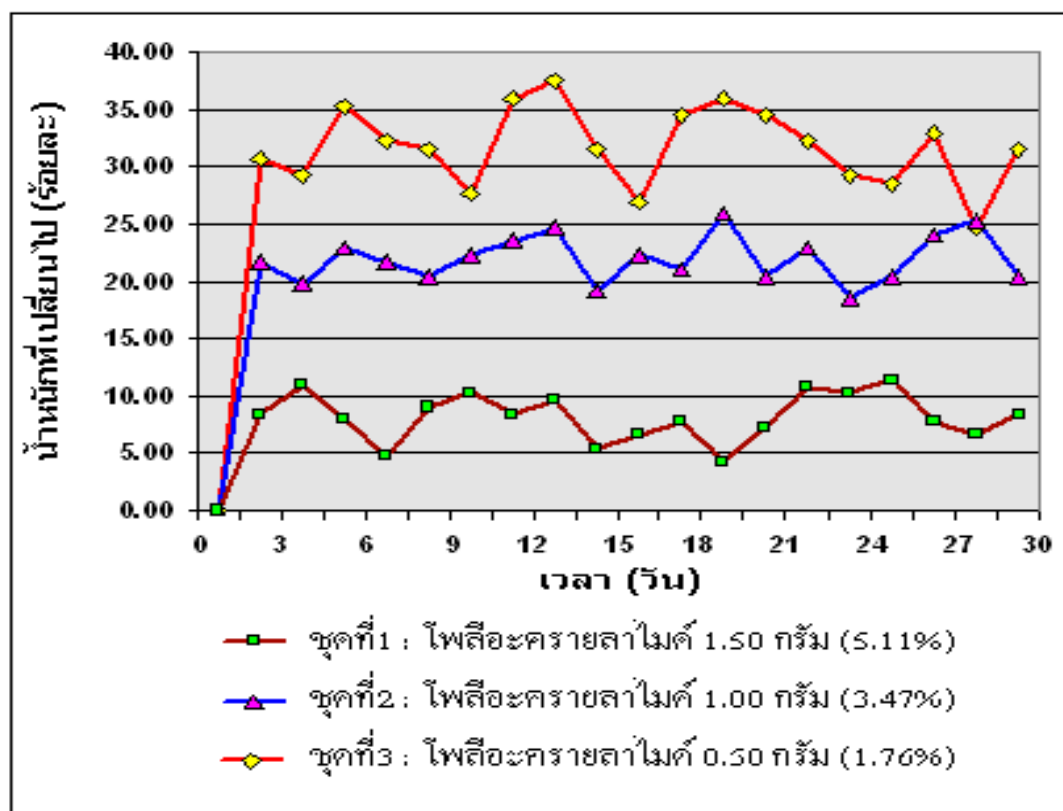
3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 1.00 กรัม (คิดเป็น 3.47 %) , กรดฟอร์มิก

20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และ โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม

ชุดที่3 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน

3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.76 %) , กรดฟอร์มิก

20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และ โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม



ภาพที่ 4-3 แสดงน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่ประกอบด้วย

ดินขาว 2.00 กรัม แป้งมัน 3.00 กรัม , กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม โดยมีปริมาณโพลีเอครายลาไมด์เป็น

1.50 กรัม (5.11 %), 1.00 กรัม (3.47 %) และ 0.50 กรัม (1.76 %)

โดยควบคุมความชื้นไว้ที่ 85 %

จากการทดสอบทำการเปรียบเทียบ โดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของโพลีเอครายลาไมด์ เป็น 1.50 กรัม (5.11 %), 1.00 กรัม (3.47 %) และ 0.50 กรัม (1.76 %) ตามลำดับ และสารอื่นๆมีอยู่ในปริมาณที่เท่ากัน จะเห็นได้ว่าผิวเคลือบที่มีปริมาณโพลีเอครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %) จะมีแนวโน้มน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมากกว่าชิ้นงานเคลือบผิวที่มีปริมาณโพลีเอครายลาไมด์ 1.00 กรัม (3.47 %) และชิ้นงานเคลือบผิวที่มีปริมาณโพลีเอครายลาไมด์ 1.50 กรัม (5.11 %)

ซึ่งเมื่อนำมาพิจารณาคูณภาพทางด้านผิวเคลือบพบว่า

1. ชี้นงานเคลือบผิวที่มีปริมาณโพลิอะครายลาไมด์ 1.50 กรัม (5.11 %) นั้น ผิวเคลือบมีลักษณะที่ขรุขระมากและการยึดติดไม่ดีเท่าที่ควร มีการหลุดลอกบางส่วน จึงถือว่าคุณภาพโดยรวมต่ำ จึงตัดทิ้งไป

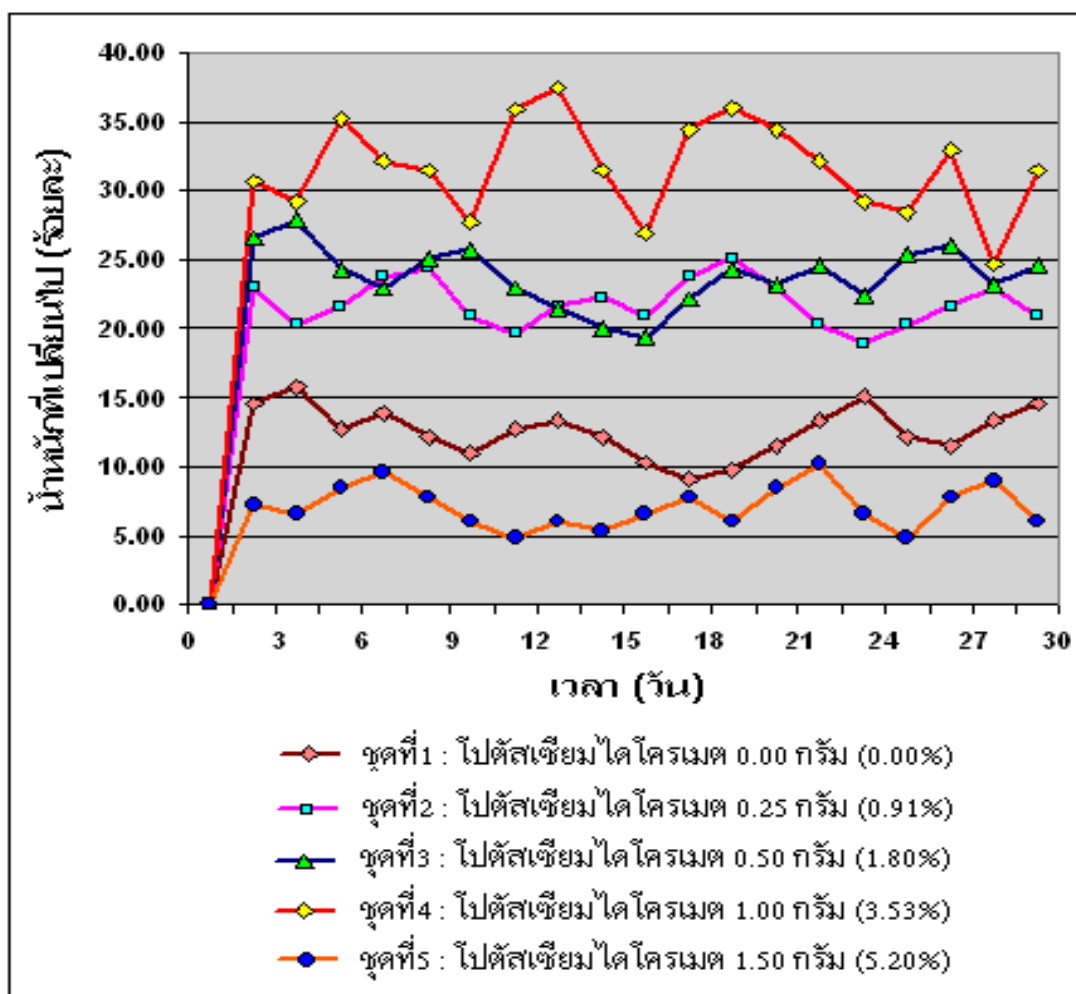
2. ชี้นงานเคลือบผิวที่มีปริมาณโพลิอะครายลาไมด์ 1.00 กรัม (3.47 %) นั้น ผิวเคลือบมีลักษณะที่ค่อนข้างเรียบ แต่สียังคงมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาลค่อนข้างดำ ตรงส่วนขอบเกิดเป็นตะกอนสีขาวขึ้นเล็กน้อย

3. ชี้นงานเคลือบผิวที่มีปริมาณโพลิอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %) นั้น ผิวเคลือบมีลักษณะที่เรียบ และสียังคงมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีน้ำตาลค่อนข้างดำ แต่ค่าน้อยกว่าสารประกอบอื่นๆ ตรงส่วนขอบเกิดเป็นตะกอนสีขาวขึ้นเล็กน้อยเช่นกัน

จากผลการทดสอบการดูดซับความชื้น จะเห็นว่าอัตราส่วนของปริมาณโพลิอะครายลาไมด์เท่ากับ 0.50 กรัม (1.76 %) เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด

4.3.3 ผลการศึกษาผลของปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตในผิวเคลือบต่อน้ำหนักที่เปลี่ยนไปของชี้นงาน

- ชุดที่1 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลิอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม , กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และ โปตัสเซียมไดโครเมต 0.00 กรัม (คิดเป็น 0.00 %)
- ชุดที่2 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลิอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม , กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และ โปตัสเซียมไดโครเมต 0.25 กรัม (คิดเป็น 0.91 %)
- ชุดที่3 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลิอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม , กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และ โปตัสเซียมไดโครเมต 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.80 %)
- ชุดที่4 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลิอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม , กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และ โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (คิดเป็น 3.53 %)
- ชุดที่5 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลิอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม , กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และ โปตัสเซียมไดโครเมต 1.50 กรัม (คิดเป็น 5.20 %)



ภาพที่ 4-4 แสดงน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่ประกอบด้วย ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม, กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร และไทโอยูเรีย 1.20 กรัม โดยมีปริมาณโปดัสเซียมไคโรเมตเป็น

— 0.00 กรัม (0.00 %), — 0.25 กรัม (0.91 %), — 0.50 กรัม (1.80 %),
 — 1.00 กรัม (3.53 %) และ — 1.50 กรัม (5.20 %)

โดยควบคุมความชื้นไว้ที่ 85 %

จากการทดสอบทำการเปรียบเทียบโดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของโปตัสเซียมไดโครเมต เป็น 0.00 กรัม (0.00 %), 0.25 กรัม (0.91 %), 0.50 กรัม (1.80 %), 1.00 กรัม (3.53 %) และ 1.50 กรัม (5.20 %) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าชิ้นงานเคลือบผิวที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (3.53 %) จะมีแนวโน้มน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าชิ้นงานเคลือบผิวที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมต 0.00 กรัม (0.00 %), 0.25 กรัม (0.91 %), 0.50 กรัม (1.80 %) และ 1.50 กรัม (5.20 %) โดยที่ชิ้นงานเคลือบผิวที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมต เท่ากับ 1.50 กรัม (5.20 %) มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักน้อยที่สุด

เมื่อพิจารณาคุณภาพทางด้านผิวเคลือบ ความเรียบค่อนข้างที่จะใกล้เคียงกัน เพียงแต่ว่า ชิ้นงานเคลือบผิวที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมต 1.5 กรัม (5.20 %) จะมีความขรุขระมากกว่า ชิ้นงานเคลือบผิวที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่ำกว่า

เมื่อพิจารณาทางด้านสีของผิวเคลือบ พบว่าโปตัสเซียมไดโครเมต 0.00 กรัม (0.00 %) มีสีที่ค่อนข้างเป็นสีแดงปนดำ แต่อัตราส่วนอื่นจะมีสีที่ค่อนข้างดำ

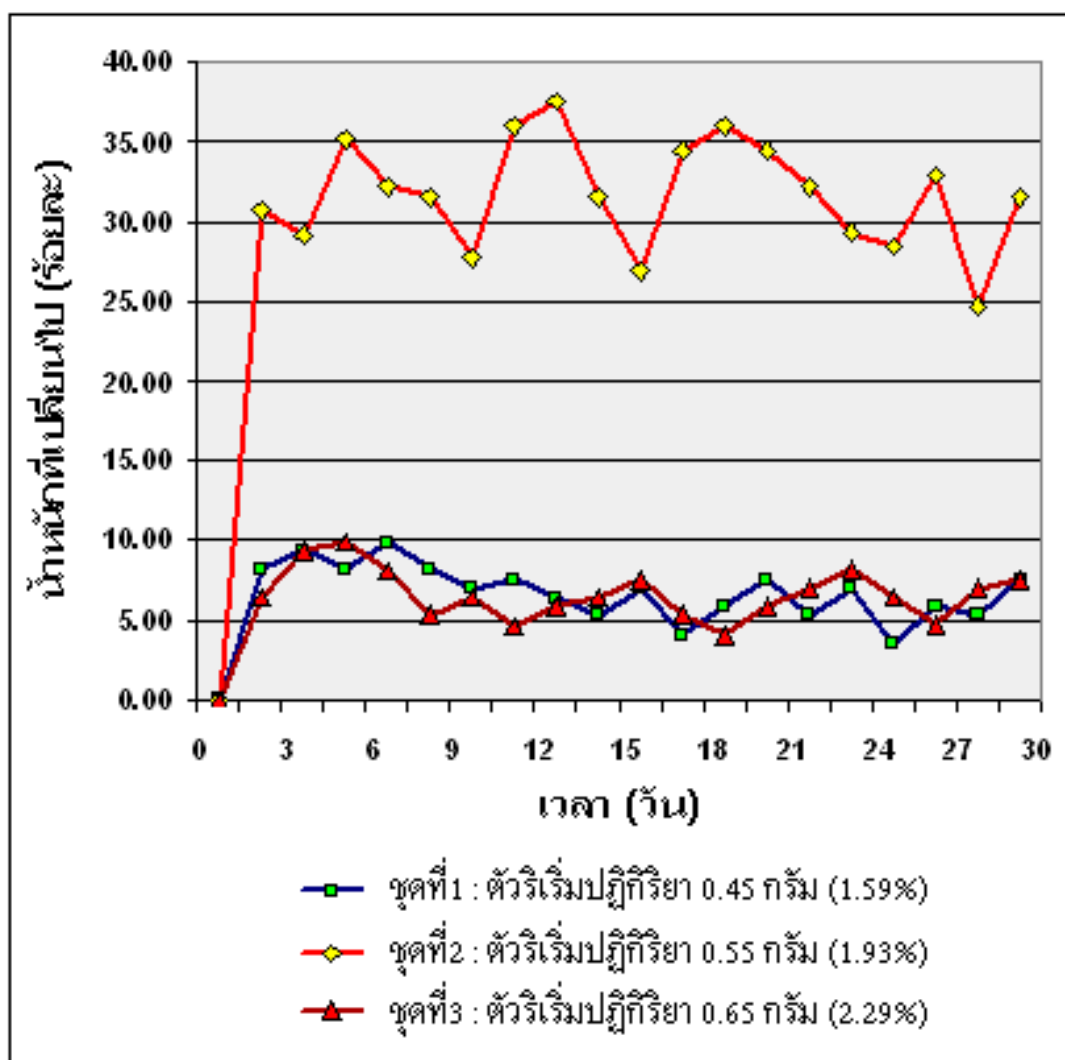
จากผลการทดสอบการดูดซับความชื้น จะเห็นว่าผิวเคลือบที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมต เท่ากับ 1.00 กรัม (3.53 %) เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด

4.3.4 ผลการศึกษาผลของปริมาณตัวริเริ่มในปฏิกิริยาการกราฟท์แป้งมันกับอะครายลาไมด์

ชุดที่1 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม, กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม, โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม และตัวริเริ่ม 0.45 กรัม (คิดเป็น 1.59 %)

ชุดที่2 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม, กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม, โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม และตัวริเริ่ม 0.55 กรัม (คิดเป็น 1.93 %)

ชุดที่3 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม, กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม, โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม และตัวริเริ่ม 0.65 กรัม (คิดเป็น 2.29 %)



ภาพที่ 4-5 แสดงน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก ที่ประกอบด้วย ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลิอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม, กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม โดยมีปริมาณตัวริเริ่มเป็น

—■— 0.45 กรัม(1.59 %), —◆— 0.55 กรัม(1.93 %) และ —▲— 0.65 กรัม(2.29 %) โดยควบคุมความชื้นไว้ที่ 85 %

จากการทดสอบทำการเปรียบเทียบโดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของตัวริเริ่ม (Ceric Ammonium Nitrate) เป็น 0.45 กรัม(1.59 %) , 0.55 กรัม(1.93 %) และ 0.65 กรัม(2.29 %) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าชิ้นงานเคลือบผิวที่ใช้ตัวริเริ่ม 0.55 กรัม(1.93 %) จะมีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าชิ้นงานเคลือบผิวที่ใช้ตัวริเริ่ม 0.45 กรัม(1.59 %) และตัวริเริ่ม 0.65 กรัม(2.29 %) โดยที่ปริมาณตัวริเริ่ม 0.45 กรัม(1.59 %) และตัวริเริ่ม 0.65 กรัม(2.29 %) มีค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาคุณภาพทางด้านผิวเคลือบ ความเรียบค่อนข้างที่จะใกล้เคียงกัน

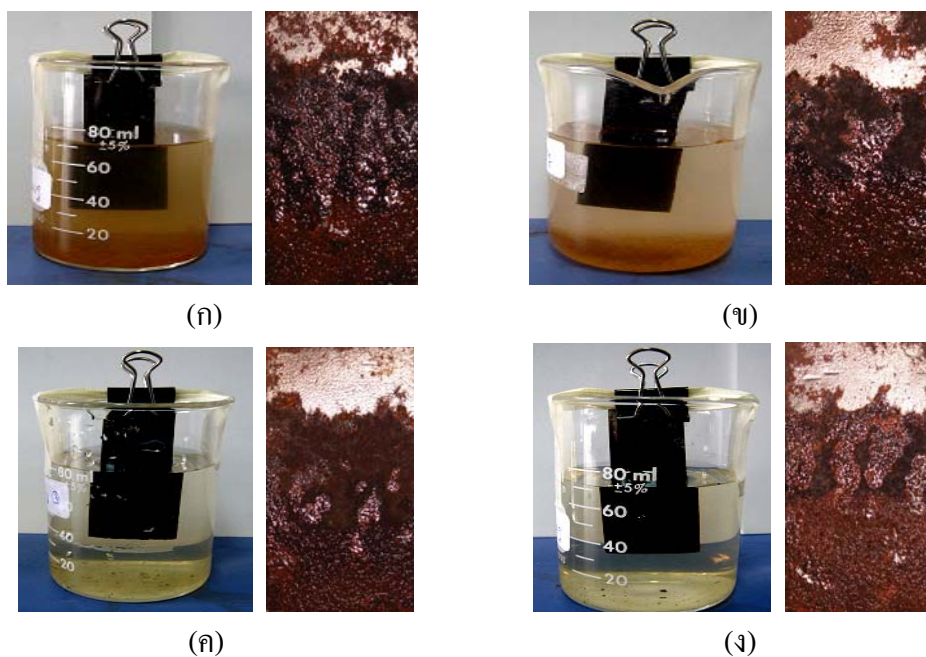
จากผลการทดสอบการดูดซับความชื้น จะเห็นว่า อัตราส่วนของปริมาณตัวริเริ่มที่ใช้ในการสังเคราะห์ผิวเคลือบที่ใช้ในการดูดซับความชื้น เท่ากับ 0.55 กรัม(1.93 %) เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด

4.4 ผลการทดสอบความสามารถในการยึดติดและการบวมตัวของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก

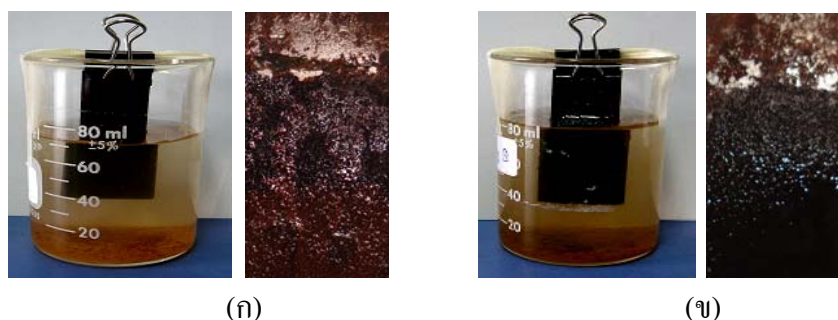
- ชุดที่1 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็กที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีเอครายลาไมด์ 0.00 กรัม (0.00 %)
- ชุดที่2 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็กที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีเอครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %), กรดฟอรั่มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และ โปดัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (3.53 %)
- ชุดที่3 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็กที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีเอครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %), กรดฟอรั่มิก 20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และ โปดัสเซียมไดโครเมต 0.50 กรัม (1.80 %)
- ชุดที่4 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็กที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีเอครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %), กรดฟอรั่มิก 20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และ โปดัสเซียมไดโครเมต 0.25 กรัม (0.91 %)
- ชุดที่5 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็กที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีเอครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %), กรดฟอรั่มิก 20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และ โปดัสเซียมไดโครเมต 0.00 กรัม (0.00 %)
- ชุดที่6 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็กที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีเอครายลาไมด์ 1.00 กรัม (3.47 %), กรดฟอรั่มิก 20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และ โปดัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (3.53 %)
- ชุดที่7 : วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็กที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีเอครายลาไมด์ 1.50 กรัม (5.11 %), กรดฟอรั่มิก 20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และ โปดัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (3.53 %)



ภาพที่ 4-6 การทดสอบการบวมตัวในน้ำของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก
ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม,
โพลีอะครายลาไมด์ 0.00 กรัม(0.00 %)



ภาพที่ 4-7 การทดสอบการบวมตัวในน้ำของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก
ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม
โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม(1.76 %), กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร,
ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และ โปตัสเซียมไดโครเมต (ก) 1.00 กรัม(3.53 %),
(ข) 0.50 กรัม(1.80 %), (ค) 0.25 กรัม(0.91 %) และ (ง) 0.00 กรัม(0.00 %)



ภาพที่ 4-8 การทดสอบการบวมตัวของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก
 ที่มีส่วนประกอบของดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม
 กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร , ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม,
 โปดัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม(3.53 %)
 และโพลิอะครายลาไมด์ (ก) 1.00 กรัม(3.47 %), (ข) 1.50 กรัม(5.11 %)

จากผลการทดสอบการบวมตัวของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก พบว่ามีการบวมตัวที่เห็นได้ชัดเจนในช่วงเวลา 30-40 นาทีแรกที่ทำกรจุ่มแช่ โดยเปรียบเทียบกับส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำ และเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1-2 ชั่วโมงจะเริ่มมีวัสดุผสมบางส่วนหลุดออกมา โดยสังเกตจากสีของน้ำเริ่มมีการเปลี่ยนเป็นสีส้มแกมแดงในวัสดุผสมที่มีโปดัสเซียมไดโครเมตผสมอยู่ ในขณะที่วัสดุผสมอื่นที่ไม่มีโปดัสเซียมไดโครเมตผสมอยู่ ก็มีวัสดุผสมบางส่วนหลุดออกมาเช่นกัน แต่เป็นสีน้ำตาลแกมดำ ซึ่งสาเหตุที่สีของน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากการละลายตัวของโปดัสเซียมไดโครเมตและโพลิอะครายลาไมด์บางส่วน แต่ในส่วนองวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็กที่มีแต่ดินขาวเพียงอย่างเดียวพบว่า สีมมีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน โดยเปลี่ยนเป็นสีคล้ำๆน้ำขุ่น ซึ่งเป็นสีของดินขาวที่ผสมอยู่ในผิวเคลือบ

ตารางที่ 4-5 ผลการทดสอบความสามารถในการยึดติดและการบวมตัวของวัสดุผสมเคลือบ
ผิวเหล็ก

ชุดที่	ผลการทดสอบความสามารถในการยึดติด	ประสิทธิภาพการยึดติด	การบวมตัวของวัสดุผสมในน้ำ
1.	ผิวเคลือบยึดติดกับแผ่นเหล็กได้ไม่ค่อยดี มีผิวเคลือบบางส่วนหลุดติดกระดาษขาวออกมา	ปานกลาง	มีการบวมตัวดีในช่วง 20-30 นาทีแรก หลังจากนั้นการบวมตัวเริ่มคงที่
2.	ผิวเคลือบยึดติดกับแผ่นเหล็กดีแทบจะไม่มีส่วนของผิวเคลือบหลุดติดกระดาษขาวออกมา	ดีมาก	มีการบวมตัวดีในช่วง 20-30 นาทีแรก หลังจากนั้นการบวมตัวเริ่มคงที่สีของน้ำมีการเปลี่ยนเป็นสีส้มหลังจากเวลาผ่านไป 1-2 ชั่วโมง
3.	ผิวเคลือบยึดติดกับแผ่นเหล็กดีแทบจะไม่มีส่วนของผิวเคลือบหลุดติดกระดาษขาวออกมา	ดีมาก	มีการบวมตัวดีในช่วง 20-30 นาทีแรก หลังจากนั้นการบวมตัวเริ่มคงที่สีของน้ำมีการเปลี่ยนเป็นสีส้มหลังจากเวลาผ่านไป 1-2 ชั่วโมง
4.	ผิวเคลือบยึดติดกับแผ่นเหล็กดีแทบจะไม่มีส่วนของผิวเคลือบหลุดติดกระดาษขาวออกมา	ดีมาก	มีการบวมตัวดีในช่วง 20-30 นาทีแรก หลังจากนั้นการบวมตัวเริ่มคงที่สีของน้ำมีการเปลี่ยนเป็นสีส้มหลังจากเวลาผ่านไป 1-2 ชั่วโมง

ตารางที่ 4-5 (ต่อ)

ชุดที่	ผลการทดสอบความสามารถในการยึดติด	ประสิทธิภาพการยึดติด	การบวมตัวของวัสดุผสมในน้ำ
5.	ผิวเคลือบยึดติดกับแผ่นเหล็กดีแทบจะไม่มีส่วนของผิวเคลือบหลุดติดกระดาษกาออกมา	ดีมาก	มีการบวมตัวดีในช่วง 20-30 นาทีแรก หลังจากนั้นการบวมตัวเริ่มคงที่
6.	ผิวเคลือบยึดติดกับแผ่นเหล็กค่อนข้างดี มีส่วนของผิวเคลือบเพียงเล็กน้อยหลุดติดกระดาษกาออกมา	ดี	มีการบวมตัวดีในช่วง 20-30 นาทีแรก หลังจากนั้นการบวมตัวเริ่มคงที่ สีของน้ำมีการเปลี่ยนเป็นสีส้ม หลังจากเวลาผ่านไป 1-2 ชั่วโมง
7.	ผิวเคลือบยึดติดกับแผ่นเหล็กพอสมควร มีส่วนของผิวเคลือบเพียงเล็กน้อยหลุดติดกระดาษกาออกมา	ดี	มีการบวมตัวดีในช่วง 20-30 นาทีแรก หลังจากนั้นการบวมตัวเริ่มคงที่ สีของน้ำมีการเปลี่ยนเป็นสีส้ม หลังจากเวลาผ่านไป 1-2 ชั่วโมง

จากผลการทดสอบพบว่า ความสามารถในการยึดติดของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็กที่มีโพลิอะครายลาไมด์เป็นส่วนประกอบจะมีความสามารถในการยึดติดที่ดีกว่าวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็กที่มีแต่ส่วนของดินขาวเพียงอย่างเดียว ดังนั้นโพลิอะครายลาไมด์มีส่วนช่วยให้ประสิทธิภาพในการยึดติดของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็กดีขึ้น แต่เมื่อมาเปรียบเทียบความสามารถในการยึดติดของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็กที่มีส่วนประกอบของโพลิอะครายลาไมด์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน (ชุดที่ 2, 6, 7) พบว่าความสามารถในการยึดติดนั้นมีประสิทธิภาพพอๆกัน และเมื่อมาเปรียบเทียบความสามารถในการยึดติดของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็กที่มีส่วนประกอบของโปตัสเซียมไดโครเมตในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน (ชุดที่ 2 – 5) พบว่าประสิทธิภาพในการยึดติดไม่แตกต่างกันเลย ดังนั้น ปริมาณของโปตัสเซียมไดโครเมตจึงไม่มีผลต่อความสามารถในการยึดติดของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็กแต่อย่างใด

4.5 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกักกร่อนของเหล็กที่เคลือบด้วยวัสดุผสม

ในการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิก เพื่อหาอัตราการกักกร่อนของเหล็กที่เคลือบด้วยวัสดุผสม ได้ใช้วัสดุผสมที่มีองค์ประกอบต่างกัน ดังนี้

ตารางที่ 4-6 แสดงองค์ประกอบของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก

ชุดที่ 1 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.00 กรัม
ชุดที่ 2 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %) กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (3.53 %)
ชุดที่ 3 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %) กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 0.50 กรัม (1.80 %)
ชุดที่ 4 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %) กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 0.25 กรัม (0.91 %)
ชุดที่ 5 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %) กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 0.00 กรัม (0.00 %)
ชุดที่ 6 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 1.00 กรัม (3.47 %) กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (3.53 %)
ชุดที่ 7 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 1.50 กรัม (5.11 %) กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (3.53 %)

เหล็กที่เคลือบด้วยวัสดุผสมต่าง ๆ กันนี้ ได้ทำการทิ้งไว้ในภาชนะควบคุมความชื้น 85 %

โดยมีระยะเวลาต่าง ๆ กัน คือ 10 วัน , 20 วัน และ 30 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 4-7 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 1.

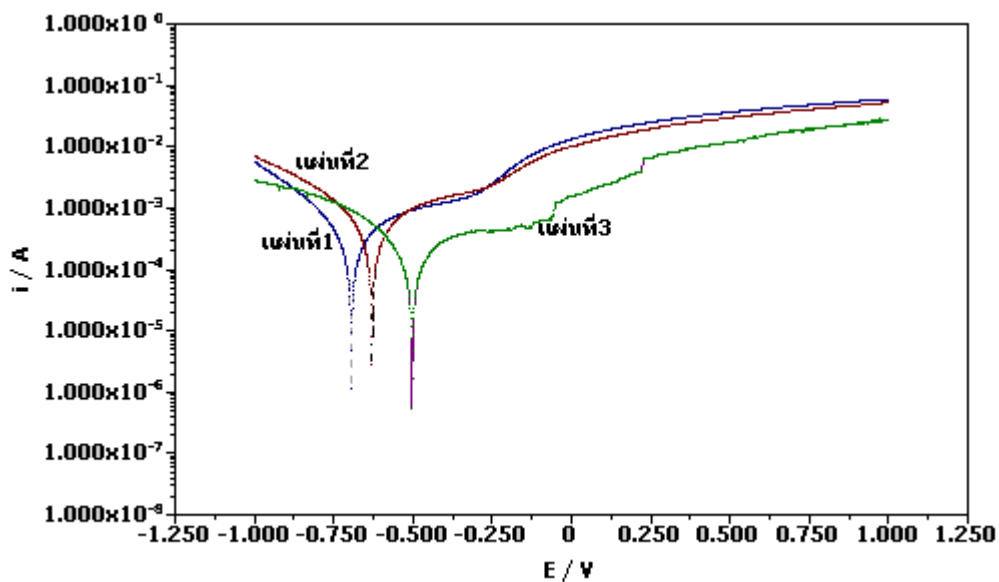
โดยทิ้งไว้ในภาชนะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 10 วัน

	ชุดที่ 1 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 1 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 1 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$4.211 \times 10^{-5} \text{ A}$	$4.332 \times 10^{-5} \text{ A}$	$4.217 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$4.211 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$4.332 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$4.217 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.694 V	-0.629 V	-0.502 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.689 V	-0.624 V	-0.500 V
ค่า E_{begin}	-0.726 V	-0.650 V	-0.588 V
ค่า E_{end}	-0.675 V	-0.612 V	-0.455 V
ค่า Corrosion rate	$4.899 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$5.040 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$4.906 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 1. เท่ากับ $4.948 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 1. เท่ากับ -0.565 V.

โพลีอะครายลาไมด์ 0.00 กรัม (คิดเป็น 0.00 %)



ภาพที่ 4-9 กราฟโพลาไรเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 1.

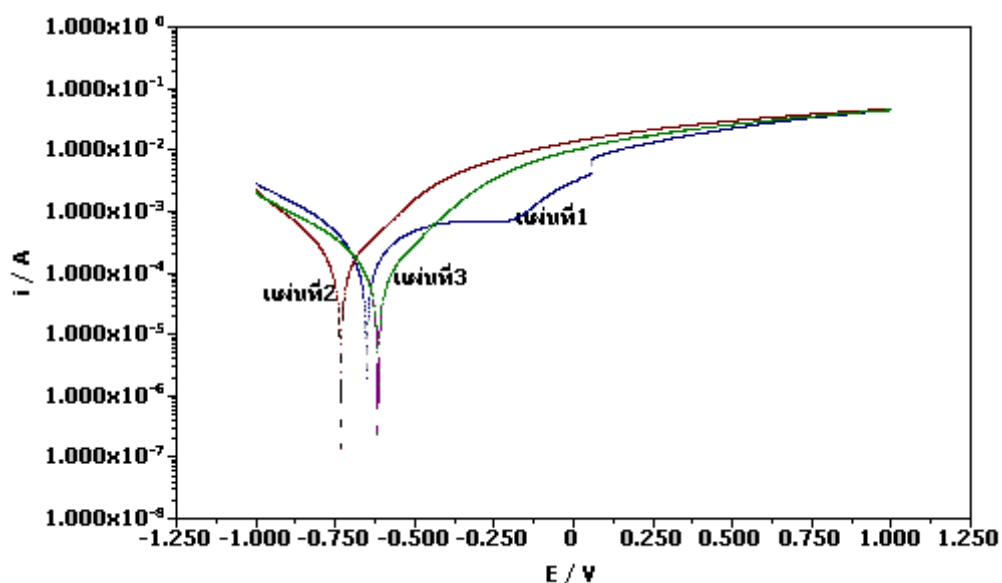
ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 10 วัน

ตารางที่ 4-8 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 2.
โดยทิ้งไว้ในภาชนะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 10 วัน

	ชุดที่ 2 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 2 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 2 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$2.782 \times 10^{-5} \text{ A}$	$3.205 \times 10^{-5} \text{ A}$	$2.423 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$2.782 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$3.205 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$2.423 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.651 V	-0.733 V	-0.612 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.648 V	-0.735 V	-0.616 V
ค่า E_{begin}	-0.688 V	-0.796 V	-0.675 V
ค่า E_{end}	-0.619 V	-0.688 V	-0.562 V
ค่า Corrosion rate	$3.237 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$3.730 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$2.819 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 2. เท่ากับ $3.262 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$
ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 2. เท่ากับ -0.665 V.

โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.76 %), โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (คิดเป็น 3.53 %)



ภาพที่ 4-10 กราฟโพลาไรเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 2.
ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 10 วัน

ตารางที่ 4-9 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 3.

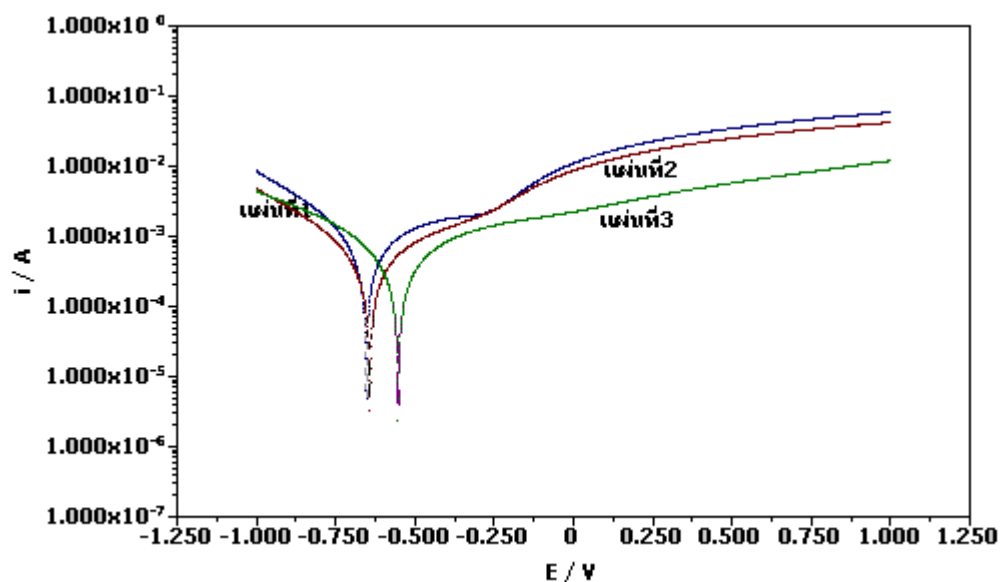
โดยทิ้งไว้ในภาชนะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 10 วัน

	ชุดที่ 3 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 3 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 3 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$4.741 \times 10^{-5} \text{ A}$	$5.208 \times 10^{-5} \text{ A}$	$4.409 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$4.741 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$5.208 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$4.409 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.653 V	-0.642 V	-0.552 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.650 V	-0.639 V	-0.545 V
ค่า E_{begin}	-0.695 V	-0.695 V	-0.606 V
ค่า E_{end}	-0.632 V	-0.612 V	-0.524 V
ค่า Corrosion rate	$5.516 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$6.060 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$5.130 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 3. เท่ากับ $5.569 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 3. เท่ากับ -0.616 V.

โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.76 %), โปตัสเซียมไดโครเมต 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.80 %)



ภาพที่ 4-11 กราฟโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 3.

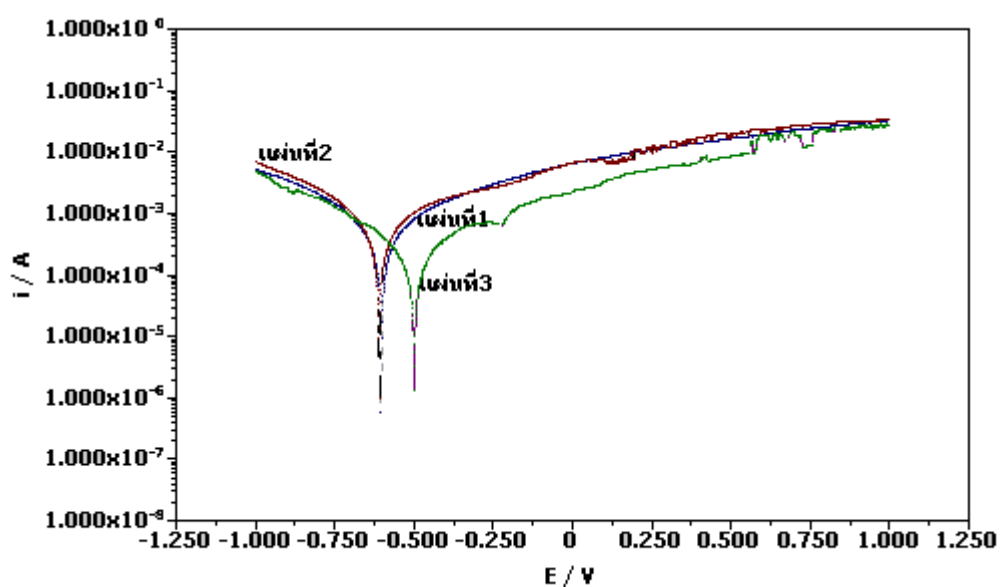
ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 10 วัน

ตารางที่ 4-10 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 4.
โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 10 วัน

	ชุดที่ 4 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 4 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 4 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$5.660 \times 10^{-5} \text{ A}$	$5.914 \times 10^{-5} \text{ A}$	$5.689 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$5.660 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$5.914 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$5.689 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.603 V	-0.609 V	-0.499 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.603 V	-0.607 V	-0.477 V
ค่า E_{begin}	-0.656 V	-0.663 V	-0.612 V
ค่า E_{end}	-0.569 V	-0.575 V	-0.430 V
ค่า Corrosion rate	$6.586 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$6.881 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$6.619 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 4. เท่ากับ $6.695 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$
ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 4. เท่ากับ -0.570 V.

โพลิอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.76 %), โปตัสเซียมไดโครเมต 0.25 กรัม (คิดเป็น 0.91 %)



ภาพที่ 4-12 กราฟโพลาไรเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 4.
ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 10 วัน

ตารางที่ 4-11 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 5.

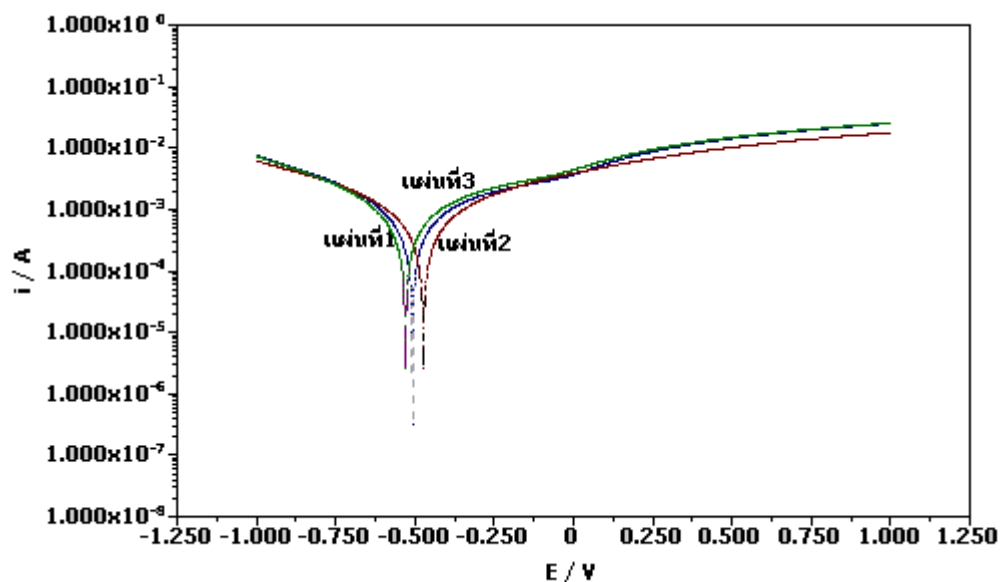
โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 10 วัน

	ชุดที่ 5 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 5 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 5 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$6.349 \times 10^{-5} \text{ A}$	$6.442 \times 10^{-5} \text{ A}$	$6.471 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$6.349 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$6.442 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$6.471 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.508 V	-0.473 V	-0.530 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.509 V	-0.481 V	-0.528 V
ค่า E_{begin}	-0.562 V	-0.543 V	-0.575 V
ค่า E_{end}	-0.467 V	-0.430 V	-0.506 V
ค่า Corrosion rate	$7.388 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$7.495 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$7.529 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 5. เท่ากับ $7.471 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

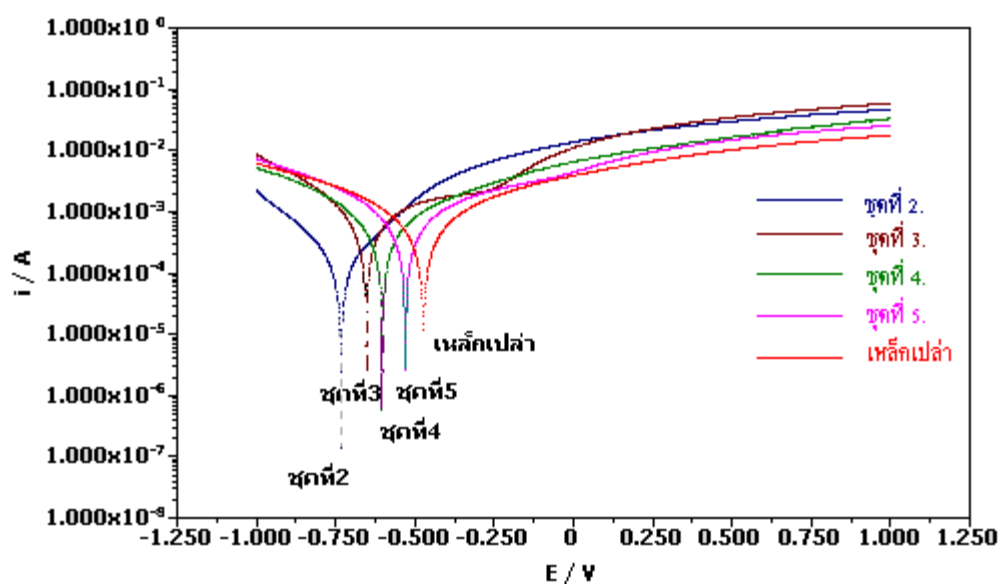
ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 5. เท่ากับ -0.504 V.

โพลิอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม(คิดเป็น 1.76 %) , โปตัสเซียมไดโครเมต 0.00 กรัม(คิดเป็น 0.00 %)



ภาพที่ 4-13 กราฟโพลาไรเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 5.

ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 10 วัน



ภาพที่ 4-14 กราฟโวลตาโมแกรมของเหล็กเปล่าและแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสม
ที่มีปริมาณโพลีสไตรีนไดโครเมตต่างกัน
โดยทั้งหมดควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 10 วัน

ชุดที่ 2 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %),
กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโพลีสไตรีนไดโครเมต 1.00 กรัม.
(3.53 %)

ชุดที่ 3 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %),
กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโพลีสไตรีนไดโครเมต 0.50 กรัม .
(1.80 %)

ชุดที่ 4 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %),
กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโพลีสไตรีนไดโครเมต 0.25 กรัม .
(0.91 %)

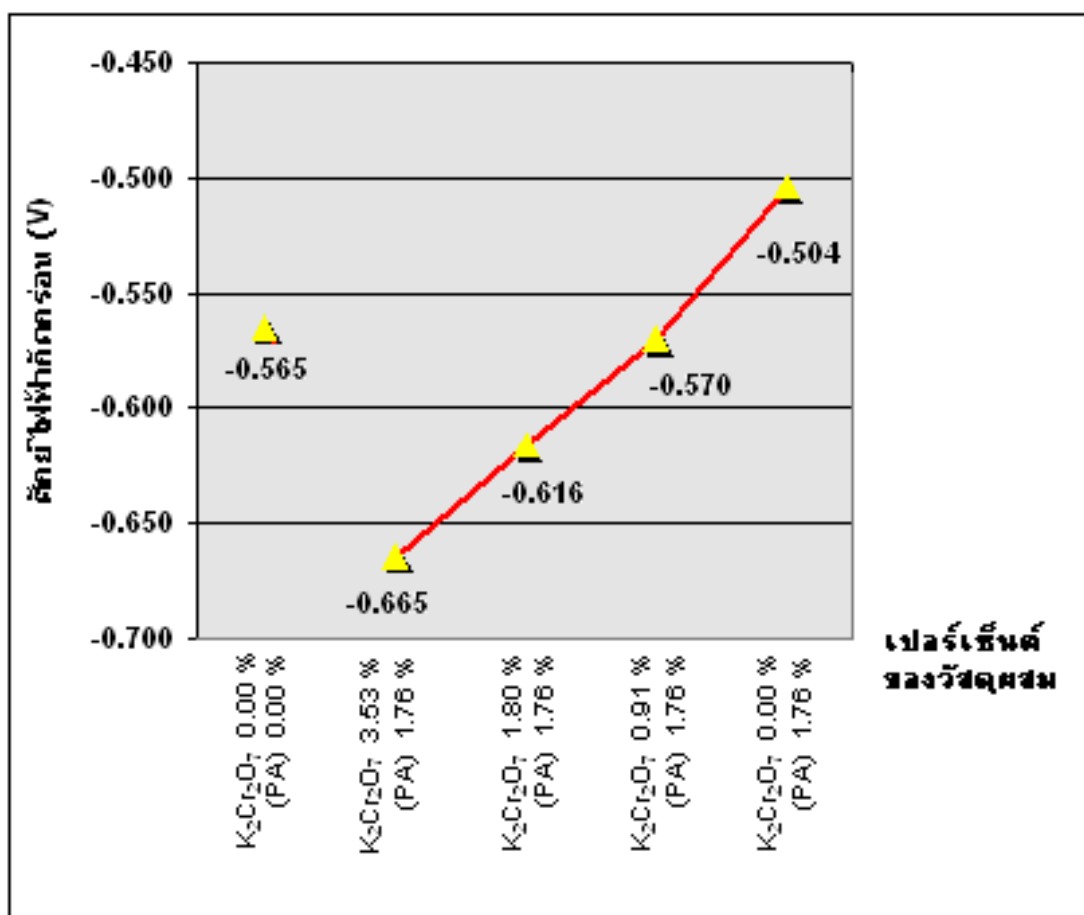
ชุดที่ 5 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %),
กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโพลีสไตรีนไดโครเมต 0.00 กรัม .
(0.00 %)

เหล็กเปล่า : ไม่มีการเคลือบสารใดๆทั้งสิ้น

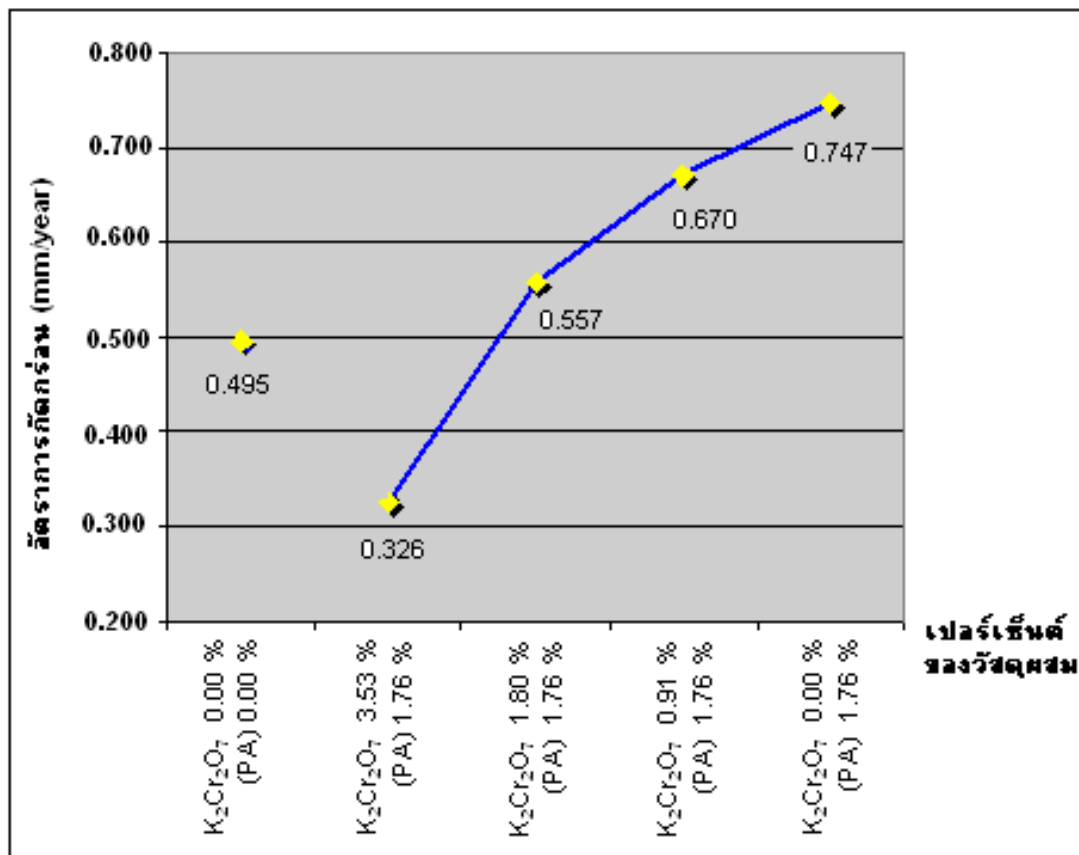
ตารางที่ 4-12 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม
ที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่างกัน โดยทิ้งไว้ในภาชนะควบคุม
ความชื้น 85 % เป็นเวลา 10 วัน

ชุดที่	จำนวนวัน	ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน	ค่าอัตราการกัดกร่อน
1. เคลือบเฉพาะดินขาว ที่ผ่านการกราฟท์	10	-0.565 V	4.948×10^{-1} mm/year
2. เคลือบวัสดุผสมที่มี โปตัสเซียมไดโครเมต 3.53 %	10	-0.665 V	3.262×10^{-1} mm/year
3. เคลือบวัสดุผสมที่มี โปตัสเซียมไดโครเมต 1.80 %	10	-0.616 V	5.569×10^{-1} mm/year
4. เคลือบวัสดุผสมที่มี โปตัสเซียมไดโครเมต 0.91 %	10	-0.570 V	6.695×10^{-1} mm/year
5. เคลือบวัสดุผสมที่มี โปตัสเซียมไดโครเมต 0.00 %	10	-0.504 V	7.471×10^{-1} mm/year

ภาพที่ 4-15 แสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากักร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณ โปดัสเซียมไดโครเมตต่างกัน โดยทั้งหมดควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 10 วัน



ภาพที่ 4-15 (ก) แสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากักร่อน



ภาพที่ 4-15 (ข) แสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าอัตราการกัดกร่อน

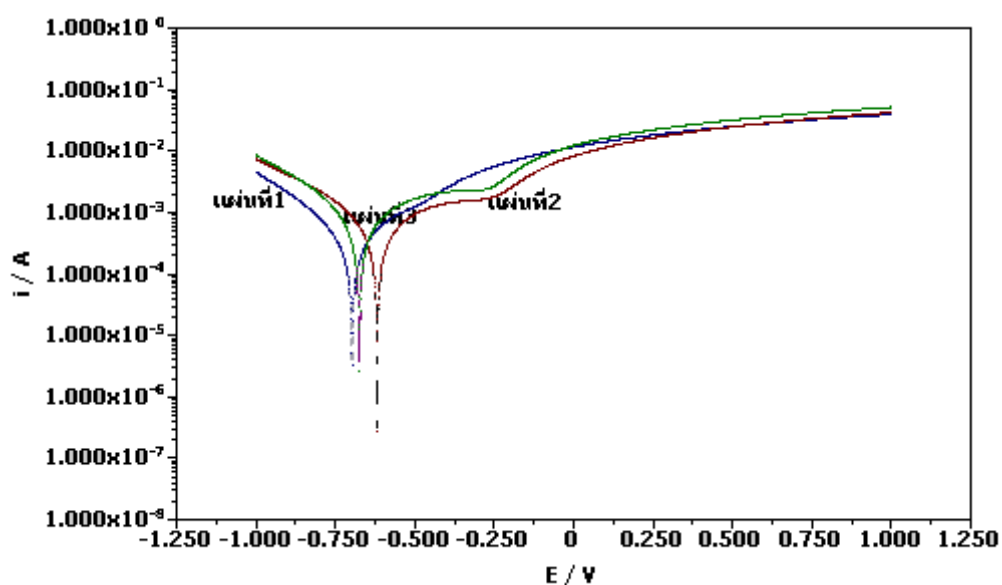
จากภาพที่ 4-10 ถึงภาพที่ 4-13 สามารถสรุปได้เป็นไปตามภาพที่ 4-14 กับภาพที่ 4-15 และตารางที่ 4-11 ซึ่งแสดงว่าเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่างกัน เมื่อทิ้งไว้ในสภาวะความชื้น 85 % เป็นเวลา 10 วัน พบว่าเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตสูง จะมีค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนต่ำกว่าเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่ำ ดังภาพที่ 4-15 (ก) และจากภาพที่ 4-15 (ข) กับตารางที่ 4-11 แสดงว่ายังมีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตน้อย ค่าอัตราการกัดกร่อนยังมีความสูง

ตารางที่ 4-13 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 6.
โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 10 วัน

	ชุดที่ 7 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 7 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 7 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$6.808 \times 10^{-5} \text{ A}$	$6.978 \times 10^{-5} \text{ A}$	$7.105 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$6.808 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$6.978 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$7.105 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.697 V	-0.618 V	-0.674 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.698 V	-0.611 V	-0.672 V
ค่า E_{begin}	-0.751 V	-0.663 V	-0.707 V
ค่า E_{end}	-0.632 V	-0.593 V	-0.644 V
ค่า Corrosion rate	$7.922 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$8.119 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$8.267 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 6. เท่ากับ $8.103 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$
ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 6. เท่ากับ -0.646 V.

โพลีอะครายลาไมด์ 1.00 กรัม(คิดเป็น 3.47 %), โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม(คิดเป็น 3.53 %)



ภาพที่ 4-16 กราฟโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 6.
ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 10 วัน

ตารางที่ 4-14 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 7.

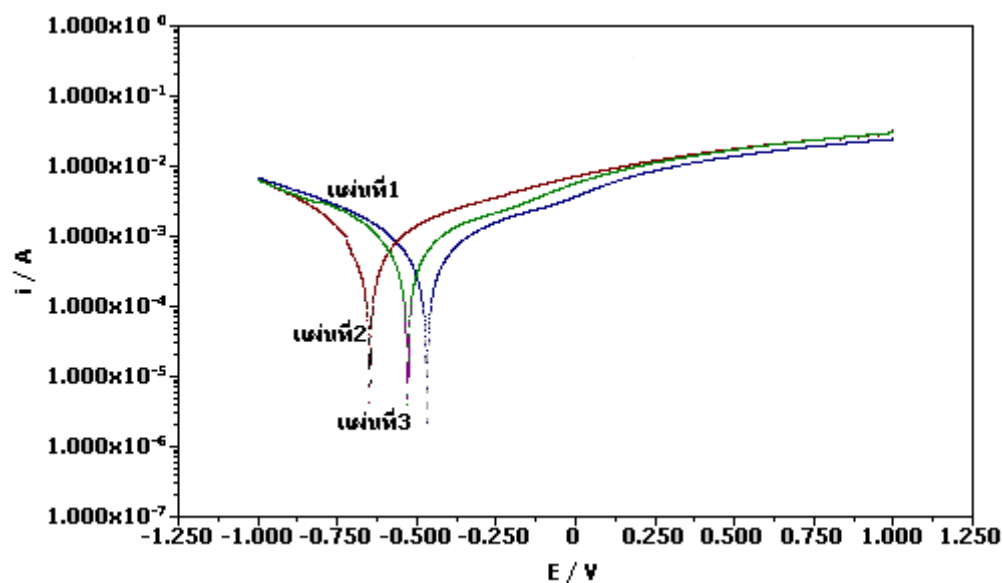
โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 10 วัน

	ชุดที่ 6 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 6 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 6 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$7.458 \times 10^{-5} \text{ A}$	$7.280 \times 10^{-5} \text{ A}$	$7.102 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$7.458 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$7.280 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$7.102 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.468 V	-0.648 V	-0.528 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.465 V	-0.636 V	-0.530 V
ค่า E_{begin}	-0.524 V	-0.720 V	-0.593 V
ค่า E_{end}	-0.417 V	-0.612 V	-0.473 V
ค่า Corrosion rate	$8.677 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$8.470 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$8.263 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 7. เท่ากับ $8.470 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

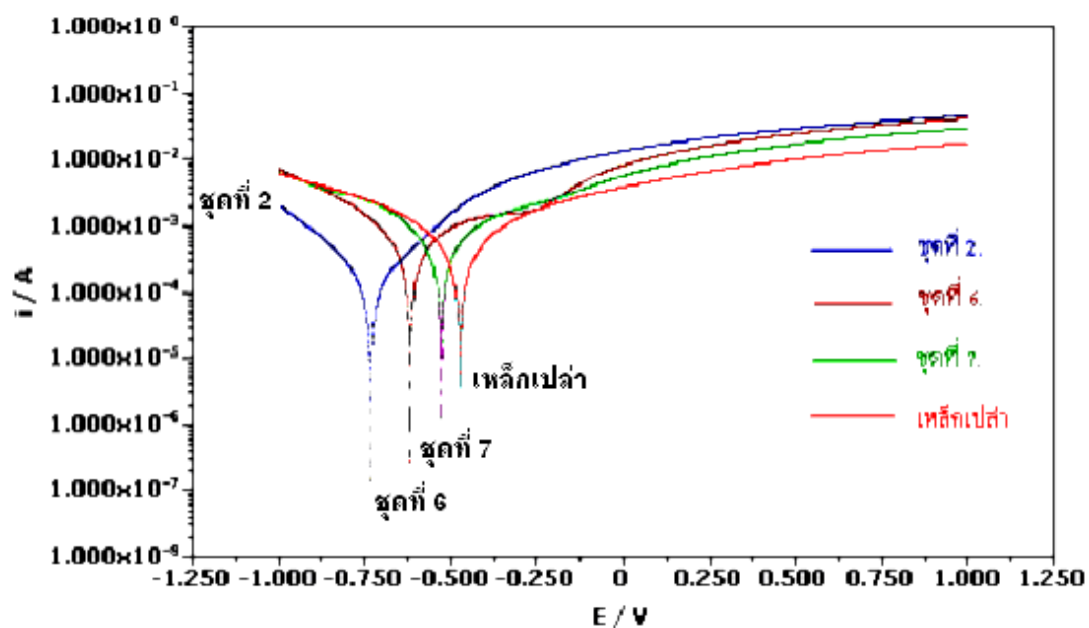
ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 7. เท่ากับ -0.498 V.

โพลีอะครายลาไมด์ 1.50 กรัม (คิดเป็น 5.11 %), โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (คิดเป็น 3.53 %)



ภาพที่ 4-17 กราฟโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 7.

ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 10 วัน



ภาพที่ 4-18 กราฟโวลตาโมแกรมของเหล็กเปล่าและแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสม
ที่มีปริมาณโพลีอะครายลาไมด์ต่างกัน
โดยทั้งหมดควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 10 วัน

ชุดที่ 2 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %),
กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม .
(3.53 %)

ชุดที่ 6 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 1.00 กรัม (3.47 %),
กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม .
(3.53 %)

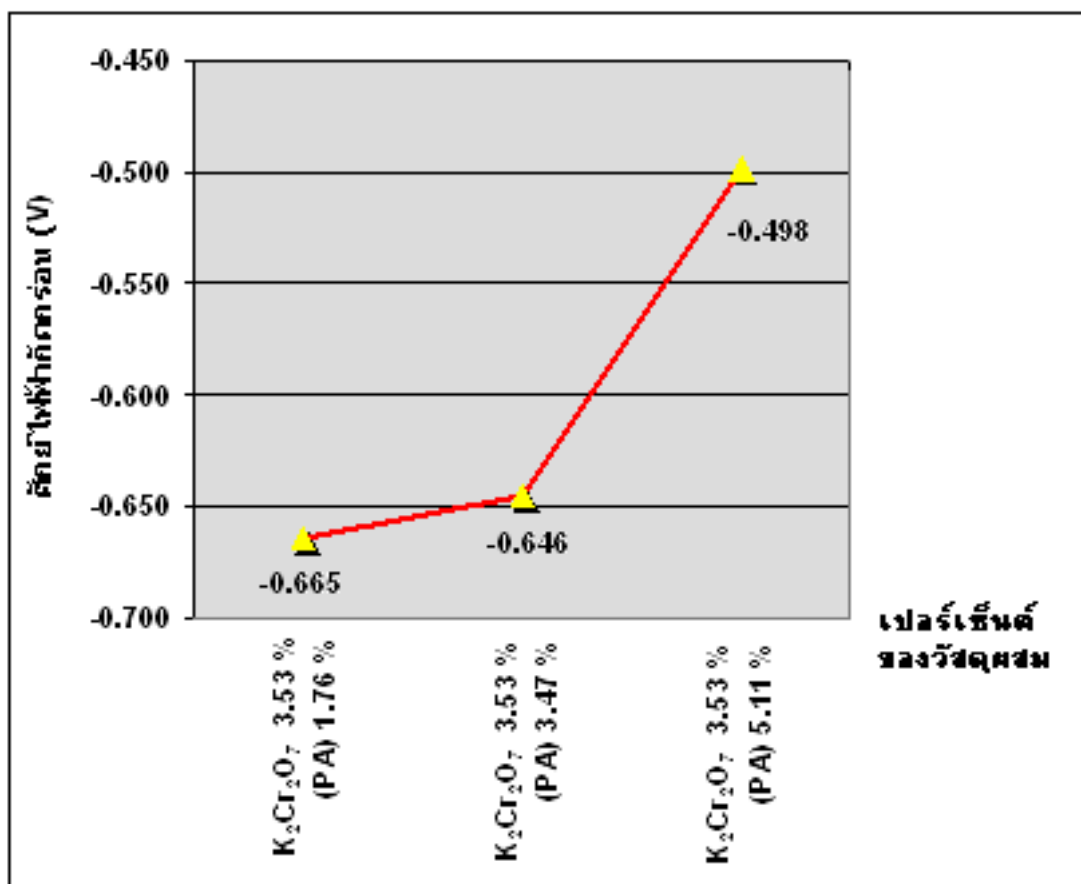
ชุดที่ 7 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 1.50 กรัม (5.11 %),
กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม .
(3.53 %)

เหล็กเปล่า : ไม่มีการเคลือบสารใดๆทั้งสิ้น

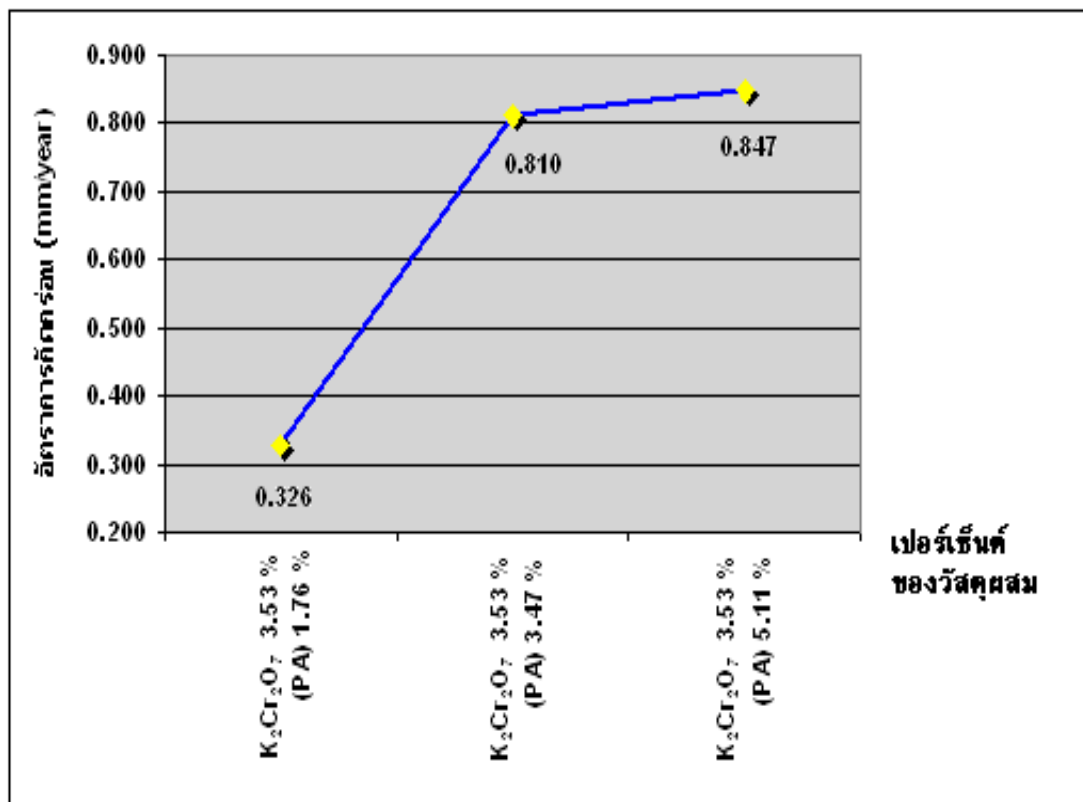
ตารางที่ 4-15 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีปริมาณโพลีเอครายลาไมด์ ต่างๆกัน โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุม ความชื้น 85 % เป็นเวลา 10 วัน

ชุดที่	จำนวนวัน	ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน	ค่าอัตราการกัดกร่อน
2. เคลือบวัสดุผสมที่มี โพลีเอครายลาไมด์ 1.76 %	10	-0.665 V	3.262×10^{-1} mm/year
6. เคลือบวัสดุผสมที่มี โพลีเอครายลาไมด์ 3.47 %	10	-0.646 V	8.103×10^{-1} mm/year
7. เคลือบวัสดุผสมที่มี โพลีเอครายลาไมด์ 5.11 %	10	-0.498 V	8.470×10^{-1} mm/year

ภาพที่ 4-19 แสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อน
ของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโพลีเอครายลาไมด์ต่างกัน
โดยทั้งหมดควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 10 วัน



ภาพที่ 4-19 (ก) แสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน



ภาพที่ 4-19 (ข) แสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าอัตราการกัดกร่อน

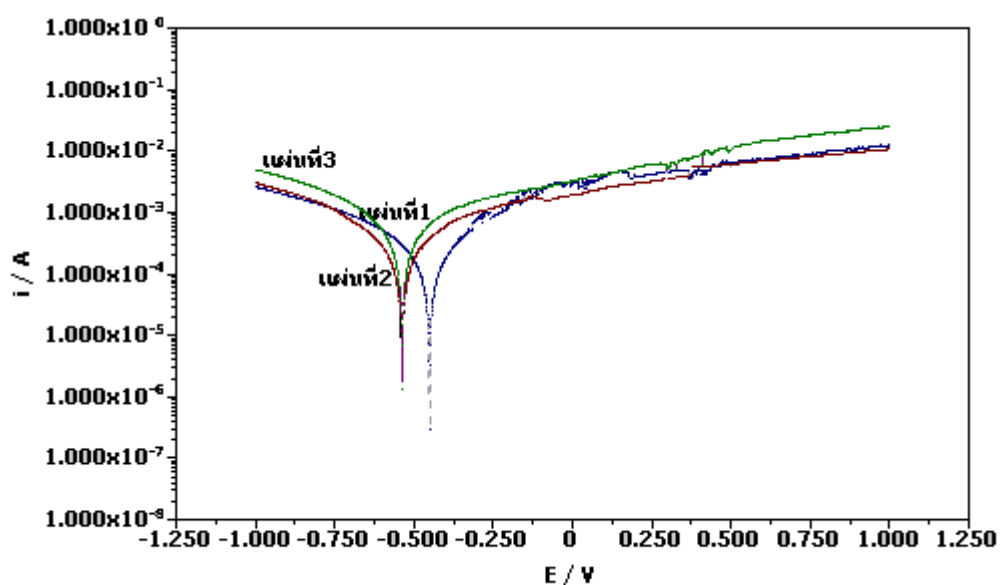
จากภาพที่ 4-10 , ภาพที่ 4-16 และภาพที่ 4-17 สามารถสรุปได้เป็นไปตามภาพที่ 4-18 กับภาพที่ 4-19 และตารางที่ 4-14 ซึ่งแสดงว่าเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโพลิอะครายลาไมด์ต่างกัน โดยมีปริมาณสารอื่นๆเท่ากัน เมื่อทิ้งไว้ในสถานะความชื้น 85 % เป็นเวลา 10 วัน พบว่าเหล็กเคลือบวัสดุผสมจะมีค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนลดลง เมื่อวัสดุผสมมีปริมาณโพลิอะครายลาไมด์ลดลง ดังภาพที่ 4-19 (ก) นอกจากนี้อัตราการกัดกร่อนก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อโพลิอะครายลาไมด์มีปริมาณมากขึ้นด้วย ดังภาพที่ 4-19 (ข) และตารางที่ 4-14

ตารางที่ 4-16 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 1.
โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน

	ชุดที่ 1 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 1 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 1 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$4.443 \times 10^{-5} \text{ A}$	$4.360 \times 10^{-5} \text{ A}$	$5.405 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$4.443 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$4.360 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$5.405 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.451 V	-0.538 V	-0.537 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.454 V	-0.530 V	-0.536 V
ค่า E_{begin}	-0.511 V	-0.612 V	-0.588 V
ค่า E_{end}	-0.385 V	-0.499 V	-0.499 V
ค่า Corrosion rate	$5.170 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$5.073 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$6.288 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 1. เท่ากับ $5.510 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$
ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 1. เท่ากับ -0.508 V.

โพลีอะครายลาไมด์ 0.00 กรัม (คิดเป็น 0.00 %)



ภาพที่ 4-20 กราฟโพลาไรเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 1.
ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 20 วัน

ตารางที่ 4-17 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 2.

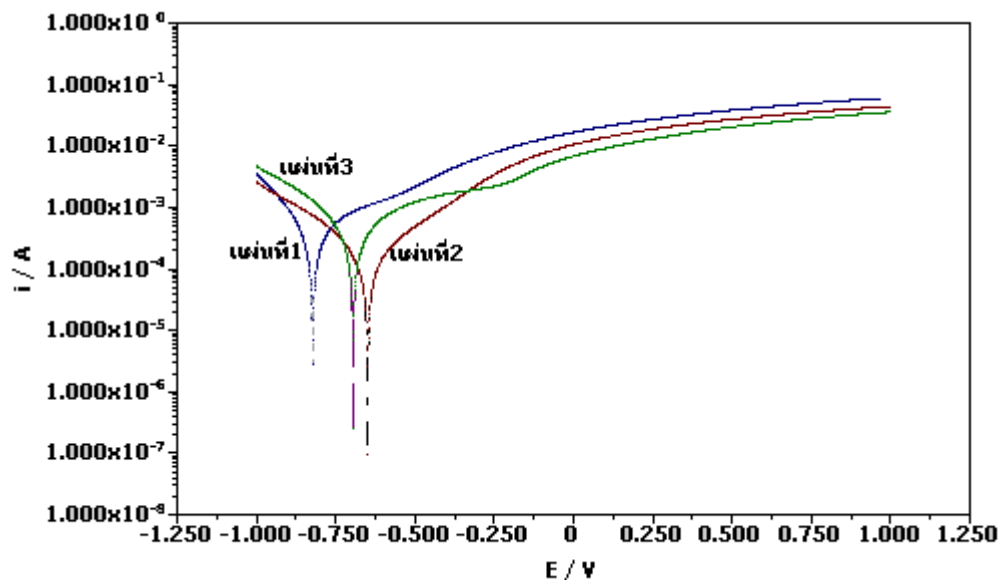
โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน

	ชุดที่ 2 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 2 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 2 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$3.450 \times 10^{-5} \text{ A}$	$3.563 \times 10^{-5} \text{ A}$	$3.529 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$3.450 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$3.563 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$3.529 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.822 V	-0.649 V	-0.695 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.818 V	-0.637 V	-0.703 V
ค่า E_{begin}	-0.853 V	-0.738 V	-0.726 V
ค่า E_{end}	-0.808 V	-0.606 V	-0.656 V
ค่า Corrosion rate	$4.014 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$4.145 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$4.106 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 2. เท่ากับ $4.088 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 2. เท่ากับ -0.695 V.

โพลีเอครายลาไมด์ 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.76 %), โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (คิดเป็น 3.53 %)



ภาพที่ 4-21 กราฟโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 2.

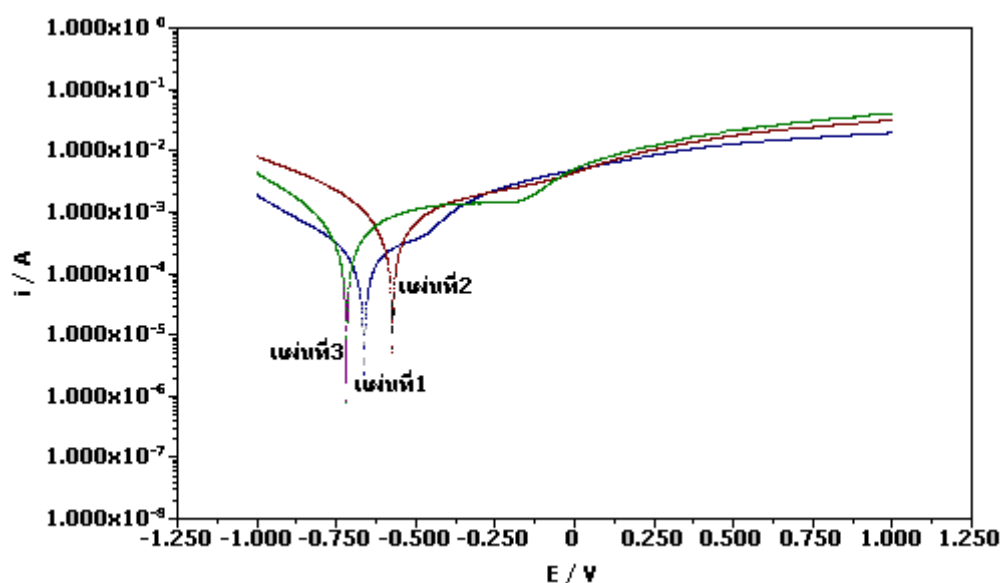
ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 20 วัน

ตารางที่ 4-18 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 3.
โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน

	ชุดที่ 3 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 3 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 3 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$5.465 \times 10^{-5} \text{ A}$	$5.424 \times 10^{-5} \text{ A}$	$5.531 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$5.465 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$5.424 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$5.531 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.663 V	-0.573 V	-0.718 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.657 V	-0.574 V	-0.717 V
ค่า E_{begin}	-0.733 V	-0.625 V	-0.764 V
ค่า E_{end}	-0.612 V	-0.536 V	-0.688 V
ค่า Corrosion rate	$6.359 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$6.311 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$6.436 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 3. เท่ากับ $6.369 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$
ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 3. เท่ากับ -0.651 V.

โพตัสครายลาไมด์ 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.76 %), โปตัสเซียมไดโครเมต 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.80 %)



ภาพที่ 4-22 กราฟโพลาไรเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 3.
ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 20 วัน

ตารางที่ 4-19 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 4.

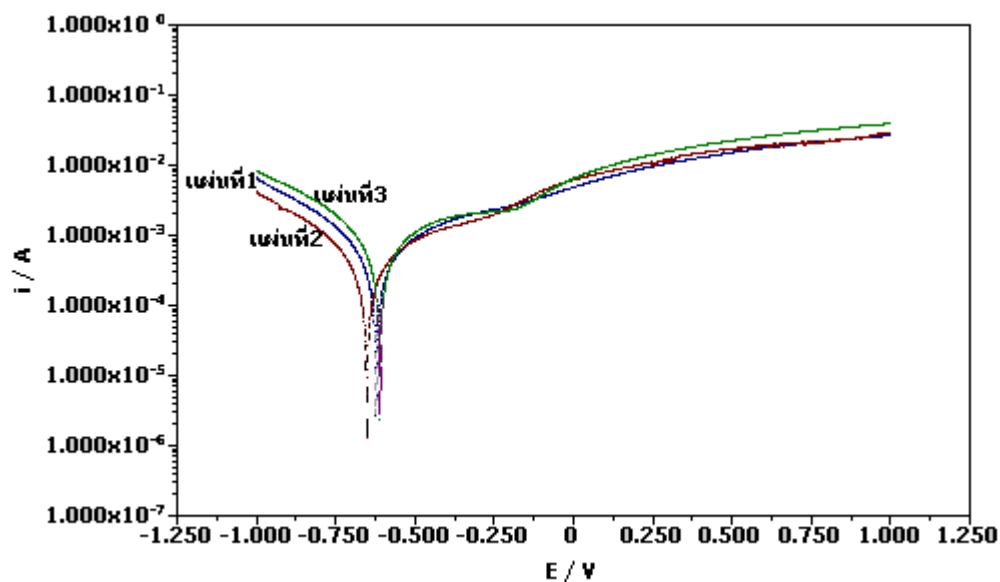
โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน

	ชุดที่ 4 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 4 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 4 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$6.197 \times 10^{-5} \text{ A}$	$5.957 \times 10^{-5} \text{ A}$	$5.704 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$6.197 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$5.957 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$5.704 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.621 V	-0.652 V	-0.610 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.623 V	-0.639 V	-0.610 V
ค่า E_{begin}	-0.675 V	-0.733 V	-0.656 V
ค่า E_{end}	-0.581 V	-0.619 V	-0.580 V
ค่า Corrosion rate	$7.210 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$6.931 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$6.637 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 4. เท่ากับ $6.926 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 4. เท่ากับ -0.628 V.

โพลีเอครายลาไมด์ 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.76 %), โปตัสเซียมไดโครเมต 0.25 กรัม (คิดเป็น 0.91 %)



ภาพที่ 4-23 กราฟโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 4.

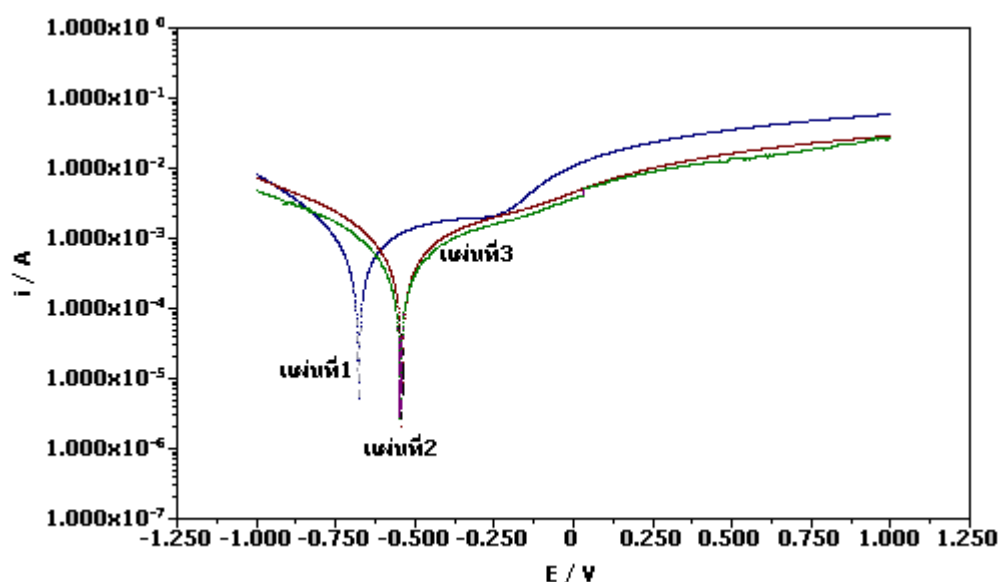
ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 20 วัน

ตารางที่ 4-20 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 5.
โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน

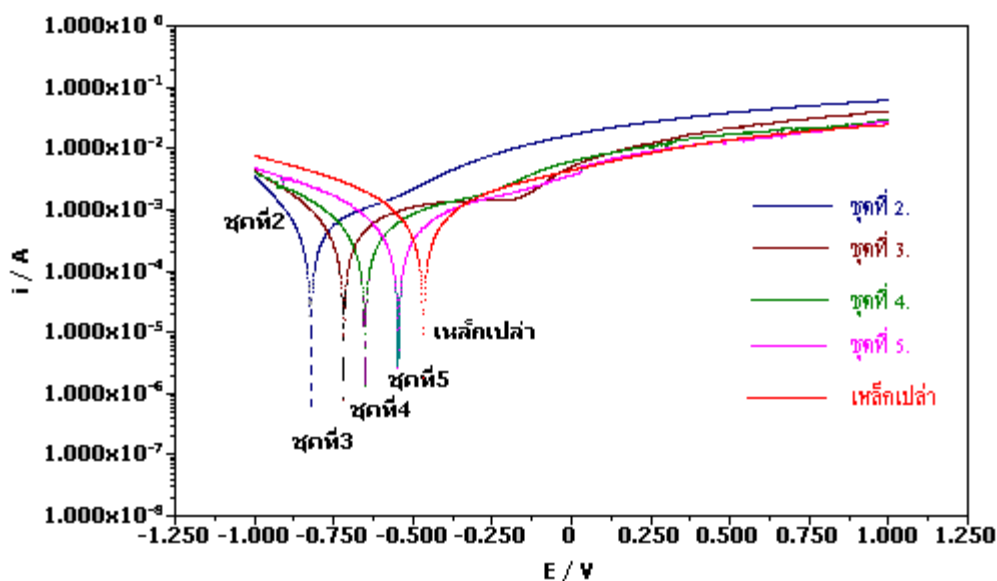
	ชุดที่ 5 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 5 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 5 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$6.781 \times 10^{-5} \text{ A}$	$6.523 \times 10^{-5} \text{ A}$	$6.658 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$6.781 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$6.523 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$6.658 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.677 V	-0.541 V	-0.546 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.676 V	-0.543 V	-0.540 V
ค่า E_{begin}	-0.720 V	-0.600 V	-0.619 V
ค่า E_{end}	-0.651 V	-0.499 V	-0.506 V
ค่า Corrosion rate	$7.890 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$7.590 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$7.747 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 5. เท่ากับ $7.742 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$
ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 5. เท่ากับ -0.588 V.

โพลิอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.76 %), โปตัสเซียมไดโครเมต 0.00 กรัม (คิดเป็น 0.00 %)



ภาพที่ 4-24 กราฟโพลาไรเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 5.
ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 20 วัน



ภาพที่ 4-25 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเปล่าและแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสม
ที่มีปริมาณโพลีฟลูออโรไธโพรเมตต่างๆ กัน
โดยทั้งหมดควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 20 วัน

ชุดที่ 2 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %),
กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโพลีฟลูออโรไธโพรเมต 1.00 กรัม.
(3.53 %)

ชุดที่ 3 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %),
กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโพลีฟลูออโรไธโพรเมต 0.50 กรัม .
(1.80 %)

ชุดที่ 4 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %),
กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโพลีฟลูออโรไธโพรเมต 0.25 กรัม .
(0.91 %)

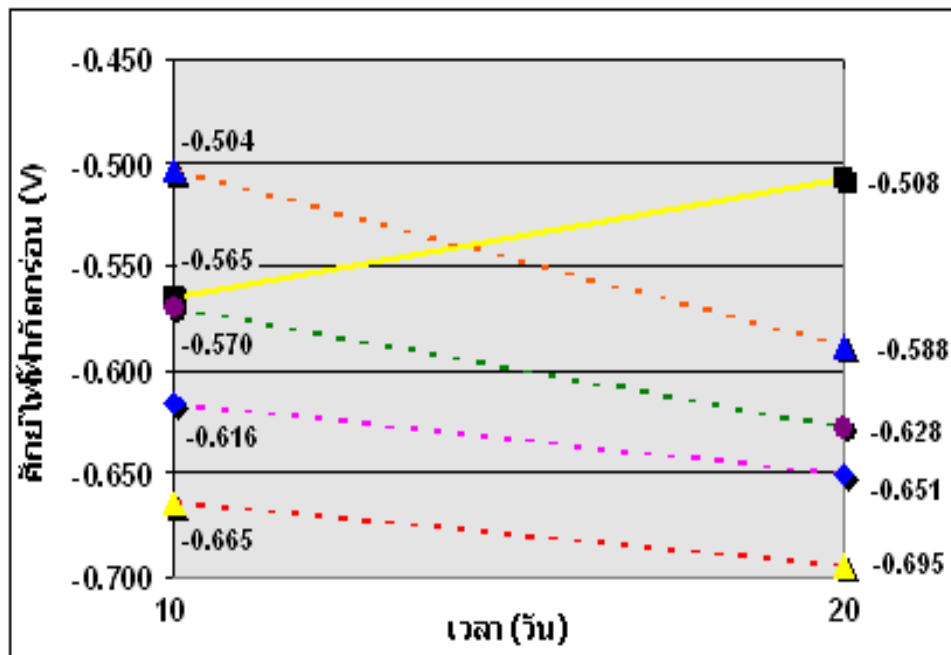
ชุดที่ 5 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %),
กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโพลีฟลูออโรไธโพรเมต 0.00 กรัม .
(0.00 %)

เหล็กเปล่า : ไม่มีการเคลือบสารใดๆทั้งสิ้น

ตารางที่ 4-21 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม
ที่มีปริมาณ โปตัสเซียมไดโครเมตต่างกัน โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุม
ความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน

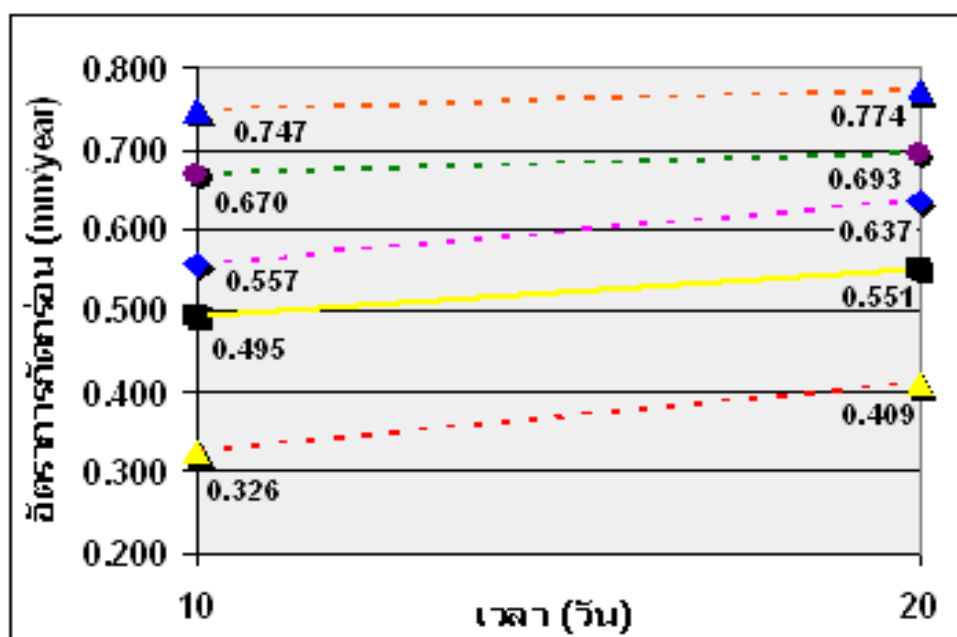
ชุดที่	จำนวนวัน	ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน	ค่าอัตราการกัดกร่อน
1. เคลือบเฉพาะดินขาว ที่ผ่านการกราฟท์	20	-0.508 V	$5.510 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$
2. เคลือบวัสดุผสมที่มี โปตัสเซียมไดโครเมต 3.53 %	20	-0.695 V	$4.088 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$
3. เคลือบวัสดุผสมที่มี โปตัสเซียมไดโครเมต 1.80 %	20	-0.651 V	$6.369 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$
4. เคลือบวัสดุผสมที่มี โปตัสเซียมไดโครเมต 0.91 %	20	-0.628 V	$6.926 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$
5. เคลือบวัสดุผสมที่มี โปตัสเซียมไดโครเมต 0.00 %	20	-0.588 V	$7.742 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ภาพที่ 4-26 แสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากักร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโปดัสเซียมไดโครเมตต่างกัน โดยทั้งหมดควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 20 วัน โดยเทียบกับระยะเวลา 10 วัน



ภาพที่ 4-26(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากักร่อนกับเวลาของเหล็กเคลือบวัสดุผสม โดยมีปริมาณโพดัสเซียมไดโครเมต (PA) 1.76 % แต่เปลี่ยนแปลงปริมาณ K₂Cr₂O₇ ดังนี้

- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี K₂Cr₂O₇ 0.00 % และ (PA) 0.00 %
- ▲- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี K₂Cr₂O₇ 3.53 % และ (PA) 1.76 %
- ◆- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี K₂Cr₂O₇ 1.80 % และ (PA) 1.76 %
- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี K₂Cr₂O₇ 0.91 % และ (PA) 1.76 %
- ▲- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี K₂Cr₂O₇ 0.00 % และ (PA) 1.76 %



ภาพที่ 4-26(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับเวลาของเหล็กเคลือบวัสดุผสม โดยมีปริมาณโพธิ์อะครายลาไมด์ (PA) 1.76 % แต่เปลี่ยนแปลงปริมาณ $K_2Cr_2O_7$ ดังนี้

- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 0.00 % และ (PA) 0.00 %
- ▲- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 1.76 %
- ◆- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 1.80 % และ (PA) 1.76 %
- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 0.91 % และ (PA) 1.76 %
- ▲- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 0.00 % และ (PA) 1.76 %

จากภาพที่ 4-20 ถึงภาพที่ 4-24 สามารถสรุปได้เป็นไปตามภาพที่ 4-25 กับภาพที่ 4-26 และตารางที่ 4-20 จะเห็นว่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตในวัสดุผสมที่เป็นผิวเคลือบลดลง แต่อัตราการกัดกร่อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับกรณีที่ทำกรทดสอบที่สภาวะเดียวกัน แต่ใช้เวลาเพียง 10 วัน (โดยดูได้จากภาพที่ 4-26 (ก) กับภาพที่ 4-26 (ข) และเปรียบเทียบข้อมูลกับตารางที่ 4-11)

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อทิ้งเวลาในการทดสอบให้นานขึ้น จาก 10 วัน เป็น 20 วัน จะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่าง ๆ กัน จะมีค่าลดลง แต่อัตราการกัดกร่อนมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4-22 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 6.

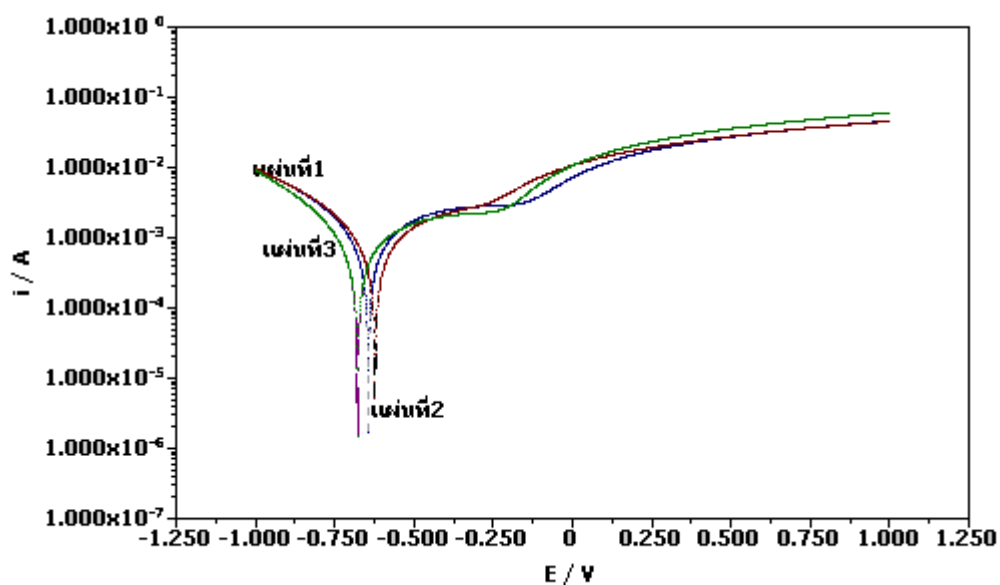
โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน

	ชุดที่ 7 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 7 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 7 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$7.124 \times 10^{-5} \text{ A}$	$7.088 \times 10^{-5} \text{ A}$	$7.162 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$7.124 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$7.088 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$7.162 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.643 V	-0.623 V	-0.678 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.639 V	-0.618 V	-0.671 V
ค่า E_{begin}	-0.675 V	-0.656 V	-0.714 V
ค่า E_{end}	-0.625 V	-0.606 V	-0.656 V
ค่า Corrosion rate	$8.289 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$8.247 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$8.333 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 6. เท่ากับ $8.290 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 6. เท่ากับ -0.648 V.

โพลีอะครายลาไมด์ 1.00 กรัม (คิดเป็น 3.47 %), โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (คิดเป็น 3.53 %)



ภาพที่ 4-27 กราฟโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 6.

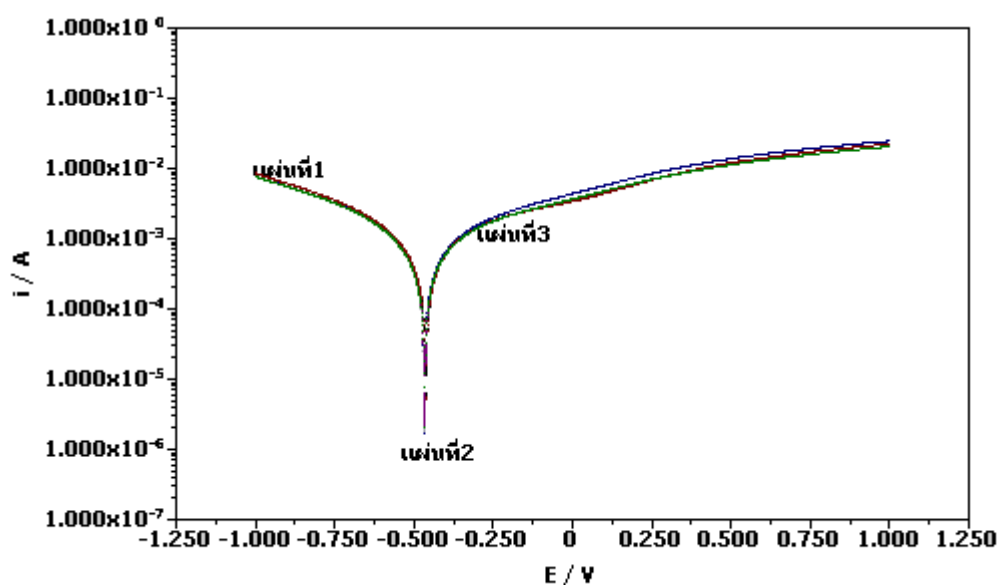
ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 20 วัน

ตารางที่ 4-23 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 7.
โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน

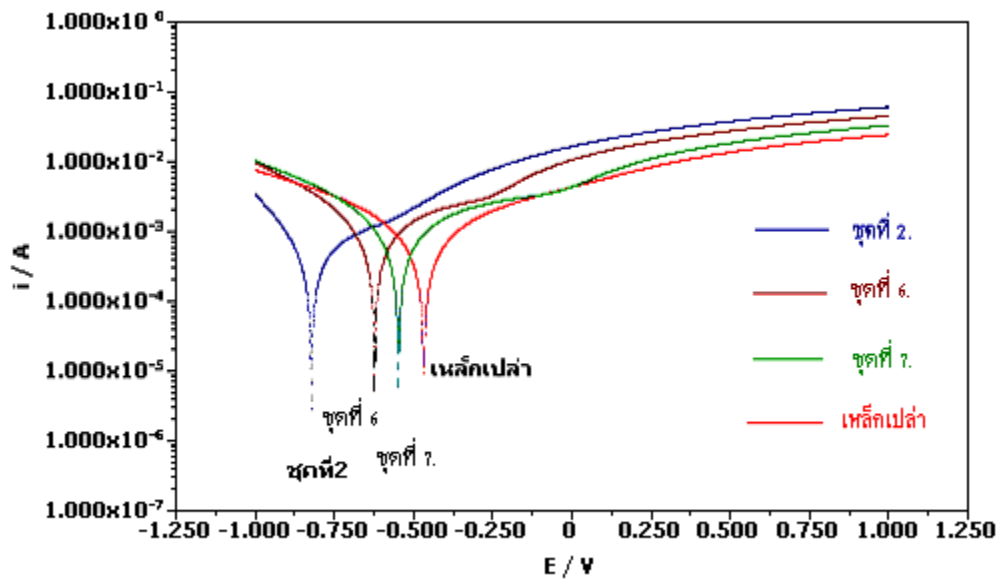
	ชุดที่ 6 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 6 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 6 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$7.546 \times 10^{-5} \text{ A}$	$7.681 \times 10^{-5} \text{ A}$	$7.671 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$7.546 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$7.681 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$7.671 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.467 V	-0.462 V	-0.466 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.461 V	-0.452 V	-0.460 V
ค่า E_{begin}	-0.536 V	-0.524 V	-0.536 V
ค่า E_{end}	-0.443 V	-0.430 V	-0.430 V
ค่า Corrosion rate	$8.780 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$8.937 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$8.926 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 7. เท่ากับ $8.881 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$
ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 7. เท่ากับ -0.465 V.

โพลิอะครายลาไมด์ 1.50 กรัม (คิดเป็น 5.11 %), โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (คิดเป็น 3.53 %)



ภาพที่ 4-28 กราฟโพลาไรเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 7.
ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 20 วัน



ภาพที่ 4-29 กราฟโวลตาโรเซชันของเหล็กเปล่าและแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสม
ที่มีปริมาณโพลีอะครายลาไมด์ต่างกัน
โดยทั้งหมดควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 20 วัน

ชุดที่ 2 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %),
กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม .
(3.53 %)

ชุดที่ 6 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 1.00 กรัม (3.47 %),
กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม .
(3.53 %)

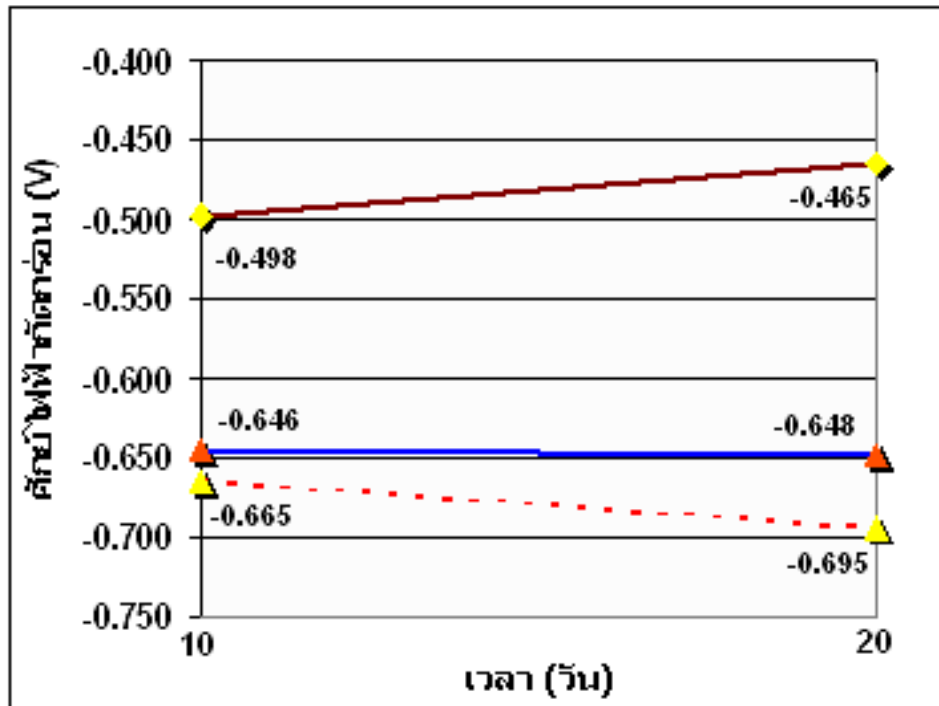
ชุดที่ 7 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 1.50 กรัม (5.11 %),
กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม .
(3.53 %)

เหล็กเปล่า : ไม่มีการเคลือบสารใดๆทั้งสิ้น

ตารางที่ 4-24 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม
ที่มีปริมาณโพลีเอครายลาไมด์ ต่างๆกัน โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุม
ความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน

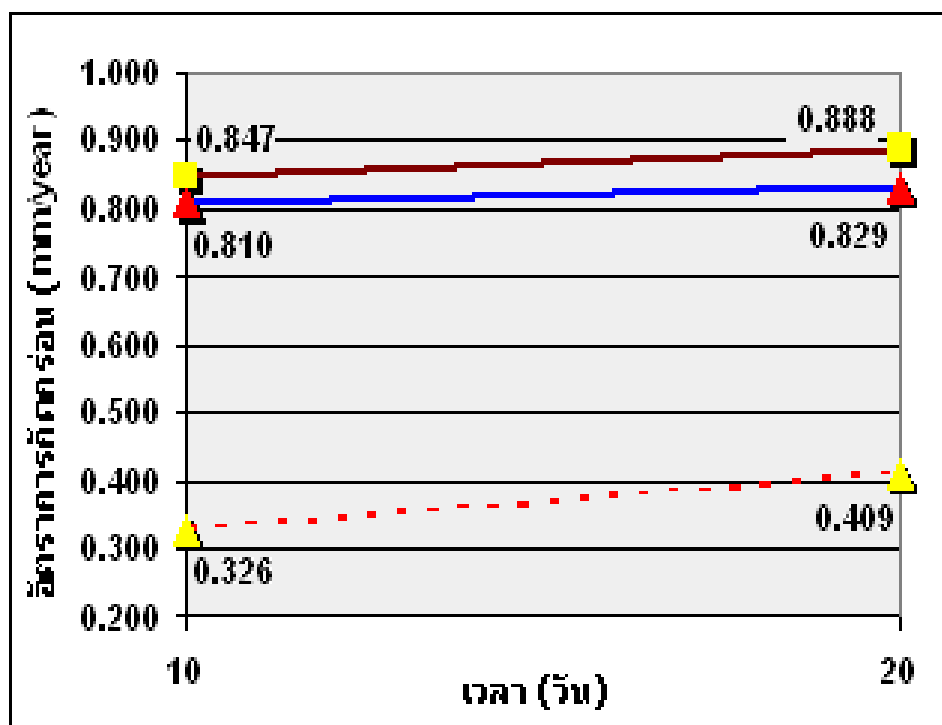
ชุดที่	จำนวนวัน	ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน	ค่าอัตราการกัดกร่อน
2. เคลือบวัสดุผสมที่มี โพลีเอครายลาไมด์ 1.76 %	20	-0.695 V	4.088×10^{-1} mm/year
6. เคลือบวัสดุผสมที่มี โพลีเอครายลาไมด์ 3.47 %	20	-0.648 V	8.290×10^{-1} mm/year
7. เคลือบวัสดุผสมที่มี โพลีเอครายลาไมด์ 5.11 %	20	-0.465 V	8.881×10^{-1} mm/year

ภาพที่ 4-30 แสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโพลีอะครายลาไมด์ต่างกัน โดยทั้งหมดควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 20 วัน โดยเทียบกับระยะเวลา 10 วัน



ภาพที่ 4-30(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนกับเวลาของเหล็กเคลือบวัสดุผสม โดยมีปริมาณ $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % แต่เปลี่ยนแปลงปริมาณโพลีอะครายลาไมด์ (PA) ดังนี้

- ▲ - เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 1.76 %
- ▲ - เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 3.47 %
- ▲ - เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 5.11 %



ภาพที่ 4-30(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับเวลาของเหล็กเคลือบวัสดุผสม

โดยมีปริมาณ $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % แต่เปลี่ยนแปลงปริมาณ โพลีอะครายลาไมด์ (PA) ดังนี้

- ▲ - เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 1.76 %
- ▲— เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 3.47 %
- ◆— เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 5.11 %

จากภาพที่ 4-21 , ภาพที่ 4-27 และภาพที่ 4-28 สามารถสรุปได้เป็นไปตามภาพที่ 4-29 กับภาพที่ 4-30 และตารางที่ 4-23 จะเห็นว่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณ โพลีอะครายลาไมด์ในวัสดุผสมที่เป็นผิวเคลือบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อัตราการกัดกร่อนก็มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับกรณีที่ทำการศึกษาทดสอบในสภาวะเดียวกัน แต่ใช้เวลา การทดสอบเพียง 10 วัน (โดยดูได้จากภาพที่ 4-30 (ก) กับภาพที่ 4-30 (ข) และเปรียบเทียบข้อมูล กับตารางที่ 4-14)

เมื่อทั้งเวลาในการทดสอบให้นานขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี ปริมาณโพลีอะครายลาไมด์ต่างๆกัน จะมีแนวโน้มที่มีค่าลดลง ในขณะที่อัตราการกัดกร่อน มีแนวโน้มที่มีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4-25 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 1.

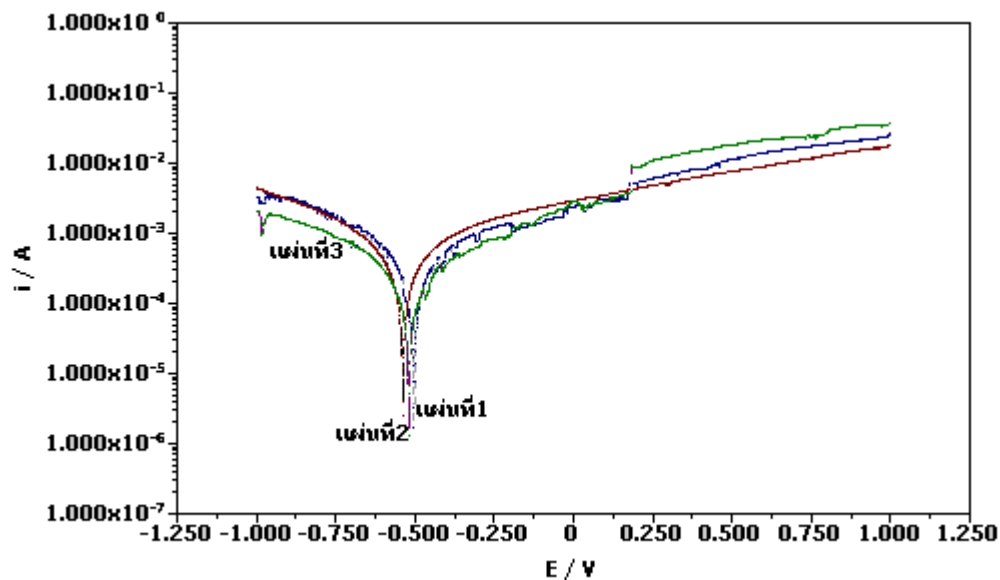
โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 30 วัน

	ชุดที่ 1 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 1 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 1 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$4.457 \times 10^{-5} \text{ A}$	$4.505 \times 10^{-5} \text{ A}$	$4.546 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$4.457 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$4.505 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$4.546 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.503 V	-0.538 V	-0.519 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.507 V	-0.536 V	-0.527 V
ค่า E_{begin}	-0.569 V	-0.593 V	-0.600 V
ค่า E_{end}	-0.455 V	-0.506 V	-0.455 V
ค่า Corrosion rate	$5.186 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$5.242 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$5.289 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 1. เท่ากับ $5.239 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 1. เท่ากับ -0.520 V.

โพลีอะครายลาไมด์ 0.00 กรัม (คิดเป็น 0.00 %)



ภาพที่ 4-31 กราฟโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 1.

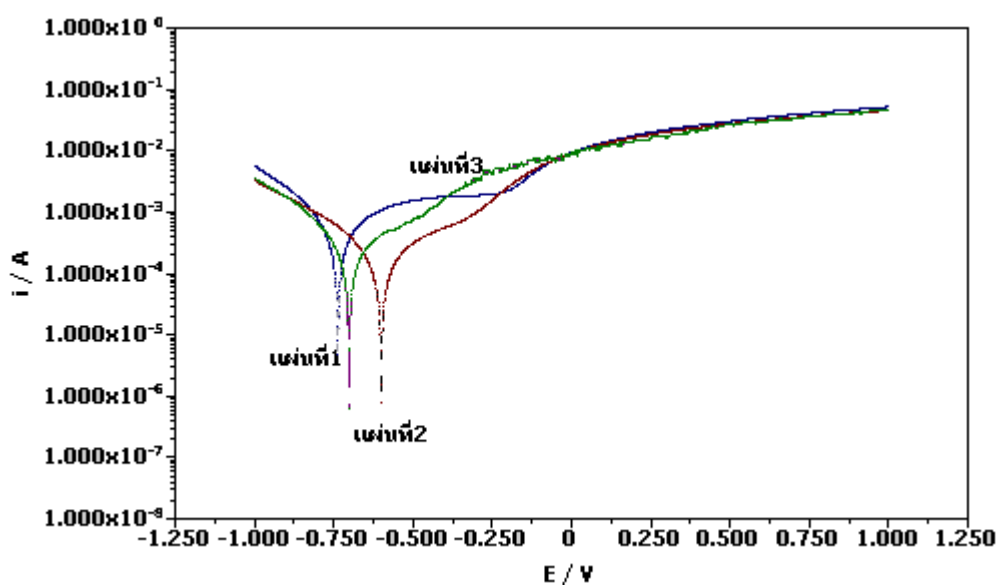
ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 30 วัน

ตารางที่ 4-26 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 2.
โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 30 วัน

	ชุดที่ 2 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 2 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 2 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$3.965 \times 10^{-5} \text{ A}$	$3.698 \times 10^{-5} \text{ A}$	$3.820 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$3.965 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$3.698 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$3.820 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.737 V	-0.600 V	-0.701 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.741 V	-0.596 V	-0.699 V
ค่า E_{begin}	-0.758 V	-0.669 V	-0.751 V
ค่า E_{end}	-0.720 V	-0.556 V	-0.663 V
ค่า Corrosion rate	$4.613 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$4.303 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$4.445 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 2. เท่ากับ $4.454 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$
ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 2. เท่ากับ -0.719 V.

โพลีเอครายลาไมด์ 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.76 %), โปดัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (คิดเป็น 3.53 %)



ภาพที่ 4-32 กราฟโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชุดที่ 2.
ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 30 วัน

ตารางที่ 4-27 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 3.

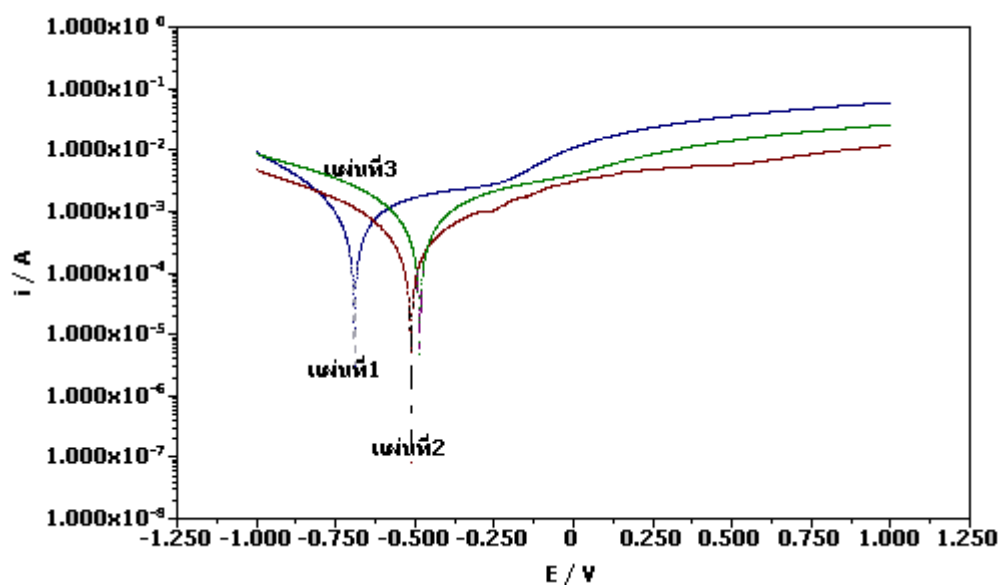
โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 30 วัน

	ชุดที่ 3 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 3 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 3 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$5.895 \times 10^{-5} \text{ A}$	$5.180 \times 10^{-5} \text{ A}$	$5.750 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$5.895 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$5.180 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$5.750 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.690 V	-0.513 V	-0.485 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.687 V	-0.528 V	-0.487 V
ค่า E_{begin}	-0.726 V	-0.606 V	-0.530 V
ค่า E_{end}	-0.663 V	-0.430 V	-0.461 V
ค่า Corrosion rate	$6.859 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$6.027 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$6.690 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 3. เท่ากับ $6.525 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 3. เท่ากับ -0.690 V.

โพลิอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.76 %), โปตัสเซียมไดโครเมต 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.80 %)



ภาพที่ 4-33 กราฟโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 3.

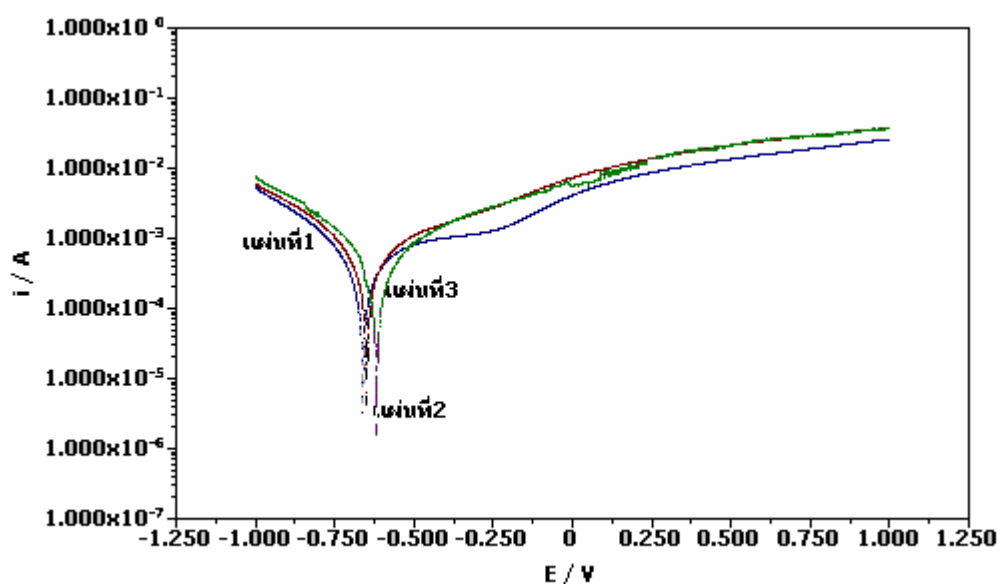
ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 30 วัน

ตารางที่ 4-28 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 4.
โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 30 วัน

	ชุดที่ 4 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 4 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 4 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$6.275 \times 10^{-5} \text{ A}$	$6.064 \times 10^{-5} \text{ A}$	$6.353 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$6.275 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$6.064 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$6.353 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.661 V	-0.649 V	-0.617 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.662 V	-0.644 V	-0.619 V
ค่า E_{begin}	-0.714 V	-0.701 V	-0.682 V
ค่า E_{end}	-0.612 V	-0.619 V	-0.562 V
ค่า Corrosion rate	$7.301 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$7.056 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$7.392 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 4. เท่ากับ $7.250 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$
ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 4. เท่ากับ -0.642 V.

โพลิอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.76 %), โปตัสเซียมไดโครเมต 0.25 กรัม (คิดเป็น 0.91 %)



ภาพที่ 4-34 กราฟโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 4.
ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 30 วัน

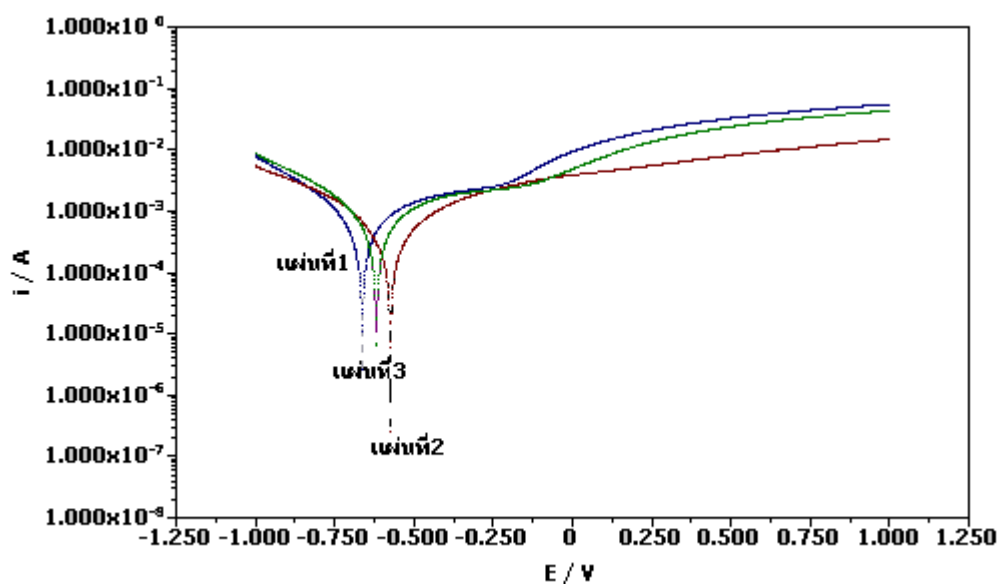
ตารางที่ 4-29 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 5.
โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 30 วัน

	ชุดที่ 5 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 5 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 5 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$6.799 \times 10^{-5} \text{ A}$	$6.966 \times 10^{-5} \text{ A}$	$6.754 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$6.799 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$6.966 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$6.754 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.664 V	-0.574 V	-0.618 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.655 V	-0.583 V	-0.615 V
ค่า E_{begin}	-0.707 V	-0.656 V	-0.663 V
ค่า E_{end}	-0.632 V	-0.511 V	-0.593 V
ค่า Corrosion rate	$7.911 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$8.105 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$7.858 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 5. เท่ากับ $7.958 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

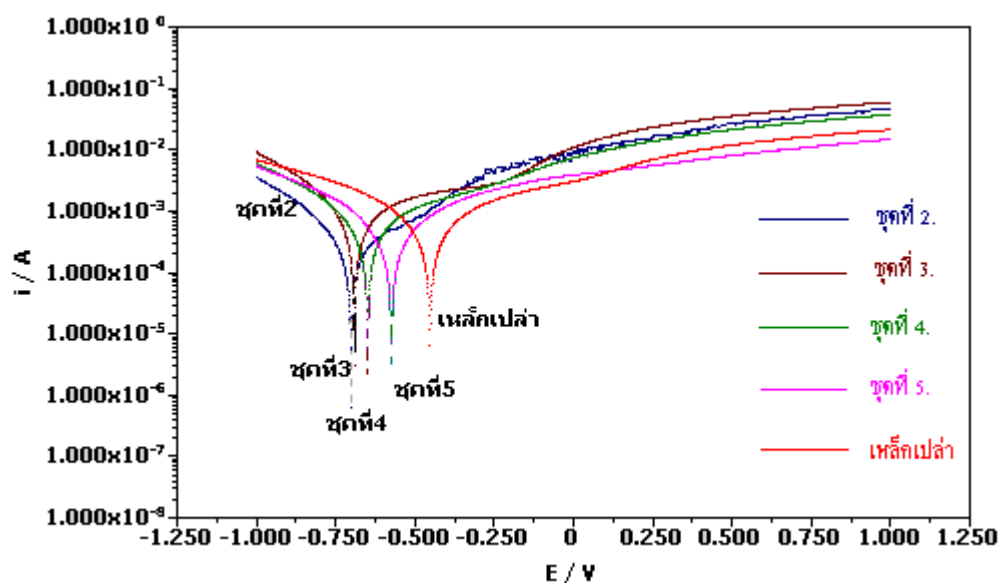
ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 5. เท่ากับ -0.619 V.

โพลิอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.76 %), โปตัสเซียมไดโครเมต 0.00 กรัม (คิดเป็น 0.00 %)



ภาพที่ 4-35 กราฟโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 5.

ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 30 วัน



ภาพที่ 4-36 กราฟโพลาไรเซชันของเหล็กเปล่าและแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสม
ที่มีปริมาณโพลีเอทิลีนไดโอรเมตต่างกัน
โดยทั้งหมดควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 30 วัน

ชุดที่ 2 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %),
กรดฟอร์มิค 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโพลีเอทิลีนไดโอรเมต 1.00 กรัม.
(3.53 %)

ชุดที่ 3 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %),
กรดฟอร์มิค 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโพลีเอทิลีนไดโอรเมต 0.50 กรัม.
(1.80 %)

ชุดที่ 4 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %),
กรดฟอร์มิค 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโพลีเอทิลีนไดโอรเมต 0.25 กรัม.
(0.91 %)

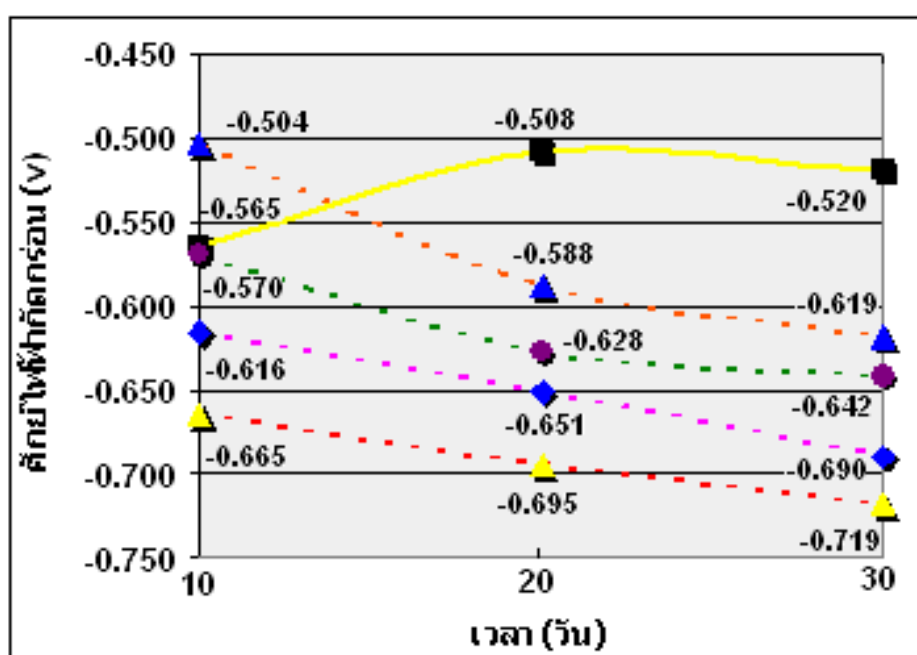
ชุดที่ 5 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %),
กรดฟอร์มิค 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโพลีเอทิลีนไดโอรเมต 0.00 กรัม.
(0.00 %)

เหล็กเปล่า : ไม่มีการเคลือบสารใดๆทั้งสิ้น

ตารางที่ 4-30 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่างกัน โดยทิ้งไว้ในภาชนะควบคุม ความชื้น 85 % เป็นเวลา 30 วัน

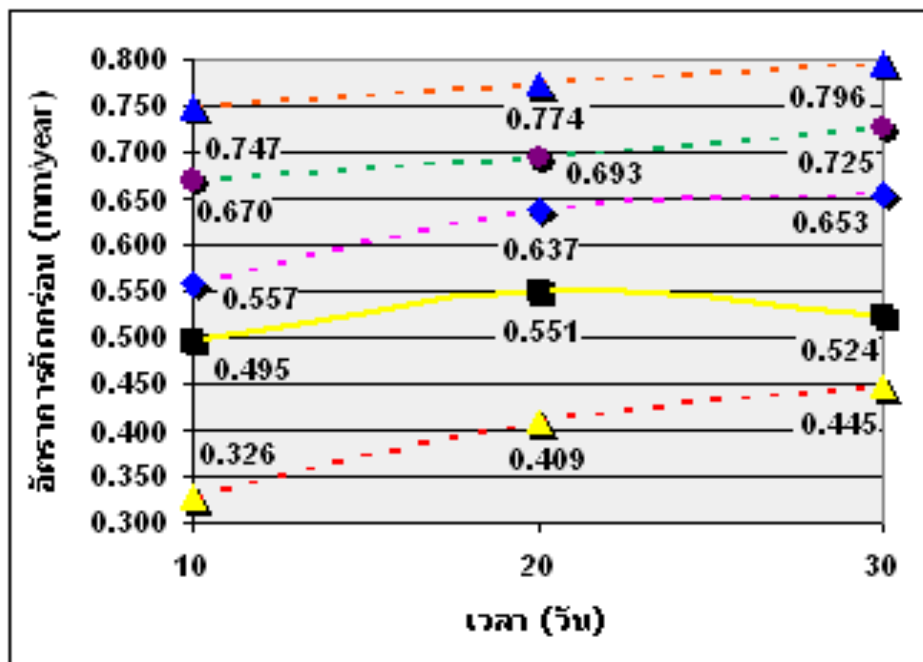
ชุดที่	จำนวนวัน	ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน	ค่าอัตราการกัดกร่อน
1. เคลือบเฉพาะดินขาว ที่ผ่านการกราฟท์	30	-0.520 V	5.239×10^{-1} mm/year
2. เคลือบวัสดุผสมที่มี โปตัสเซียมไดโครเมต 3.53 %	30	-0.719 V	4.454×10^{-1} mm/year
3. เคลือบวัสดุผสมที่มี โปตัสเซียมไดโครเมต 1.80 %	30	-0.690 V	6.525×10^{-1} mm/year
4. เคลือบวัสดุผสมที่มี โปตัสเซียมไดโครเมต 0.91 %	30	-0.642 V	7.250×10^{-1} mm/year
5. เคลือบวัสดุผสมที่มี โปตัสเซียมไดโครเมต 0.00 %	30	-0.619 V	7.958×10^{-1} mm/year

ภาพที่ 4-37 แสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากักרוןและค่าอัตราการกักרוןของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่างๆ กัน โดยทั้งหมดควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 30 วัน โดยเทียบกับระยะเวลา 10 วัน และ 20 วัน



ภาพที่ 4-37(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากักרוןกับเวลาของเหล็กเคลือบวัสดุผสม โดยมีปริมาณโพลิอะครายลาไมด์(PA) 1.76 % แต่เปลี่ยนแปลงปริมาณ K₂Cr₂O₇ ดังนี้

- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี K₂Cr₂O₇ 0.00 % และ (PA) 0.00 %
- ▲- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี K₂Cr₂O₇ 3.53 % และ (PA) 1.76 %
- ...◆... เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี K₂Cr₂O₇ 1.80 % และ (PA) 1.76 %
- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี K₂Cr₂O₇ 0.91 % และ (PA) 1.76 %
- ▲- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี K₂Cr₂O₇ 0.00 % และ (PA) 1.76 %



ภาพที่ 4-37(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับเวลาของเหล็กเคลือบวัสดุผสม โดยมีปริมาณโพตัสโครมาไทด์(PA) 1.76 % แต่เปลี่ยนแปลงปริมาณ $K_2Cr_2O_7$ ดังนี้

- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 0.00 % และ (PA) 0.00 %
- ▲- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 1.76 %
- ◆- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 1.80 % และ (PA) 1.76 %
- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 0.91 % และ (PA) 1.76 %
- ▲- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 0.00 % และ (PA) 1.76 %

จากภาพที่ 4-31 ถึงภาพที่ 4-35 สามารถสรุปได้เป็นไปตามภาพที่ 4-36 กับภาพที่ 4-37 และตารางที่ 4-29 จะเห็นว่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนโดยรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตในวัสดุผสมที่เป็นผิวเคลือบลดลง ดังภาพที่ 4-37 (ก)

เมื่อดูค่าอัตราการกัดกร่อน กลับมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตลดลง ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกันกับกรณีที่ทำการศึกษาที่สภาวะเดียวกัน แต่ใช้เวลาเพียง 10 วัน และ 20 วัน (โดยดูได้จากภาพที่ 4-37 (ข) และเปรียบเทียบข้อมูลกับตารางที่ 4-11 และตารางที่ 4-20)

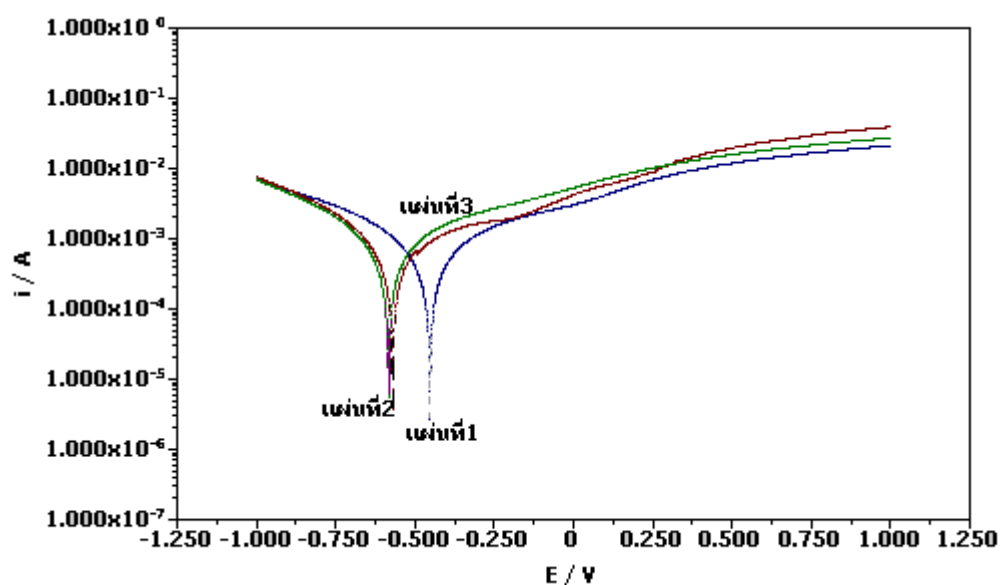
แต่อย่างไรก็ตาม จะเห็นว่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่าง ๆ กัน จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนมีค่าลดลง เมื่อทั้งระยะเวลาในการทดสอบให้นานขึ้น โดยสามารถเปรียบเทียบผลที่ได้จากการเก็บชิ้นงานเหล็กทดสอบไว้เป็นระยะเวลา 10 วัน และ 20 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 4-31 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 6.
โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 30 วัน

	ชุดที่ 7 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 7 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 7 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$7.289 \times 10^{-5} \text{ A}$	$7.053 \times 10^{-5} \text{ A}$	$7.180 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$7.289 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$7.053 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$7.180 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.483 V	-0.547 V	-0.629 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.471 V	-0.549 V	-0.614 V
ค่า E_{begin}	-0.503 V	-0.584 V	-0.647 V
ค่า E_{end}	-0.410 V	-0.536 V	-0.543 V
ค่า Corrosion rate	$8.481 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$8.207 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$8.354 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 6. เท่ากับ $8.347 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$
ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 6. เท่ากับ -0.588 V.

โพลีอะครายลาไมด์ 1.00 กรัม (คิดเป็น 3.47 %), โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (คิดเป็น 3.53 %)



ภาพที่ 4-38 กราฟโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 6.
ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 30 วัน

ตารางที่ 4-32 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 7.

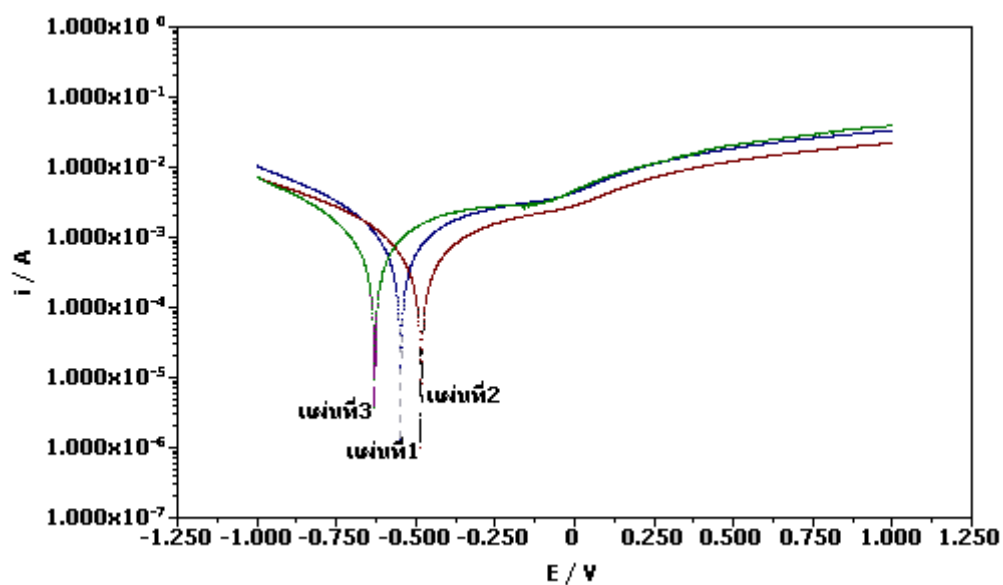
โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุมความชื้น 85 % เป็นเวลา 30 วัน

	ชุดที่ 6 แผ่นที่ 1	ชุดที่ 6 แผ่นที่ 2	ชุดที่ 6 แผ่นที่ 3
ค่า i_{corr}	$8.287 \times 10^{-5} \text{ A}$	$7.914 \times 10^{-5} \text{ A}$	$8.718 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$8.287 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$7.914 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$	$8.718 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.570 V	-0.453 V	-0.583 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.557 V	-0.465 V	-0.592 V
ค่า E_{begin}	-0.589 V	-0.493 V	-0.619 V
ค่า E_{end}	-0.518 V	-0.423 V	-0.578 V
ค่า Corrosion rate	$9.642 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	$9.208 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$	1.014 mm/year

ค่าอัตราการกัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 7. เท่ากับ $9.663 \times 10^{-1} \text{ mm/year}$

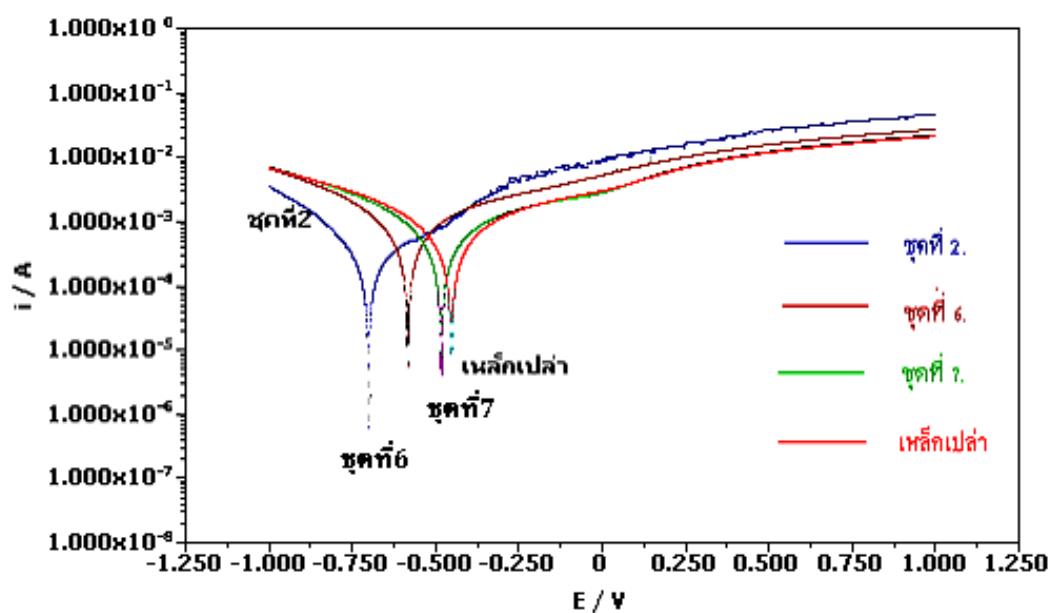
ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเฉลี่ยของเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 7. เท่ากับ -0.535 V.

โพลีอะครายลาไมด์ 1.50 กรัม (คิดเป็น 5.11 %), โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (คิดเป็น 3.53 %)



ภาพที่ 4-39 กราฟโพลาริเซชันของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมชนิดที่ 7.

ที่ควบคุมความชื้น 85 % ไว้เป็นเวลา 30 วัน



ภาพที่ 4-40 กราฟโพลาริเซชันของเหล็กเปล่าและแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสม
ที่มีปริมาณโพลีอะครายลาไมด์ต่างกัน
โดยทั้งหมดควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 30 วัน

ชุดที่ 2 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %),
กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม .
(3.53 %)

ชุดที่ 6 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 1.00 กรัม (3.47 %),
กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม .
(3.53 %)

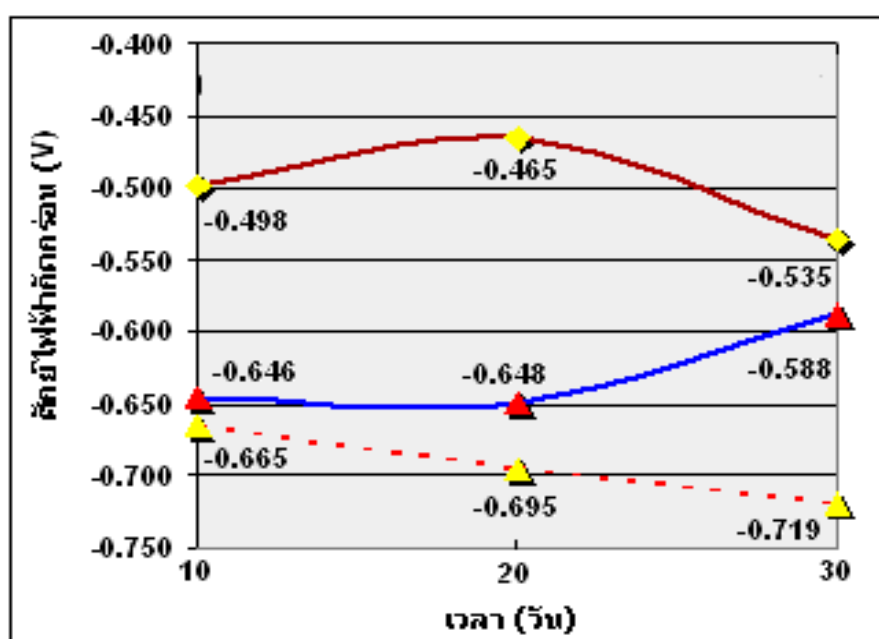
ชุดที่ 7 : ดินขาว 2.00 กรัม, แป้งมัน 3.00 กรัม, โพลีอะครายลาไมด์ 1.50 กรัม (5.11 %),
กรดฟอร์มิก 20.00 มิลลิลิตร, ไทโอยูเรีย 1.20 กรัม และโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม .
(3.53 %)

เหล็กเปล่า : ไม่มีการเคลือบสารใดๆทั้งสิ้น

ตารางที่ 4-33 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสม ที่มีปริมาณโพลีเอครายลาไมด์ต่างกัน โดยทิ้งไว้ในสถานะควบคุม ความชื้น 85 % เป็นเวลา 30 วัน

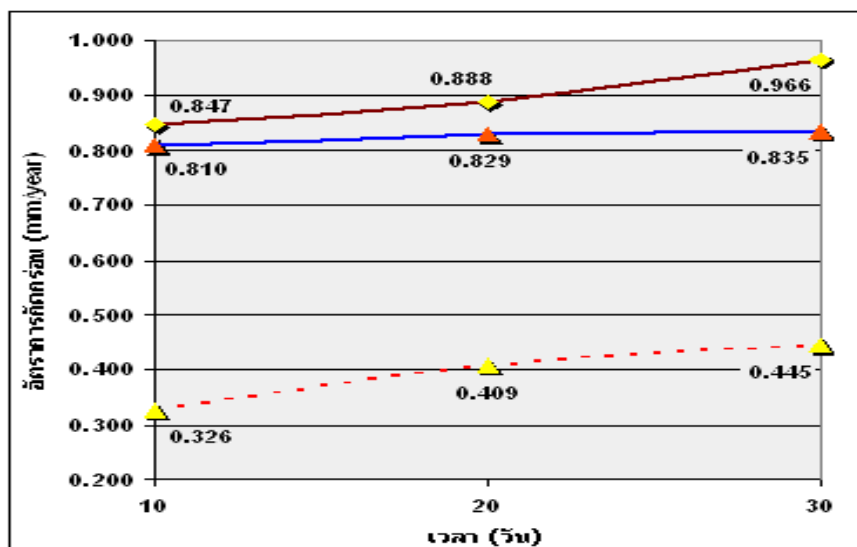
ชุดที่	จำนวนวัน	ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน	ค่าอัตราการกัดกร่อน
2. เคลือบวัสดุผสมที่มี โพลีเอครายลาไมด์ 1.76 %	30	-0.719 V	4.454×10^{-1} mm/year
6. เคลือบวัสดุผสมที่มี โพลีเอครายลาไมด์ 3.47 %	30	-0.588 V	8.354×10^{-1} mm/year
7. เคลือบวัสดุผสมที่มี โพลีเอครายลาไมด์ 5.11 %	30	-0.535 V	9.663×10^{-1} mm/year

ภาพที่ 4-41 แสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากักร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโพลีอะครายลาไมด์ต่างกัน โดยทั้งหมดควบคุมความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 30 วัน โดยเทียบกับระยะเวลา 10 วัน และ 20 วัน



ภาพที่ 4-41(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากักร่อนกับเวลาของเหล็กเคลือบวัสดุผสม โดยมีปริมาณ $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % แต่เปลี่ยนแปลงปริมาณโพลีอะครายลาไมด์(PA) ดังนี้

- ▲ - เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 1.76 %
- ▲ - เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 3.47 %
- ▲ - เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 5.11 %



ภาพที่ 4-41(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับเวลาของเหล็กเคลือบวัสดุผสม

โดยมีปริมาณ $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % แต่เปลี่ยนแปลงปริมาณโพลิอะครายลาไมด์ (PA) ดังนี้

- ▲ - เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 1.76 %
- ▲ - เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 3.47 %
- ▲ - เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 5.11 %

จากภาพที่ 4-32 , ภาพที่ 4-38 และภาพที่ 4-39 สามารถสรุปได้เป็นไปตามภาพที่ 4-40 กับภาพที่ 4-41 และตารางที่ 4-32 จะเห็นว่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อมีปริมาณโพลิอะครายลาไมด์ในวัสดุผสมที่เป็นผิวเคลือบเพิ่มขึ้น และค่าอัตราการกัดกร่อนก็มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นด้วย เมื่อมีปริมาณโพลิอะครายลาไมด์เพิ่มขึ้น โดยจะเห็นว่าเป็นแนวโน้มเดียวกันกับกรณีทำการทดสอบในสภาวะเดียวกัน แต่ใช้เวลาการทดสอบเพียง 10 วัน และ 20 วัน (โดยดูได้จากภาพที่ 4-41 (ก) กับภาพที่ 4-41 (ข) และเปรียบเทียบข้อมูลกับตารางที่ 4-14 และตารางที่ 23)

และค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโพลิอะครายลาไมด์ต่างกันโดยรวมแล้วจะมีค่าลดลง เมื่อถึงเวลาในการทดสอบให้นานขึ้น แต่มีวัสดุผสมที่มีปริมาณของโพลิอะครายลาไมด์เท่ากับ 1.00 กรัม(3.53 %) ที่มีค่าเพิ่มขึ้น อาจจะเป็นเพราะความผิดพลาดจากการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิก เนื่องจากค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบ 3 ครั้ง ในแต่ละชุดของวัสดุผสม อาจจะมีบางครั้งที่เกิดความผิดพลาด จึงส่งผลทำให้ค่าที่ได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง และเมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่มีวัสดุผสมที่ผิวเคลือบเป็นเหมือนกัน จะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนมีแนวโน้มที่ลดลง ในขณะที่อัตราการกัดกร่อนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อถึงระยะเวลาในการทดสอบให้นานขึ้น

ตารางที่ 4-34 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กแผ่น
โดยมีระยะเวลาที่ตั้งทิ้งไว้ 10 วัน

ค่า i_{corr}	$9.336 \times 10^{-5} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$9.336 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.463 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.456 V
ค่า E_{begin}	-0.530 V
ค่า E_{end}	-0.435 V
ค่า Corrosion rate	1.086 mm/year

ตารางที่ 4-35 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กแผ่น
โดยมีระยะเวลาที่ตั้งทิ้งไว้ 20 วัน

ค่า i_{corr}	$1.139 \times 10^{-4} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$1.139 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.467 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.460 V
ค่า E_{begin}	-0.527 V
ค่า E_{end}	-0.431 V
ค่า Corrosion rate	1.326 mm/year

ตารางที่ 4-36 ผลการทดสอบเพื่อหาอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเปล่า
โดยมีระยะเวลาที่ตั้งทิ้งไว้ 30 วัน

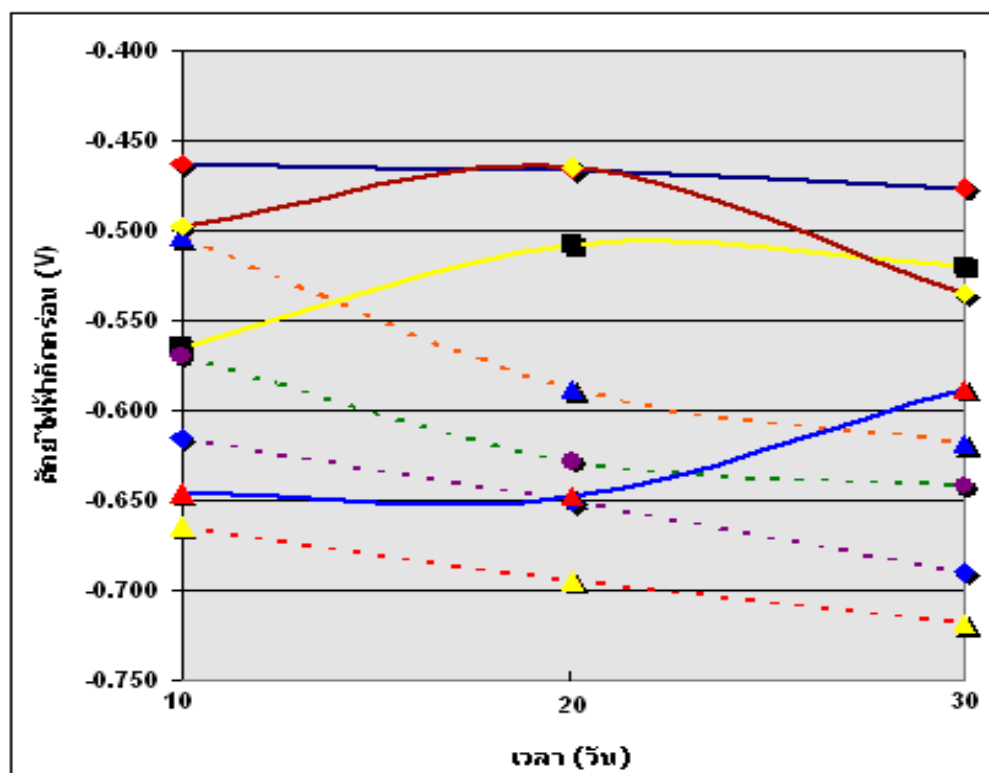
ค่า i_{corr}	$1.507 \times 10^{-4} \text{ A}$
ค่า I_{corr}	$1.507 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$
ค่า $E_{\text{corr,obs}}$	-0.476 V
ค่า $E_{\text{corr,cal}}$	-0.475 V
ค่า E_{begin}	-0.540 V
ค่า E_{end}	-0.419 V
ค่า Corrosion rate	1.753 mm/year

เมื่อทำการทดลองเก็บเหล็กเปล่าไว้เป็นเวลา 10 วัน, 20 วัน และ 30 วัน จะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}) แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง (ค่าอยู่ที่ราว -0.460 V.) แสดงว่าพฤติกรรมความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเปล่านั้นคงเดิม แต่อัตราการกัดกร่อนของเหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อทิ้งไว้ที่สภาวะความชื้น 85 % เป็นระยะเวลานานขึ้น (1.086, 1.326 และ 1.753 mm/year เมื่อเวลาผ่านไป 10 วัน, 20 วัน และ 30 วัน ตามลำดับ)

ตารางที่ 4-37 ผลการทดสอบการหาค่าอัตราการกัดกร่อนโดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอไดนามิก

ตัวอย่างที่ทำการทดสอบ	เวลา (วัน)	อัตรา กัดกร่อน mm/year	ศักย์ กัดกร่อน (V.)	เวลา (วัน)	อัตรา กัดกร่อน mm/year	ศักย์ กัดกร่อน (V.)	เวลา (วัน)	อัตรา กัดกร่อน mm/year	ศักย์ กัดกร่อน (V.)
1. แผ่นเหล็กเปล่าๆ ไม่มีการเคลือบ	10	1.086	-0.463	20	1.326	-0.467	30	1.753	-0.476
2. ดินขาว 2.0 กรัม แป้งมัน 3.0 กรัม โพลิเอครายลาไมด์ 0.00 %	10	0.495	-0.565	20	0.551	-0.508	30	0.524	-0.520
3. โพลิเอครายลาไมด์ 1.76 % โปดัสเซียมไดโครเมต 3.53 %	10	0.326	-0.665	20	0.409	-0.695	30	0.445	-0.719
4. โพลิเอครายลาไมด์ 1.76 % โปดัสเซียมไดโครเมต 1.80 %	10	0.557	-0.616	20	0.637	-0.651	30	0.653	-0.690
5. โพลิเอครายลาไมด์ 1.76 % โปดัสเซียมไดโครเมต 0.91 %	10	0.670	-0.570	20	0.693	-0.628	30	0.725	-0.642
6. โพลิเอครายลาไมด์ 1.76 % โปดัสเซียมไดโครเมต 0.00 %	10	0.747	-0.504	20	0.774	-0.588	30	0.796	-0.619
7. โพลิเอครายลาไมด์ 3.47 % โปดัสเซียมไดโครเมต 3.53 %	10	0.810	-0.646	20	0.829	-0.648	30	0.835	-0.588
8. โพลิเอครายลาไมด์ 5.11 % โปดัสเซียมไดโครเมต 3.53 %	10	0.847	-0.498	20	0.888	-0.465	30	0.966	-0.535

ภาพที่ 4-42 แสดงกราฟเพื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและค่าอัตราการกัดกร่อน
ของแผ่นเหล็กเคลือบวัสดุผสมและแผ่นเหล็กเปล่า โดยทั้งหมดควบคุม
ความชื้นที่ 85 % เป็นเวลา 10 วัน , 20 วัน และ 30 วัน ตามลำดับ



ภาพที่ 4-42(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากัณฑ์ร่อนกับเวลาของเหล็กเปล่า

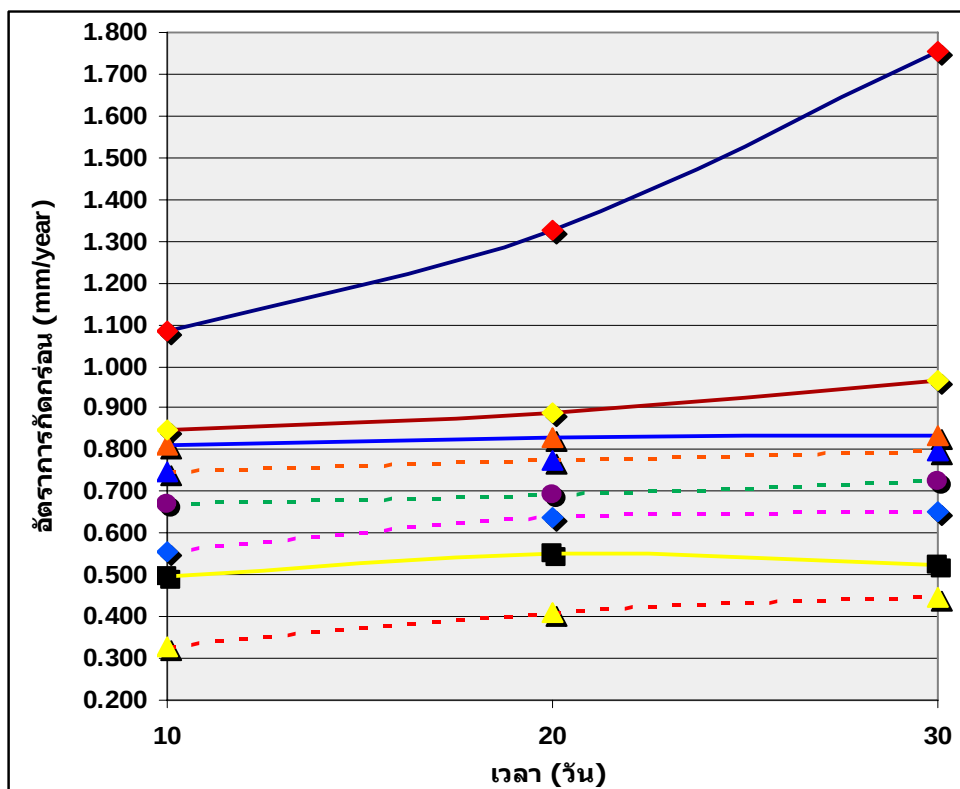
และเหล็กเคลือบวัสดุผสม โดยมีปริมาณ โพลีอะครายลาไมด์ (PA) 1.76 %

แต่เปลี่ยนแปลงปริมาณ $K_2Cr_2O_7$ (เส้นประ)

และเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณ $K_2Cr_2O_7$ 3.53 %

แต่เปลี่ยนแปลงปริมาณ โพลีอะครายลาไมด์ (PA) (เส้นเต็ม) ดังนี้

- ◆— เหล็กเปล่า —■— เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 0.00 % และ (PA) 0.00 %
- ▲- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 0.00 % และ (PA) 1.76 %
- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 0.91 % และ (PA) 1.76 %
- ◆- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 1.80 % และ (PA) 1.76 %
- ▲- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 1.76 %
- ▲— เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 3.47 %
- ◆— เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 5.11 %



ภาพที่ 4-42(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับเวลาของเหล็กเปล่า

และเหล็กเคลือบวัสดุผสม โดยมีปริมาณโพลิอะครายลาไมด์ (PA) 1.76 %

แต่เปลี่ยนแปลงปริมาณ $K_2Cr_2O_7$ (เส้นประ)

และเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณ $K_2Cr_2O_7$ 3.53 %

แต่เปลี่ยนแปลงปริมาณโพลิอะครายลาไมด์ (PA) (เส้นเต็ม) ดังนี้

- ◆— เหล็กเปล่า —■— เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 0.00 % และ (PA) 0.00 %
- ▲- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 0.00 % และ (PA) 1.76 %
- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 0.91 % และ (PA) 1.76 %
- ◆- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 1.80 % และ (PA) 1.76 %
- ▲- เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 1.76 %
- ▲— เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 3.47 %
- ◆— เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มี $K_2Cr_2O_7$ 3.53 % และ (PA) 5.11 %

จากภาพที่ 4-42 (ก) กับภาพที่ 4-42 (ข) และตารางที่ 4-36 จะเห็นว่าเหล็กที่เคลือบดินขาวที่กราฟท์กับแป้งมันและอะครายลาไมด์เพียงอย่างเดียว มีค่าศักย์ไฟฟ้ากัลดร่อนต่ำกว่าเหล็กเปล่า โดยมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก (ประมาณ -0.530 V.) นอกจากนี้อัตราการกัลดร่อนก็มีค่าใกล้เคียงกัน (0.495 , 0.551 และ 0.524 mm/year เมื่อเวลาผ่านไป 10 วัน, 20 วัน และ 30 วัน ตามลำดับ)

อย่างไรก็ตาม เมื่อเคลือบเหล็กด้วยวัสดุผสมในทุกอัตราส่วน ค่าศักย์ไฟฟ้ากัลดร่อนกลับลดลงต่ำกว่าค่าศักย์ไฟฟ้ากัลดร่อนของเหล็กที่เคลือบดินขาวที่กราฟท์กับแป้งมันและอะครายลาไมด์เพียงอย่างเดียว เมื่อทิ้งไว้ที่สภาวะความชื้น 85 % เป็นระยะเวลาเท่ากัน

จากการทดสอบจะเห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบกราฟโพลาริเซชันของเหล็กเปล่าและเหล็กที่เคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่างกัน เหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่างกัน จะมีค่าศักย์ไฟฟ้ากัลดร่อน (E_{corr}) ต่ำกว่าเหล็กเปล่าแทบทั้งสิ้น และเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตสูง จะมีค่าศักย์ไฟฟ้ากัลดร่อนต่ำกว่าเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่ำ และจากภาพที่ 4-42 (ข) กับข้อมูลในตารางที่ 4-36 แสดงว่ายังมีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตน้อย อัตราการกัลดร่อนยิ่งสูงขึ้น และยิ่งสูงกว่าเหล็กเคลือบดินขาวที่กราฟท์กับแป้งมันและอะครายลาไมด์เพียงอย่างเดียวด้วย

และเมื่อทิ้งไว้เป็นระยะเวลานานขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้ากัลดร่อนมีแนวโน้มลดลงไปอีก ในขณะที่อัตราการกัลดร่อนของเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตเท่ากัน จะมีค่าสูงขึ้น

แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณโพลีอะครายลาไมด์ โดยวัสดุผสมที่เคลือบมีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตคงที่ จะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้ากัลดร่อนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อัตราการกัลดร่อนก็มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อโพลีอะครายลาไมด์มีปริมาณมากขึ้นด้วย ในขณะที่อัตราการกัลดร่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยกับระยะเวลาที่นานขึ้น

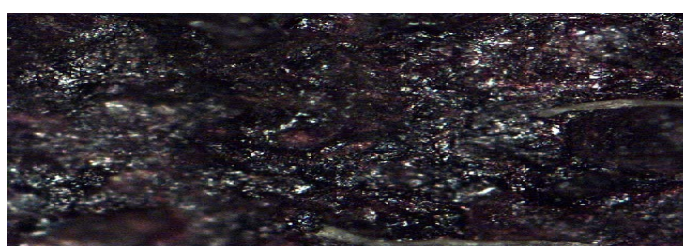
4.6 ผลการตรวจผิวเหล็กหลังการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิก

แล้วล้างผิวเคลือบออก

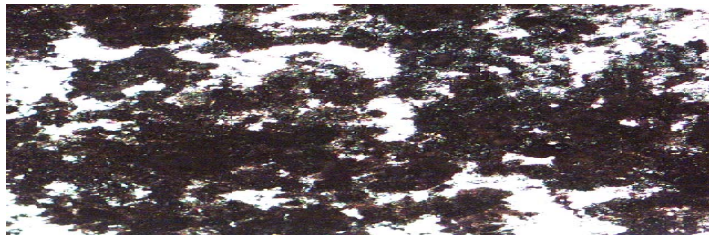
เมื่อนำชิ้นงานไปล้างผิวเคลือบที่เคลือบไว้ออกให้หมด แล้วนำชิ้นงานทดสอบไปถ่ายภาพหลังทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้นแล้ว เพื่อที่จะดูลักษณะของผิวน้ำแผ่นเหล็ก ด้วยกล้อง Olympus BX 60M ซึ่งได้ผลดังนี้



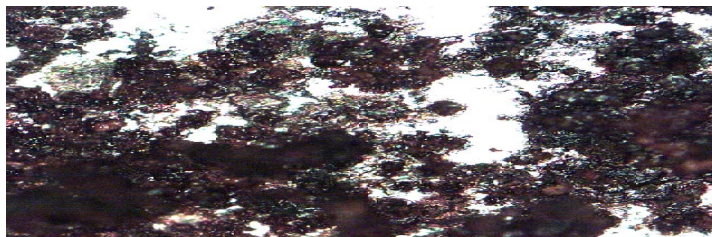
ภาพที่4-43 แสดงภาพพื้นผิวของเหล็กแผ่นชิ้นที่ 1.
ที่ไม่มีการเคลือบ แล้วทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 %
เป็นเวลา 50 วัน (กำลังขยาย 50 เท่า)



ภาพที่4-44 แสดงภาพพื้นผิวของเหล็กแผ่นชิ้นที่ 2.
ที่ไม่มีการเคลือบ แล้วทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 %
เป็นเวลา 50 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า)

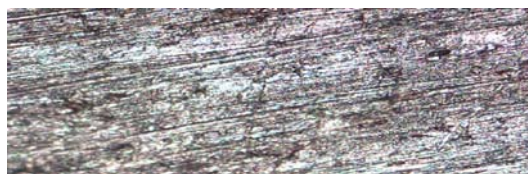


ภาพที่4-45 แสดงภาพพื้นผิวของเหล็กเปล่าขึ้นที่ 3.
ที่ไม่มีการเคลือบ แล้วทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 %
เป็นเวลา 50 วัน (กำลังขยาย 50 เท่า)



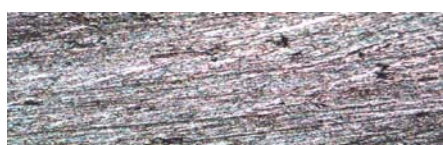
ภาพที่4-46 แสดงภาพพื้นผิวของเหล็กเปล่าขึ้นที่ 3.
ที่ไม่มีการเคลือบ แล้วทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 %
เป็นเวลา 50 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า)

ภาพที่ 4-43 ถึงภาพที่ 4-46 แสดงพื้นผิวของขึ้นเหล็กเปล่าที่ยังไม่มีการเคลือบวัสดุผสมใดๆ เป็นระยะเวลา 50 วันในสภาวะความชื้น 85 % จะเห็นว่ามีสนิมเหล็กเกิดขึ้นเป็นปริมาณมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการกัดกร่อนเกิดขึ้นเป็นอย่างมาก

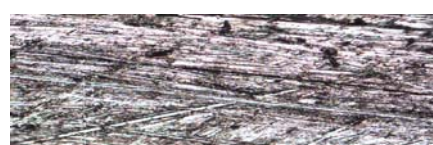


ภาพที่4-47 แสดงภาพพื้นผิวหลักที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม
ทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า)
โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โพลีอะครายลาไมด์ 0.00 กรัม,
โปดัสเซียมไดโครเมต 0.00 กรัม , ตัวริเริ่ม 0.55 กรัม

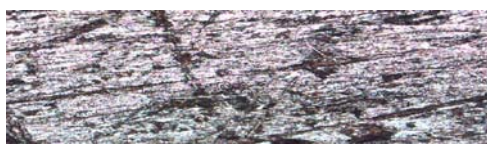
ภาพที่ 4-47 แสดงพื้นผิวหลักที่ผ่านการเคลือบดินขาวที่กราฟท์กับแป้งมันและ
อะครายลาไมด์ เป็นระยะเวลา 20 วันในสภาวะความชื้น 85 % จะเห็นสภาพพื้นผิวที่มีสภาพ
การกัดกร่อนเกิดขึ้นน้อย



(ก)



(ข)



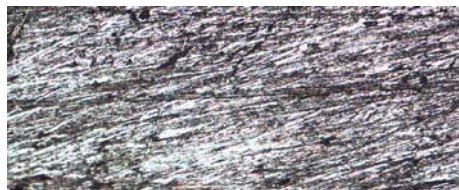
(ค)

ภาพที่4-48 แสดงภาพพื้นผิวหลักที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม
ทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า)
โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โปดัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม,
ตัวริเริ่ม 0.55 กรัม โดยมีปริมาณโพลีอะครายลาไมด์เป็น
(ก) 0.50 กรัม (1.76 %) , (ข) 1.00 กรัม (3.47 %) , (ค) 1.50 กรัม (5.11 %)

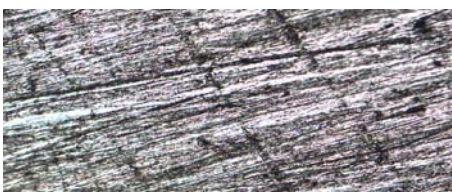
ภาพที่ 4-48 แสดงพื้นผิวหลักที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสมที่มีการเติมโพลีอะครายลาไมด์
ในปริมาณที่ต่าง ๆ กัน เป็นระยะเวลา 20 วัน ในสภาวะความชื้น 85 % จะเห็นว่าพื้นผิวหลักที่
เคยเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณโพลีอะครายลาไมด์เป็น 0.50 กรัม มีสภาพพื้นผิวที่มีการกัดกร่อน
น้อยที่สุด และการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณโพลีอะครายลาไมด์ที่เพิ่มขึ้น



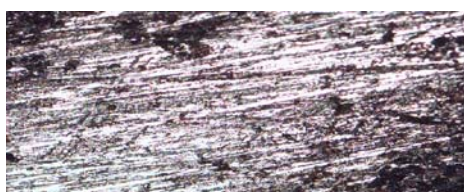
(ก)



(ข)



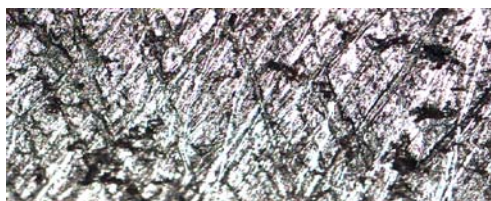
(ค)



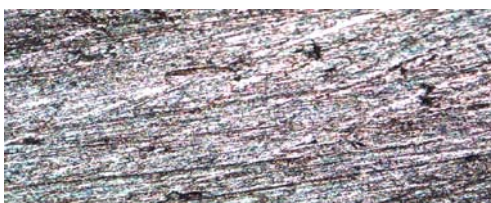
(ง)

ภาพที่ 4-49 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม
 ทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า)
 โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม,
 ตัวริเริ่ม 0.55 กรัม โดยมีปริมาณโปดัสเซียมไดโครเมตเป็น
 (ก) 1.00 กรัม (3.53 %), (ข) 0.50 กรัม (1.80 %)
 (ค) 0.25 กรัม (0.91 %), (ง) 0.00 กรัม (0.00 %)

ภาพที่ 4-49 แสดงพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบด้วยวัสดุผสมที่มีปริมาณโปดัสเซียม-ไดโครเมตต่างกัน ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 20 วันในสภาวะความชื้น 85 % จะเห็นว่าผิวเคลือบที่มีปริมาณโปดัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม มีการกัดกร่อนเกิดขึ้นน้อยที่สุด และสภาพการกัดกร่อนที่พื้นผิวเหล็กจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของโปดัสเซียมไดโครเมตที่ลดลง



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4-50 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม

ทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า)

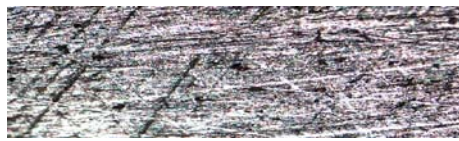
โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม,

โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม โดยมีปริมาณตัวริเริ่มเป็น

(ก) 0.45 กรัม (1.59 %) , (ข) 0.55 กรัม (1.93 %)

(ค) 0.65 กรัม (2.29 %)

ภาพที่ 4-50 แสดงพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบด้วยวัสดุผสม โดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาการกราฟท์ที่มีปริมาณต่างกัน ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 20 วันในสภาวะความชื้น 85 % จะเห็นว่าสภาพพื้นผิวของเหล็กมีการกัดกร่อนน้อยที่สุด เมื่อใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเป็น 0.55 กรัม (1.93 %) ซึ่งถ้าตัวริเริ่มปฏิกิริยามีปริมาณที่มากกว่าหรือน้อยกว่าปริมาณนี้ การกัดกร่อนจะเกิดเพิ่มมากขึ้น



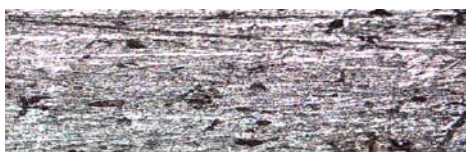
ภาพที่ 4-51 แสดงภาพพื้นผิวหลักที่มีการเคลือบวัสดุผสม

ทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 35 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า)

โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โพลีอะครายลาไมด์ 0.00 กรัม,

โปตัสเซียมไดโครเมต 0.00 กรัม , ตัวริเริ่ม 0.55 กรัม

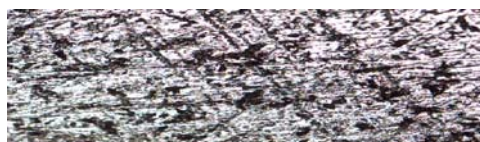
ภาพที่ 4-51 แสดงพื้นผิวหลักที่ผ่านการเคลือบดินขาวที่กราฟท์กับแป้งมันและอะครายลาไมด์ โดยทิ้งไว้ที่สภาวะความชื้น 85 % เป็นระยะเวลา 35 วัน จะเห็นว่าเมื่อเทียบกับภาพที่ 4-47 ซึ่งทิ้งชิ้นงานทดสอบไว้ที่สภาวะแบบเดียวกันเป็นเวลา 20 วัน สภาพการกัดกร่อนจะมีมากขึ้น (เมื่อทิ้งไว้นานวันขึ้น)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4-52 แสดงภาพพื้นผิวหลักที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม

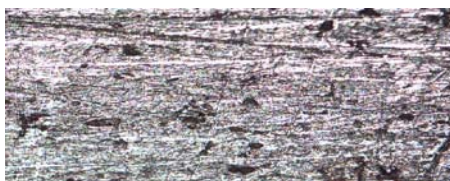
ทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 35 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า)

โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม,

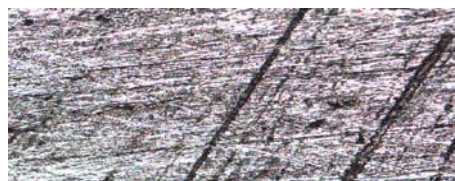
ตัวริเริ่ม 0.55 กรัม โดยมีปริมาณโพลีอะครายลาไมด์เป็น

(ก) 0.50 กรัม (1.76 %) , (ข) 1.00 กรัม (3.47 %) , (ค) 1.50 กรัม (5.11 %)

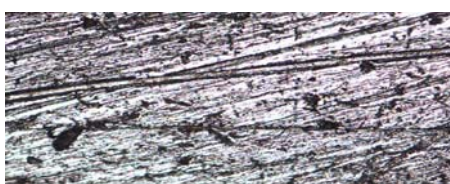
ภาพที่ 4-52 แสดงพื้นผิวหลักที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสมที่มีการเติมโพลีอะครายลาไมด์ในปริมาณที่ต่างกัน เป็นระยะเวลา 35 วันในสภาวะความชื้น 85 % จะเห็นว่ามีแนวโน้มเป็นไปอย่างภาพที่ 4-48 แต่สภาพการกัดกร่อนมีมากกว่าเนื่องจากทิ้งไว้นานวันกว่า ซึ่งผลแบบเดียวกันนี้จะสังเกตได้จากภาพที่ 4-53 ที่แสดงพื้นผิวหลักที่ผ่านการเคลือบด้วยวัสดุผสมที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่างกัน แต่ทิ้งไว้นานวันขึ้นเป็น 35 วัน



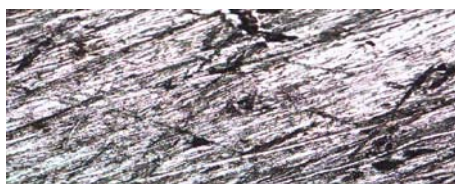
(ก)



(ข)

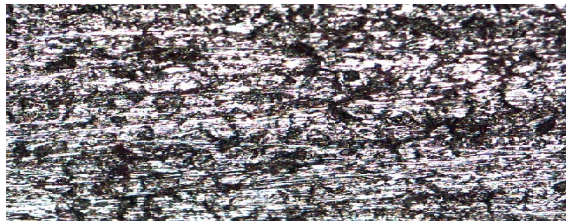


(ค)

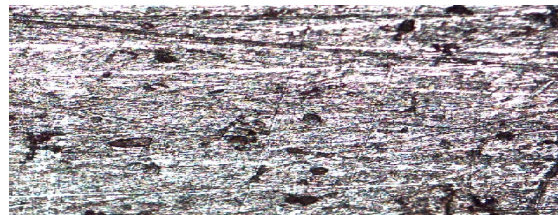


(ง)

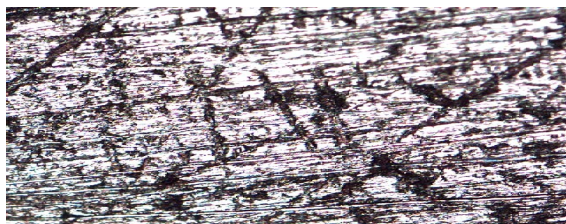
ภาพที่4-53 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม
 ที่งัวที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 35 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า)
 โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม,
 ตัวริเริ่ม 0.55 กรัม โดยมีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตเป็น
 (ก) 1.00 กรัม(3.53 %), (ข) 0.50 กรัม(1.80 %)
 (ค) 0.25 กรัม(0.91 %), (ง) 0.00 กรัม(0.00 %)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4-54 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม

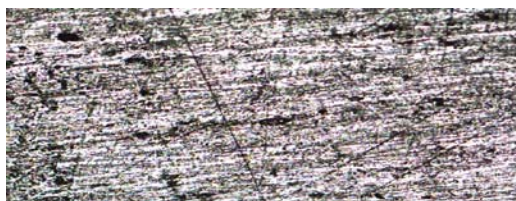
ทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 35 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า)

โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โพลีเอครายลาไมด์ 0.50 กรัม,

โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม โดยมีปริมาณตัวริเริ่มเป็น

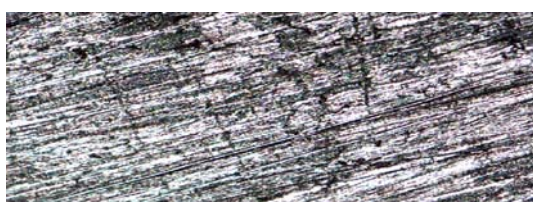
(ก) 0.45 กรัม (1.59 %) , (ข) 0.55 กรัม (1.93 %) , (ค) 0.65 กรัม (2.29 %)

ภาพที่ 4-54 แสดงพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบด้วยวัสดุผสม โดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาการกราฟท์ที่มีปริมาณต่าง ๆ กัน ซึ่งผลแสดงว่าแม้จะทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 35 วันในสภาวะความชื้น 85 % สภาพการกัดกร่อนเมื่อใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา 0.55 กรัม ยังคงเกิดขึ้นน้อยที่สุด แต่สภาพการกัดกร่อนจะรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเป็น 0.45 กรัม จะรุนแรงกว่าการใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา 0.65 กรัม

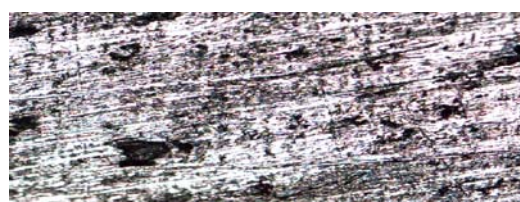


ภาพที่4-55 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม
 ทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 50 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า)
 โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โพลีอะครายลาไมด์ 0.00 กรัม,
 โปตัสเซียมไดโครเมต 0.00 กรัม , คาร์บอน 0.55 กรัม

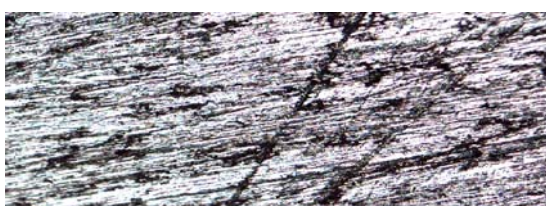
ภาพที่ 4-55 แสดงสภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบดินขาวที่กราฟท์กับแป้งมันและ
 อะครายลาไมด์ โดยทิ้งไว้ที่สภาวะความชื้น 85 % เป็นระยะเวลา 50 วัน ยังคงมีสภาพที่ใกล้เคียงกัน
 เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟท์ที่ขึ้นงานทดสอบไว้เป็นเวลา 20 วันและ 35 วัน



(ก)

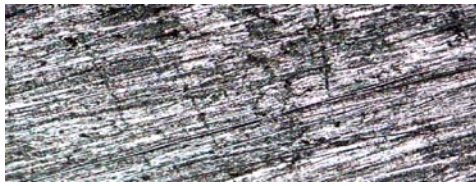


(ข)

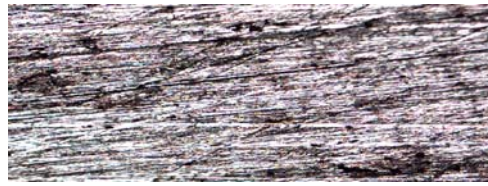


(ค)

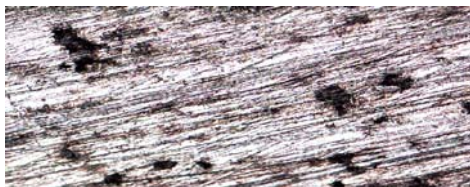
ภาพที่4-56 แสดงภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม
 ทิ้งไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 50 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า)
 โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม,
 คาร์บอน 0.55 กรัม โดยมีปริมาณโพลีอะครายลาไมด์เป็น
 (ก) 0.50 กรัม(1.76 %) , (ข) 1.00 กรัม(3.47 %) , (ค) 1.50 กรัม(5.11 %)



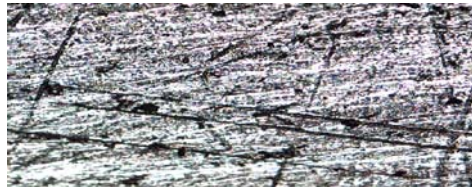
(ก)



(ข)



(ค)

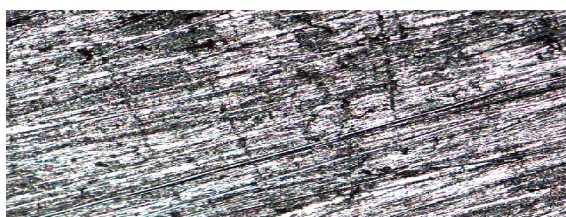


(ง)

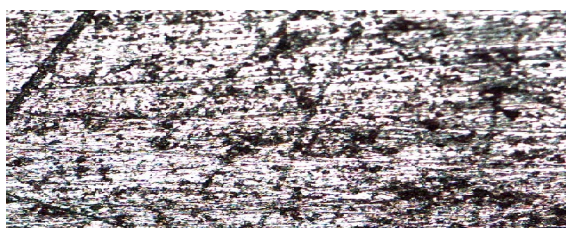
ภาพที่ 4-57 แสดงภาพพื้นผิวหลักที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม
 ที่งัวที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 50 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า)
 โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม,
 ตัวริเริ่ม 0.55 กรัม โดยมีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตเป็น
 (ก) 1.00 กรัม (3.53 %) , (ข) 0.50 กรัม (1.80 %)
 (ค) 0.25 กรัม (0.91 %) , (ง) 0.00 กรัม (0.00 %)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4-58 แสดงภาพพื้นผิวหลักที่ผ่านการเคลือบวัสดุผสม
 ที่งัวที่ความชื้น 85 % เป็นเวลา 50 วัน (กำลังขยาย 100 เท่า)
 โดยวัสดุผสมมีองค์ประกอบ คือ โพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม,
 โปดัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม โดยมีปริมาณตัวริเริ่มเป็น
 (ก) 0.45 กรัม (1.59 %) , (ข) 0.55 กรัม (1.93 %) , (ค) 0.65 กรัม (2.29 %)

ภาพที่ 4-56 ถึง ภาพที่ 4-58 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ผ่านการทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 50 วัน ก็มีแนวโน้ม
 ต่างๆ อย่างที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น สำหรับผลของปริมาณโพลีอะครายลาไมด์, ผลของปริมาณ
 โปดัสเซียมไดโครเมต และผลของปริมาณตัวริเริ่มของปฏิกิริยาการกราฟท์

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 ผลจากการตรวจสอบปฏิกิริยาการกราฟต์ดินขาว แป้งมัน และอะครายลาไมด์ ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

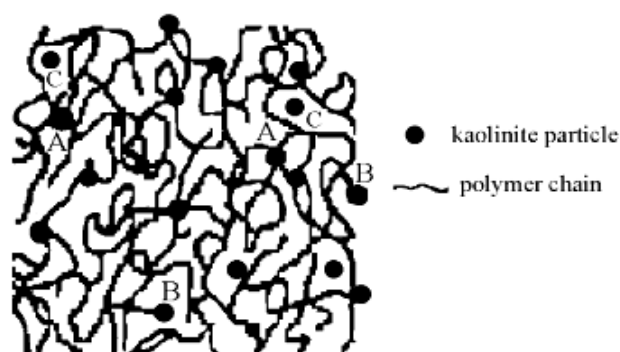
ตารางที่ 5-1 แสดงหมู่ฟังก์ชันและตำแหน่งของพีคที่ปรากฏของผลิตภัณฑ์จากการกราฟต์

หมู่ฟังก์ชัน	ความยาวคลื่นจากผลการทดลอง (cm^{-1})	
	ทฤษฎี	ผลการทดลอง
OH of Starch	3,400 - 3,500	3,429
-COO ⁻	1,550 - 1,650	1,589
-COO ⁻ , COOH	1,400 - 1,450	1,400
COH of Starch	1,000 - 1,100	1,031
OH of Kaolinite	913	913 [1]
OH of Starch	400 – 550	(524 , 453) [1]

จากการตรวจสอบอินฟราเรดสเปกตรัมของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากปฏิกิริยาการกราฟต์พบว่า มีพีคอยู่ที่ $3,429 \text{ cm}^{-1}$ และที่ $1,589 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพีคของหมู่ OH ของแป้งมัน และหมู่ -COO⁻ ที่อยู่ในกราฟต์โพลิเมอร์ตามลำดับ และพบว่า มีพีคอยู่ที่ 913 cm^{-1} และที่ $1,031 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพีคของหมู่ OH ในดินขาว และพีคของหมู่ COH ที่อยู่ในแป้งมัน ตามลำดับ และพบว่า มีพีคอยู่ที่ 524 cm^{-1} และที่ 453 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของหมู่ OH ที่อยู่ในแป้งมัน โดยพีคจะมีขนาดเล็ก

นอกจากนี้ยังมีพีคใหม่อยู่ที่ $1,400\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพีคของหมู่ $-\text{CO}_2^-$ เพราะเกิดปฏิกิริยาโคโพลิเมอไรเซชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างหมู่ OH ที่อยู่ในดินขาวและแป้งมันกับหมู่ CONH_2 ที่อยู่บนสายโซ่อะครายลาไมด์ ซึ่งส่งผลทำให้เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายและส่วนที่ดูดซับน้ำขึ้น โดย Fanta และคณะ [26, 27] ได้เสนอกลไกของการเกิด crosslink ว่า วงโมเลกุลของแป้งมันเปิดออกและเกิดหมู่ $-\text{CHO}$ กับหมู่ $-\text{COH}$ โดยตัวริเริ่ม แล้วปฏิกิริยาการโคโพลิเมอไรเซชันระหว่างหมู่ $-\text{COH}$ บนแป้งมันกับ $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CO} - \text{NH}_2$ จะเกิดตามมา โดยมีการเชื่อมสายโซ่โพลิเมอร์ กับอนุภาคของดินขาว โครงร่างตาข่าย (net work) ก็จะเกิดขึ้นโดย crosslinker ($\text{N,N}'$ - Methylene - bis - acrylamide)

วัสดุผสมเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาการกราฟที่ระหว่างอนุภาคดินขาว, แป้งมัน และอะครายลาไมด์ โดยเชื่อกันว่ามีความเป็นไปได้ 3 ทางที่อนุภาคของดินขาวจะเข้าไปอยู่ในวัสดุผสมได้ อย่างแรกคือ อนุภาคดินขาวทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อสร้างพันธะเคมีกับโพลิเมอร์ (ตำแหน่ง A ในภาพที่ 5-1) โดยวิธีนี้โครงสร้างของโครงตาข่ายและการดูดซับน้ำของวัสดุผสมจะเปลี่ยนไป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณดินขาวในวัสดุผสม ทางที่สองก็คือ อนุภาคดินขาวทำหน้าที่เป็นจุดปลายทางโดยเกิดพันธะกับโพลิเมอร์ (ตำแหน่ง B ในภาพที่ 5-1) โดยวิธีนี้โครงตาข่ายและการดูดซับน้ำของวัสดุผสมจะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง แม้ปริมาณดินขาวในวัสดุผสมจะเปลี่ยนไป



ภาพที่ 5-1 แสดงภาพสเกตช์ของการเกิด crosslink

ทางที่สามก็คือ อนุภาคดินขาวไปแทรกอยู่ในโครงตาข่ายของโพลิเมอร์ (ตำแหน่ง C ในภาพที่ 5-1) โดยวิธีนี้โครงตาข่ายและการดูดซับน้ำจะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงตามปริมาณดินขาวที่ใส่เข้าไปในวัสดุผสม อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการดูดซับน้ำของวัสดุผสมขึ้นกับปริมาณดินขาวที่ใส่เข้าไป จึงเป็นไปได้ว่าอนุภาคของดินขาวทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อ โดยการสร้างพันธะเคมีกับโพลิเมอร์ [28]

5.2 ผลการทดสอบความหนืดของโพลีอะครายลาไมด์

ค่าความหนืดเป็นตัวบ่งบอกคุณสมบัติของโพลีอะครายลาไมด์ได้ เพื่อให้แน่ใจว่าโพลีอะครายลาไมด์ที่นำมาใส่ในวัสดุผสมในแต่ละครั้งนั้นมีคุณสมบัติเดียวกันหรือไม่ จึงได้ทำการวัดค่าความหนืด โดยระยะ เวลาที่วัดได้ระหว่างจุดที่หนึ่งและจุดที่สองของเครื่องทดสอบความหนืดไม่ควรต่ำกว่า 200 วินาที [29] ซึ่งจากผลการทดสอบความหนืดของโพลีอะครายลาไมด์ในตารางที่ 4-3 พบว่าในการสังเคราะห์โพลีอะครายลาไมด์ทั้งหมด 4 ชุด มีระยะเวลาที่วัดได้ใกล้เคียงกัน เมื่อนำค่าเวลามาคำนวณหาความหนืดในตารางที่ 4-4 ของแต่ละชุดแล้ว พบว่าค่าความหนืดเฉลี่ยในแต่ละชุดมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่าโพลีอะครายลาไมด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในแต่ละครั้ง มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

5.3 ผลการทดสอบความสามารถการดูดซับความชื้นของวัสดุผสมที่ใช้เป็นสารเคลือบ

ผลของโพลีอะครายลาไมด์ต่อความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสม จากผลการทดสอบ ที่ 4.3.1 พบว่าเหล็กที่เคลือบด้วยวัสดุผสมที่มีโพลีอะครายลาไมด์กราฟที่อยู่กับแป้งมันจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุผสมที่มีแต่ดินขาวเพียงอย่างเดียว (ไม่มีโพลีอะครายลาไมด์ผสมอยู่) เพราะว่าโพลีอะครายลาไมด์ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสมได้ แต่จากการสังเกตผิวเคลือบ พบว่า ผิวเคลือบของวัสดุผสมที่มีโพลีอะครายลาไมด์ผสมอยู่มีการเปลี่ยนแปลงของสีเกิดขึ้น กล่าวคือ มีสีเป็นสีน้ำตาลแดงค่อนข้างดำ ในขณะที่วัสดุผสมที่ไม่มีโพลีอะครายลาไมด์ลงไป สียังคงเป็นสีน้ำตาลนวลอยู่ ซึ่งสาเหตุอาจเป็นเพราะว่าในขั้นตอนการเตรียม Cr(III) – thiourea – polyacrylamide ก่อนที่จะนำมาผสมกับดินขาวส่วนที่กราฟท์จะต้องมีการละลายโปตัสเซียมไดโครเมต, ไทโอยูเรีย และ โพลีอะครายลาไมด์ที่สังเคราะห์ได้ในกรดฟอร์มิก ซึ่งเมื่อเกิดการละลายแล้วจะเกิดการเปลี่ยนสีของโปตัสเซียมไดโครเมต จากสีส้มเป็นสีน้ำเงินเข้มของ Cr(III) ซึ่งเมื่อผสมกับดินขาวที่กราฟท์แล้วไปเคลือบบนผิวเหล็ก อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีเป็นค่อนข้างดำได้

ผลของปริมาณโพลีอะครายลาไมด์ต่อความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสม จากผลการทดสอบที่ 4.3.2 พบว่าเหล็กที่เคลือบด้วยวัสดุผสมที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม (1.76 %) มีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุผสมที่มีโพลีอะครายลาไมด์ 1.00 กรัม (3.47 %) และ 1.50 กรัม (5.11 %) เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ทำให้โพลีอะครายลาไมด์มีความสามารถดูดซับความชื้นได้ดีที่สุด เมื่อพิจารณาคุณภาพของผิวเคลือบ พบว่าผิวเคลือบมีลักษณะที่ค่อนข้างเรียบแต่สียังคงมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีที่ค่อนข้างดำอยู่ แต่สีดำน้อยกว่าวัสดุผสมที่มีโพลีอะครายลาไมด์ผสมอยู่ 1.00 กรัม (3.47 %) และ 1.50 กรัม (5.11 %) ตามลำดับ

ผลของปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตต่อความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสม จากผลการทดสอบที่ 4.3.3 พบว่าเหล็กที่เคลือบด้วยวัสดุผสมที่มีโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (3.53 %) มีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุผสมที่มีโปตัสเซียมไดโครเมต 0.00 กรัม (0.00 %), 0.25 กรัม (0.91 %), 0.50 กรัม (1.80 %) และ 1.50 กรัม (5.20 %) เนื่องจากโปตัสเซียมไดโครเมต มีผลต่อความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสมเช่นกัน แต่มีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับ ดินขาวและโพลิอะครายลาไมด์ โดยดูจากน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุผสมแต่ละอัตราส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของโปตัสเซียมไดโครเมต มีค่าที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาคุณภาพของผิวเคลือบพบว่า ผิวเคลือบมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน คือมีผิวเรียบ แต่สียังคงมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีที่ค่อนข้างดำ

ผลของปริมาณตัวริเริ่มต่อความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสม โดยตัวริเริ่มที่ใช้ คือ ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต พบว่าปริมาณของตัวริเริ่มมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาการกราฟท์ โคโพลีเมอไรเซชัน ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสม กล่าวคือ ถ้าปริมาณของตัวริเริ่มมีน้อย ปฏิกิริยาการกราฟท์โคโพลีเมอไรเซชันจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ[1] ทำให้ โครงร่างตาข่ายของวัสดุผสมนั้นเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสมมีค่าต่ำตามไปด้วย ในทางกลับกัน ถ้าปริมาณของตัวริเริ่มมีมาก ปฏิกิริยาการกราฟท์ โคโพลีเมอไรเซชันจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งไม่เป็นผลดี กล่าวคือ ทำให้ช่องว่างของโครงร่างตาข่ายของวัสดุผสมมีขนาดเล็กตามไปด้วย เป็นการยากที่จะให้โมเลกุลของน้ำแทรกซึมผ่านเข้าไปได้ ค่าความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสมจึงมีค่าต่ำลง ซึ่งจากผลการทดสอบที่ 4.3.4 พบว่า เหล็กที่เคลือบด้วยวัสดุผสมที่มีปริมาณตัวริเริ่ม 0.55 กรัม (1.93 %) มีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมากกว่าวัสดุผสมที่มีปริมาณตัวริเริ่ม 0.45 กรัม (1.59 %) และ 0.65 กรัม (2.29 %) เนื่องจากปริมาณตัวริเริ่ม 0.55 กรัม(1.93 %) เป็นปริมาณที่ทำให้ปฏิกิริยาการกราฟท์โคโพลีเมอไรเซชันเกิดขึ้นอย่างเหมาะสม ทำให้ช่องว่างของโครงร่างตาข่ายที่เกิดขึ้นในวัสดุผสมมีขนาดที่พอเหมาะ ซึ่งจะ ทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกซึมผ่านเข้าไปได้ง่าย จึงทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสมมีค่าสูง เมื่อพิจารณาคุณภาพของผิวเคลือบพบว่า ผิวเคลือบมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน

5.4 ผลจากการทดสอบความสามารถในการยึดติดและการบวมตัวของวัสดุผสม

สำหรับเคลือบผิวหลัก

จากผลการทดสอบที่ 4.4 พบว่า วัสดุผสมที่มีโพลีเอครายลาไมด์เป็นส่วนประกอบ จะมีความสามารถในการยึดติดที่ดีกว่าวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวหลักที่มีแต่ส่วนของดินขาวที่กราฟท์ได้เพียงอย่างเดียว เพราะว่าโพลีเอครายลาไมด์ เมื่อนำมาละลายในกรดฟอร์มิกแล้ว จะมีลักษณะที่เหนียว ซึ่งอาจจะเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่ช่วยให้ผิวเคลือบสามารถยึดติดกับแผ่นเหล็กได้ดี ในขณะที่ดินขาวมีประสิทธิภาพในการยึดติดที่ต่ำ โดยสังเกตจากความเหนียวของผิวเคลือบ ในขณะที่เคลือบ ซึ่งดินขาวมีความเหนียวน้อยกว่าโพลีเอครายลาไมด์ เมื่อผิวเคลือบแห้งสนิท ประสิทธิภาพในการยึดติดจึงต่ำกว่า แต่เมื่อมาเปรียบเทียบความสามารถในการยึดติดของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวหลักที่มีส่วนประกอบของโพลีเอครายลาไมด์ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน พบว่า ความสามารถในการยึดติดนั้นมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ดังนั้นโพลีเอครายลาไมด์มีส่วนช่วยให้ประสิทธิภาพในการยึดติดของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวหลักดีขึ้น และเมื่อมาเปรียบเทียบความสามารถในการยึดติดของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวหลัก ที่มีส่วนประกอบของโปดัสเซียม - ไดโครเมตในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน พบว่า ประสิทธิภาพในการยึดติดไม่แตกต่างกันเลย ดังนั้น ปริมาณของโปดัสเซียมไดโครเมตจึงไม่มีผลต่อความสามารถในการยึดติดของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวหลักแต่อย่างใด

จากผลการทดสอบการบวมตัวของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวหลัก พบว่า จะมีการบวมตัวที่เห็นได้ชัดเจนในช่วงเวลา 30-40 นาทีแรกที่ทำการจุ่มแช่ โดยเปรียบเทียบกับส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำ เนื่องจากเป็นคุณสมบัติของดินขาวที่อยู่ในวัสดุผสม พบว่าดินขาวสามารถที่จะบวมตัวได้อย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 30 นาทีแรก[1] จากนั้นการบวมตัวจะเริ่มคงที่ กล่าวคือไม่ค่อยเกิดการเปลี่ยนแปลง และเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1-2 ชั่วโมงจะเริ่มมีวัสดุผสมบางส่วนหลุดออกมา โดยสังเกตจากสีของน้ำเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสีส้มแกมแดงในวัสดุผสมที่มีโปดัสเซียม - ไดโครเมตผสมอยู่ โดยเป็นส่วนของโปดัสเซียมไดโครเมตที่ละลายน้ำออกมา ซึ่งความเข้มข้นของสีจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของโปดัสเซียมไดโครเมตที่ผสมอยู่ในวัสดุผสมนั้น ในขณะที่วัสดุผสมอื่นที่ไม่มีโปดัสเซียมไดโครเมตผสมอยู่ ก็มีวัสดุผสมบางส่วนหลุดออกมาเช่นกัน แต่ในส่วน of วัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวหลักที่มีแต่ดินขาวเพียงอย่างเดียว พบว่า สีมีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกันหลังจากการจุ่มแช่ โดยเปลี่ยนเป็นสีคล้ำๆน้ำขุ่น ซึ่งเป็นสีของดินขาวที่ผสมอยู่ในผิวเคลือบ เนื่องจากดินขาวมีประสิทธิภาพในการยึดเกาะต่ำ

5.5 ผลการทดสอบการกัดกร่อนของเหล็กที่เคลือบด้วยวัสดุผสม

จากตารางที่ 4-36 จะเห็นว่าแผ่นเหล็กเปล่าที่ไม่ได้เคลือบสารใดเลย มีค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเกือบคงที่ แม้ว่าเวลาจะเปลี่ยนไป แสดงว่าความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กเป็นไปตามปกติ (ดูจากค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน) แต่อัตราการกัดกร่อนของเหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อทิ้งชิ้นงานเหล็กไว้ที่ความชื้น 85 % เป็นระยะเวลานานขึ้น

นอกจากนี้เมื่อเคลือบผิวเหล็กด้วยดินขาวที่กราฟท์กับแป้งมันและอะครายลาไมด์ จะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ลดลงจากค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนของเหล็กเปล่าที่ไม่มีการเคลือบ แสดงว่าดินขาวที่กราฟท์กับแป้งมันและอะครายลาไมด์ช่วยดูดซับความชื้น และทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กลดลงในสถานะที่ผิวเคลือบมีการดูดซับความชื้นไว้ อย่างไรก็ตาม การดูดซับความชื้นนี้ไม่ทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปมากนัก เมื่อทิ้งไว้ที่สถานะความชื้น 85 % เป็นระยะเวลานานขึ้น รวมทั้งอัตราการกัดกร่อนก็ไม่เพิ่มขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าผิวเคลือบนี้ช่วยให้เกิดการปกป้องผิวหน้าของเหล็ก ทำให้อัตราการกัดกร่อนน้อยกว่าอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเปล่าเกือบครึ่งต่อครึ่งในเวลาที่เท่ากัน ทั้งนี้น่าจะเป็นผลจากการกัดกร่อนของเหล็กในระยะแรก ทำให้เกิดออกไซด์ที่ช่วยหน่วงการกัดกร่อนของเหล็กลงไปได้

เมื่อศึกษาผลของโปตัสเซียมไดโครเมตในวัสดุผสมที่เคลือบผิว จะเห็นว่าปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนของเหล็กลดลง เนื่องจากศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนมีค่าลดลง อันเป็นผลมาจากการที่โปตัสเซียมไดโครเมตเป็นสารหน่วงการกัดกร่อนชนิดแคโทดิก (Cathodic inhibitor) [30] ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของโลหะลดลง นอกจากนี้จะเห็นว่าวัสดุผสมที่มีโปตัสเซียมไดโครเมต 1.00 กรัม (3.53 %) มีค่าอัตราการกัดกร่อนต่ำกว่าผิวเคลือบที่เป็นดินขาวกราฟท์กับแป้งมันและอะครายลาไมด์ แต่กระนั้นก็ตาม เมื่อทิ้งระยะเวลาให้นานขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนกลับมีค่าลดต่ำลงไปอีก แสดงให้เห็นว่าโปตัสเซียมไดโครเมตค่อยๆ ให้ผลอย่างช้าๆ ในการหน่วงการกัดกร่อน โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าอัตราการกัดกร่อนของชิ้นงานที่มีโปตัสเซียมไดโครเมต ไม่ว่าจะเป็นปริมาณเท่าใด จะมีการเพิ่มขึ้นน้อยมากหลังจากผ่านช่วงเวลา 20 วันไปแล้ว (จากการคำนวณดูพบว่า เมื่อทิ้งระยะเวลาเป็น 30 วัน อัตราการกัดกร่อนเพิ่มจากอัตราการกัดกร่อนเมื่อทำการวัดที่เวลา 20 วันไม่เกิน 8.00 % แต่เหล็กเปล่ามีอัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น 32.20 % เมื่อคำนวณจากที่เวลา 30 วันเทียบกับที่เวลา 20 วัน)

เมื่อศึกษาผลของโพลีอะครายลาไมด์ในวัสดุผสมที่เคลือบผิว จะพบว่า ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนลดลง เมื่อลดปริมาณโพลีอะครายลาไมด์ ซึ่งชี้ว่าความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานลดลงไป เมื่อมีโพลีอะครายลาไมด์ลดต่ำลง ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองการดูดซับความชื้นที่ว่า

ยังมีการเติมโพลิอะครายลาไมด์มาก การดูดซับความชื้นของโพลิอะครายลาไมด์ก็มีน้อยลง แสดงว่า ถ้าโพลิอะครายลาไมด์มีการดูดซับความชื้นได้ดี จะช่วยให้เกิดการกักกร่อนได้ดี แต่เมื่อเกิดการกักกร่อนเกิดขึ้นแล้ว อัตราการกักกร่อนของผิวเหล็กที่ถูกเคลือบไว้มีค่าน้อยสำหรับชิ้นงาน ที่ดูดซับความชื้นได้ดี หรือมีปริมาณโพลิอะครายลาไมด์น้อย น่าจะทำให้โปดัสเซียมไดโครเมต แสดงอิทธิพลต่อการหน่วงการกักกร่อนได้ดี

ยิ่งทิ้งไว้นานวันขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้ากักกร่อนของชิ้นงานที่มีโพลิอะครายลาไมด์เป็นส่วนผสม ในแต่ละปริมาณมีแนวโน้มที่เปลี่ยนไปเล็กน้อย แสดงว่าโพลิอะครายลาไมด์ไม่ได้มีบทบาทมากนัก ในการหน่วงการกักกร่อน โดยสังเกตได้จากอัตราการกักกร่อนที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อทิ้ง ระยะเวลาให้นานขึ้น

5.6 ผลการตรวจพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบและทดสอบการกักกร่อนแล้ว

จากภาพพื้นผิวของเหล็กเปล่าที่ไม่มีการเคลือบ (ภาพที่4-43 ถึงภาพที่4-46) จะเห็นว่ามีส่วน เกิดขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความต้านทานการกักกร่อนโดยเทคนิค โพเทนชิโอไดนามิกส์

ส่วนภาพที่ 4-47, ภาพที่ 4-51 และภาพที่ 4-55 ซึ่งเป็นภาพพื้นผิวเหล็กที่ผ่านการเคลือบ ดินขาวที่กราฟท์กับแป้งมันและอะครายลาไมด์เป็นระยะเวลา 20 วัน, 35 วัน และ 50 วัน ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าการกักกร่อนของผิวเหล็กไม่แตกต่างกันมากนัก สอดคล้องกับผลการทดสอบการ กักกร่อนที่ว่าศักย์ไฟฟ้ากักกร่อนไม่แตกต่างกันมากนัก และอัตราการกักกร่อนของชิ้นงานมีค่า ที่ใกล้เคียงกัน โดยผิวเคลือบดินขาวที่กราฟท์กับแป้งมันและอะครายลาไมด์ สามารถดูดซับ ความชื้นได้ระดับหนึ่ง จึงมีผลให้เกิดการกักกร่อนในชั้นเริ่มต้นแล้วเกิดการปกป้องขึ้น ทำให้อัตรา การกักกร่อนมีค่าน้อยกว่าอัตราการกักกร่อนของเหล็กเปล่า แต่เมื่อมีการเติมโพลิอะครายลาไมด์, โปดัสเซียมไดโครเมต และตัวริเริ่มปฏิกิริยาการกราฟท์โคโพลิเมอร์ของดินขาวกับแป้งมัน และ อะครายลาไมด์ในปริมาณที่ต่างกันไปแล้ว สภาพพื้นผิวของชิ้นงานเหล็กที่ผ่านการทดสอบการ กักกร่อน จะมีสภาพการกักกร่อนที่แตกต่างกันไป โดยพื้นผิวที่มีสภาพการกักกร่อนน้อย มีปริมาณ โพลิอะครายลาไมด์ 0.50 กรัม(1.76 %) (ภาพที่4-48, ภาพที่4-52 และภาพที่4-56) ส่วน โปดัสเซียมไดโครเมต ปริมาณที่มีผลให้มีการกักกร่อนน้อยที่สุด เมื่อดูจากผิวชิ้นงานเหล็กทดสอบ คือ 1.00 กรัม (3.53 %) (ภาพที่4-49, ภาพที่4-53 และภาพที่ 4-57) และสำหรับตัวริเริ่มของปฏิกิริยา การกราฟท์ที่เหมาะสม อยู่ที่ปริมาณ 0.55 กรัม(1.93 %) (ภาพที่4-50, ภาพที่4-54 และภาพที่ 4-58)

ผลทั้งหมดจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ Olympus BX 60M สอดคล้องกับผลจาก การทดสอบเพื่อหาอัตราการกักกร่อนโดยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิกส์

5.7 ผลของดินขาวที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก

ดินขาวมีสูตรทางเคมี คือ $\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$ หรือ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ โดยผลึกที่บริสุทธิ์จะมี ส่วนประกอบทางเคมีเป็น 39.80 % Al_2O_3 , 46.30 % SiO_2 และ 13.90 % H_2O มีกระบวนการเกิด ดินขาว (Kaolinization) มีขั้นตอนของปฏิกิริยาต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 5-2 แสดงขั้นตอนของกระบวนการเกิดดินขาว [31]

ขั้นตอนที่ 1.	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{H}_2\text{O} + \text{HAlSi}_3\text{O}_8 + \text{KOH}$ (hydrolysis)
ขั้นตอนที่ 2.	$\text{HAlSi}_3\text{O}_8 + \text{HAlSiO}_4 + 2\text{SiO}_2$ (desilication)
ขั้นตอนที่ 3.	$2\text{HAlSiO}_4 + \text{H}_2\text{O} + (\text{OH})_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ (hydration)
ขั้นตอนที่ 4.	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8 = \text{potash feldspar}$
ขั้นตอนที่ 5.	$\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4 = \text{kaolin}$

ดินขาวมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดี จากการทดลองพบว่าปริมาณของดินขาว มีผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสมเช่นกัน กล่าวคือ ถ้าปริมาณของ ดินขาวมีปริมาณที่เหมาะสม จะทำให้สามารถดูดซับความชื้นได้ดี โดยอธิบายได้ว่า ถ้าให้อนุภาค ของดินขาวเป็นจุด Crosslink หนึ่งที่อยู่ในวัสดุผสม เมื่อปริมาณของดินขาวมีค่าที่เหมาะสม และ มีช่องว่างโครงร่างตาข่ายของวัสดุผสมที่ไม่เปลี่ยนแปลง จะทำให้ความสามารถในการดูดซับ ความชื้นมีค่าคงที่ [1] จากการทดลองสามารถพิจารณาได้จากภาพที่ 4-2 (ข) แต่ถ้าดินขาวมี ปริมาณมาก จะทำให้วัสดุผสมมีความหนาแน่นของ Crosslink ที่สูง คือ จะเกิดการฟอร์มตัวของ โครงร่างตาข่าย ทำให้การซึมผ่านของน้ำที่จะเข้าไปในโครงร่างตาข่ายของวัสดุผสมเป็นไปได้ยาก จึงส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นมีค่าลดลง

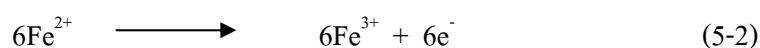
5.8 ผลของโปตัสเซียมไดโครเมตที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก

ตารางที่ 5-3 สรุปผลของโปตัสเซียมไดโครเมตในวัสดุผสมที่เคลือบผิวเหล็ก
ต่อการดูดซับความชื้นและการกัดกร่อน

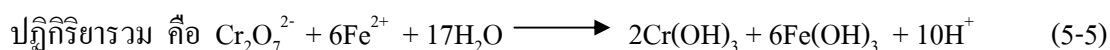
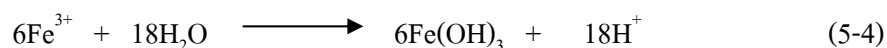
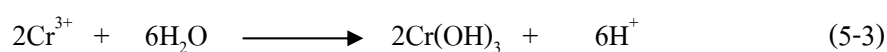
โปตัสเซียมไดโครเมต	การดูดซับความชื้น	ความต้านทานการกัดกร่อน	อัตราการกัดกร่อน
ปริมาณมาก ปริมาณน้อย	มีประสิทธิภาพดี มีประสิทธิภาพไม่ดี	มีความต้านทานต่ำ(ไม่ดี) มีความต้านทานสูง(ดี)	ต่ำ (ดี) สูง (ไม่ดี)

จากผลการทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้น, ความต้านทานการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของวัสดุผสมที่เคลือบบนชิ้นงาน สามารถแสดงผลของโปตัสเซียมไดโครเมตได้ดังตารางที่ 5-3 ซึ่งสามารถให้เหตุผลที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

โปตัสเซียมไดโครเมต มีผลในการยับยั้งหรือการหน่วงปฏิกิริยา Pit Nucleation แต่ถ้าหากมีการกัดกร่อนแบบรูเข็มเกิดขึ้น มันจะมีผลที่จะไปกระตุ้นให้เกิดการขยายตัวของรูเข็ม (Pit growth) ซึ่งสามารถที่จะอธิบายได้จากผลของ pH ภายในรูเข็ม กล่าวคือ โปตัสเซียมไดโครเมตจะเป็นตัวทำให้ค่า pH มีค่าลดลง เนื่องจากปฏิกิริยา Hydrolysis ของ Fe^{3+} และ Cr^{3+} ซึ่งเป็นผลของปฏิกิริยา Oxido – Reducing ระหว่าง $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ และ Fe^{2+} ions โดยปฏิกิริยา Oxido – Reducing เป็นไปตามสมการต่อไปนี้ [32]



ต่อมาปฏิกิริยา Hydrolysis ของ Fe^{3+} และ Cr^{3+} จะเกิดขึ้นทันทีทันใด ในขณะที่การ Hydrolysis ของ Cr^{3+} ions จะมีบทบาทที่สำคัญมากในการลดค่าของ pH คือ



จากผลลัพธ์ข้างบนจะเห็นได้ว่า ค่า pH จะลดลงอันเป็นผลของการเกิด H^+ เมื่อสารละลายมีส่วนของไดโครเมตไอออนผสมอยู่ จึงทำให้การเติบโตหรือการแผ่ขยายของการกัดกร่อนแบบรูเข็มเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งจากการศึกษาพบว่าโครเมตหรือไดโครเมต เป็นตัวยับยั้งการกัดกร่อนที่อันตราย เพราะว่ามันอาจจะไปกระตุ้นให้เกิดการกัดกร่อนได้ เมื่อค่าความเข้มข้นของมันมีค่าต่ำพอ จะนำไปสู่การเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มของเหล็กกล้าคาร์บอนได้ [32]

ดังนั้นเมื่อดูค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนจะเห็นได้ว่า ถ้าโปตัสเซียมไดโครเมตมีปริมาณมาก จะทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานโลหะไม่ดี เนื่องจากโปตัสเซียมไดโครเมตจะไปช่วยเร่งให้การกัดกร่อนแผ่ขยายตัวออกไปได้มาก แต่ถ้าใช้โปตัสเซียมไดโครเมตในปริมาณน้อย จะทำให้ความต้านทานการกัดกร่อนของชิ้นงานโลหะดี

ถ้าพิจารณาในแง่ของอัตราการกัดกร่อน การที่มีปริมาณโปตัสเซียมไดโครเมตมาก จะช่วยในการยับยั้งหรือการหน่วงปฏิกิริยา Pit Nucleation ทำให้ค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าต่ำ

และถ้าพิจารณาในแง่ของความสามารถในการดูความชื้น โปตัสเซียมไดโครเมตที่มีปริมาณมาก จะส่งผลทำให้ดูความชื้นได้ดี เนื่องจากโปตัสเซียมไดโครเมตมีคุณสมบัติทำให้ค่า pH ลดลง (จากสมการสุดท้าย) ส่งผลให้เกิดการเร่งการแตกตัวของโครเมตไอออนที่อยู่ในวัสดุผสม ซึ่งจะทำให้วัสดุผสมนี้มีสมบัติเป็นไฮโดรฟิลิก กล่าวคือ เป็นไอออนหรือสารที่มีแนวโน้มสูงในการรวมตัวกับน้ำ [33]

5.9 ผลของโพลิอะครายลาไมด์ที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก

ตารางที่ 5-4 สรุปผลของโพลิอะครายลาไมด์ในวัสดุผสมที่เคลือบผิวเหล็ก

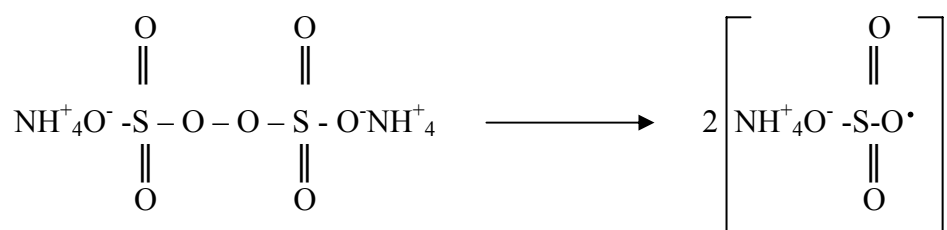
ต่อการดูความชื้น และการกัดกร่อน

โพลิอะครายลาไมด์	การดูความชื้น	ความต้านทานการกัดกร่อน	อัตราการกัดกร่อน
ปริมาณมาก	มีประสิทธิภาพไม่ดี	มีความต้านทานสูง(ดี)	สูง (ไม่ดี)
ปริมาณน้อย	มีประสิทธิภาพดี	มีความต้านทานต่ำ(ไม่ดี)	ต่ำ (ดี)

จากผลการทดสอบความสามารถในการดูความชื้น, ความต้านทานการกัดกร่อนและอัตราการกัดกร่อนของวัสดุผสมที่เคลือบบนชิ้นงาน สามารถแสดงผลของโพลิอะครายลาไมด์ได้ดังตารางที่ 5-4 ซึ่งสามารถให้เหตุผลที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

โพลีอะครายลาไมด์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว โดยมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาของโพลีอะครายลาไมด์ ดังนี้ [34]

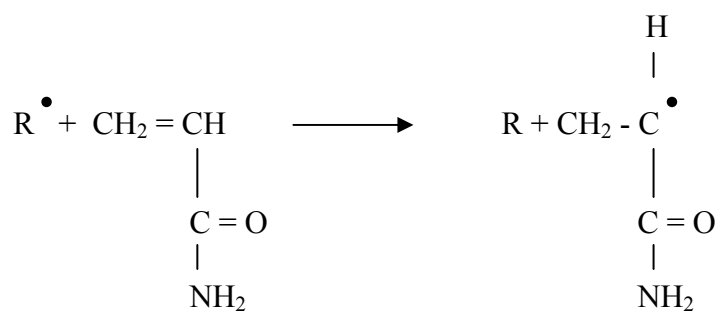
ปฏิกิริยาเริ่มต้น >>>



ตัวริเริ่ม

(แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต)

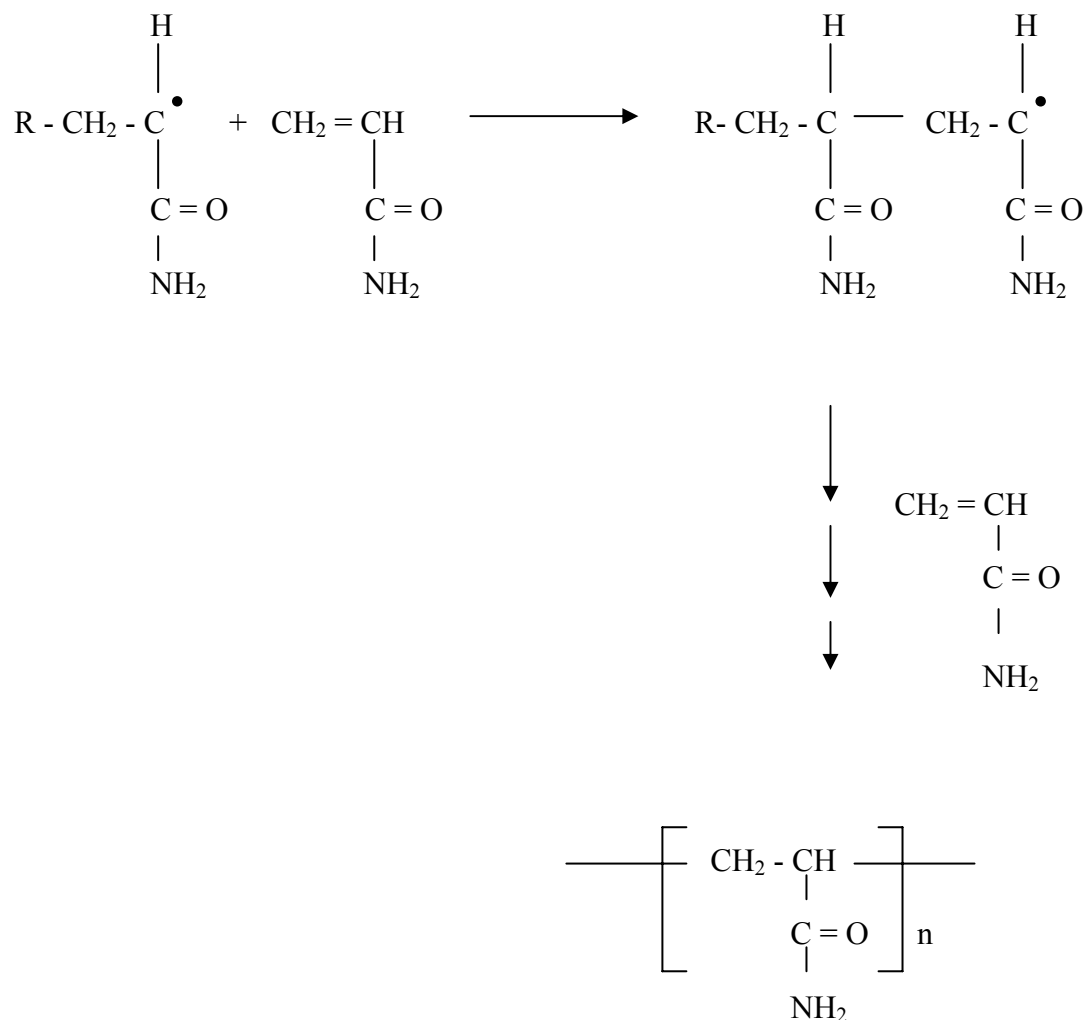
(free radical , $\text{R}^\bullet$)



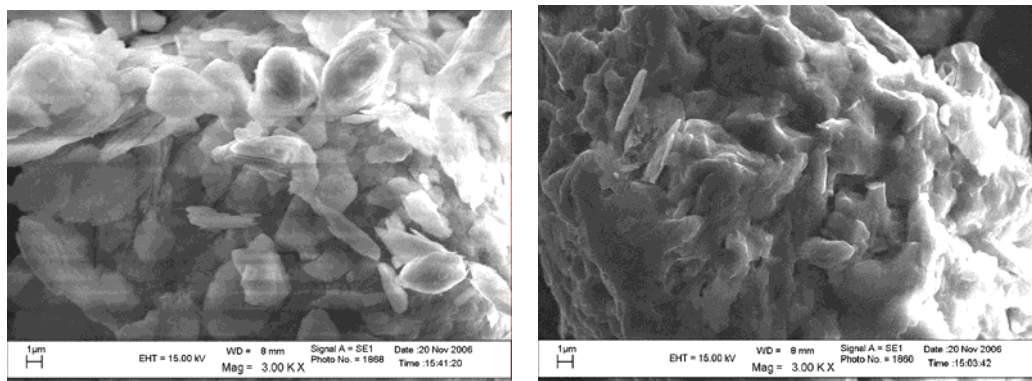
(free radical) (acrylamide monomer)

(growing chain)

ปฏิกิริยาดำเนินไป >>>



โพลีอะครายลาไมด์มีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดี แต่เนื่องจากความสามารถในการดูดซับความชื้นและการละลายของโพลีเมอร์ ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างของโพลีเมอร์ ถ้าโพลีเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูง มีโครงสร้างที่หนาแน่นหรือมีปริมาณที่ไม่เหมาะสม ก็จะส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นมีประสิทธิภาพต่ำลง และการที่มีปริมาณของโพลีอะครายลาไมด์ที่ไม่เหมาะสม จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับความชื้นต่ำลง อาจเป็นเพราะว่า ถ้าปริมาณของโพลีอะครายลาไมด์มีมากเกินไป จะทำให้เป็นการปิดกั้นช่องว่างที่เกิดขึ้นในเนื้อดินขาว ทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกซึมผ่านเข้าไปในโครงร่างตาข่าย (Network) นั้นได้ยาก เนื่องจากมีช่องว่างน้อยลง โดยดูได้จากภาพถ่ายที่ได้จากการส่องด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) กำลังขยาย 3,000 เท่า ซึ่งได้ผลดังนี้



(ก)

(ข)

ภาพที่ 5-2 แสดงภาพถ่ายที่ได้จากเครื่อง Scanning Electron Microscope (กำลังขยาย 3,000 เท่า)

(ก) ดินขาว(kaolinite) และ(ข) ดินขาวที่มีโพธิ์อะครายลาไมด์ผสมอยู่ 1.50 กรัม(5.11 %)

จะเห็นได้ว่าดินขาวที่มีปริมาณโพธิ์อะครายลาไมด์มากเกินไป จะส่งผลทำให้ช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างเนื้อดินขาวมีปริมาณน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับดินขาวที่เป็นสารตั้งต้น จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นนั้นมีประสิทธิภาพต่ำ แม้ว่าโพธิ์อะครายลาไมด์เองสามารถดูดซับความชื้นได้ แต่จะไม่มากเท่าดินขาว [1,6] ในทางตรงข้าม ถ้าปริมาณของโพธิ์อะครายลาไมด์น้อย จะส่งผลทำให้มีการช่วยดูดความชื้นในโครงร่างตาข่ายได้ ทำให้โมเลกุลของน้ำที่จะถูกดูดมีปริมาณสูงขึ้น

ส่วนในแง่ของศักย์ไฟฟ้ากัฏกร่อน ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความต้านทานการกัฏกร่อนและค่าอัตราการกัฏกร่อน พบว่า ถ้าปริมาณของโพธิ์อะครายลาไมด์มีปริมาณน้อย จะทำให้ค่าความต้านทานการกัฏกร่อนมีค่าต่ำ เนื่องจากความชื้นที่ถูกดูดเข้าไป ทำให้ผิวเคลือบที่มีโพธิ์อะครายลาไมด์น้อยเกิดการบวมตัวได้ [35] จึงส่งผลทำให้เกิดกระบวนการการกัฏกร่อนที่บริเวณนั้นได้ ในทางกลับกัน ถ้ามีปริมาณของโพธิ์อะครายลาไมด์มาก จะทำให้ความชื้นที่ถูกดูดซับเข้าไปยังผิวเคลือบมีปริมาณน้อย ซึ่งจะทำให้เกิดการบวมตัวของผิวเคลือบได้ยาก ซึ่งจะไม่นำไปสู่การเร่งให้เกิดการกัฏกร่อน ทำให้ค่าความต้านทานการกัฏกร่อนมีค่าสูง

ในแง่ของอัตราการกัฏกร่อน พบว่า ถ้าปริมาณของโพธิ์อะครายลาไมด์มีปริมาณที่น้อย จะทำให้ค่าอัตราการกัฏกร่อนมีค่าต่ำ เนื่องจากคุณสมบัติการดูดซับความชื้นของโพธิ์อะครายลาไมด์มีผลต่อค่าอัตราการกัฏกร่อน กล่าวคือ ปริมาณของโพธิ์อะครายลาไมด์ที่น้อย

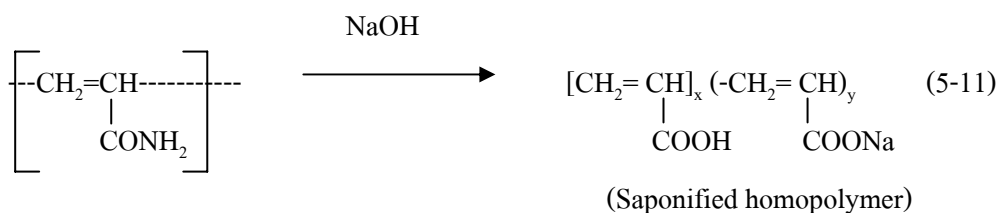
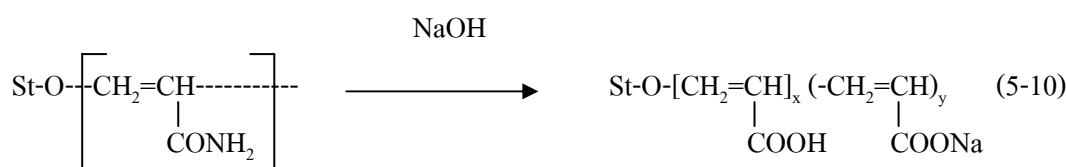
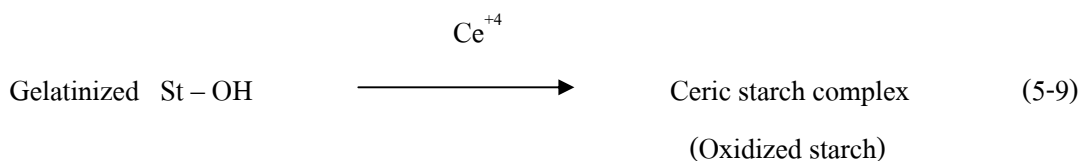
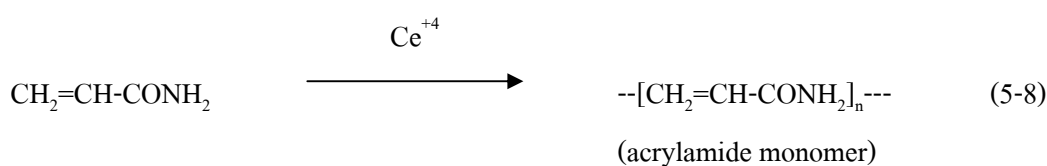
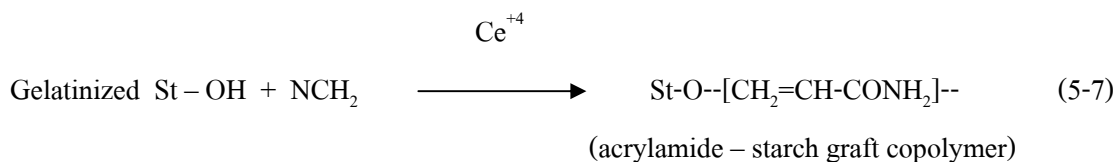
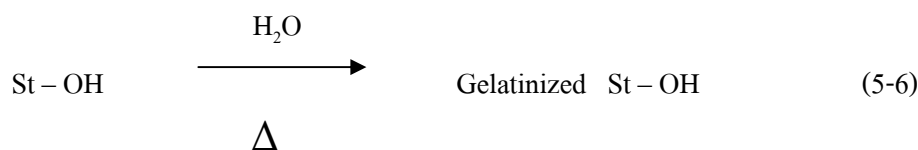
จะทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นดีกว่าเมื่อมีปริมาณของโพลีอะครายลาไมด์มาก และการดูดซับความชื้นที่ดีของโพลีอะครายลาไมด์จะช่วยให้เกิดการกักตร่อนได้ดี แต่เมื่อการกักตร่อนเกิดขึ้นแล้ว อัตราการกักตร่อนของพื้นผิวหลักที่ถูกเคลือบไว้จะมีค่าน้อย โปดัสเซียมไดโครเมตที่มีอยู่อย่างเหมาะสม จะช่วยยับยั้งการกักตร่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จึงสรุปได้ว่า เหล็กที่เคลือบด้วยวัสดุผสมที่มีทั้งปริมาณของโปดัสเซียมไดโครเมตและโพลีอะครายลาไมด์ในปริมาณที่เหมาะสม จะช่วยในการยับยั้งหรือหน่วงการเกิดการกักตร่อนของเหล็กจากความชื้นภายนอกได้โดยวัสดุผสมเคลือบผิว ซึ่งเป็นผลมาจาก Cr (III) ที่ผสมอยู่ในวัสดุผสมเคลือบผิว อันเกิดจากการรีดิวซ์ของโปดัสเซียมไดโครเมตโดยไทโอยูเรีย เนื่องจากเป็นที่รู้กันว่า Cr (III) เมื่อรวมตัวกับออกซิเจนในสิ่งแวดล้อมจะสามารถเกิดเป็นโครเมียมออกไซด์ได้ ที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการปกป้องผิวเคลือบได้ [23]

5.10 ผลของตัวริเริ่มที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของวัสดุผสมสำหรับเคลือบผิวเหล็ก

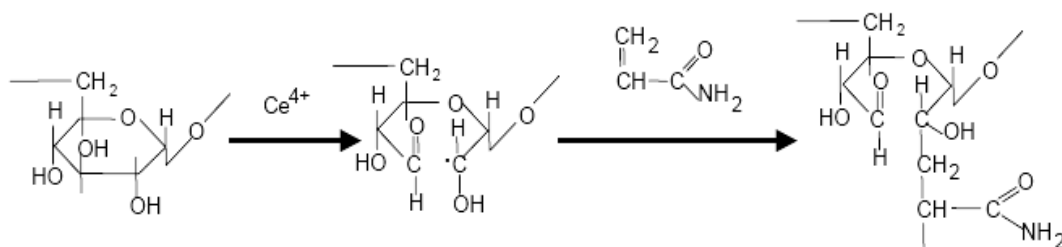
จากผลการทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้น สามารถให้เหตุผลที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

ตัวริเริ่มที่ใช้คือ ซีริกแอมโมเนียมไนเตรต หรือ CAN มีสูตรทางเคมีคือ $(\text{NH}_4)_2\text{Ce}(\text{NO}_3)_6$ โดยมีคุณสมบัติและโครงสร้างเป็นเกลือ [36] การใช้ซีริกแอมโมเนียมไนเตรตเป็นตัวริเริ่มกระบวนการกราฟท์ เพราะเป็นตัวทำให้เกิดฟรีแรดิคัลในการกราฟท์พวกวินิลโมโนเมอร์ ลงบน polyol ที่แตกต่างกัน โดยผ่านกลไกการส่งถ่ายอิเล็กตรอนตัวเดียว ทำให้เกิดฟรีแรดิคัลที่ backbone ของตัวโพลิเมอร์ เกิดเป็นโคโพลิเมอร์จากการกราฟท์ที่แน่นอน (pure graft copolymer) และง่ายต่อการประยุกต์ใช้ที่อุณหภูมิปกติ ในตัวกลางที่เป็นสารละลาย [37] โดยกลไกของตัวริเริ่มในปฏิกิริยาการกราฟท์น่าจะคล้ายคลึงกับปฏิกิริยาการกราฟท์แบ่งและอะซิโตไนโตรล [38] ดังนี้ คือ



จากกลไกในปฏิกิริยาการกราฟท์ข้างต้นพบว่า ความเข้มข้นของซีริกแอมโมเนียมไนเตรด มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกราฟท์ของผลิตภัณฑ์ โดย McCormic และคณะ [39] เสนอว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นโดยซีริกแอมโมเนียมไนเตรดนั้น เป็นกระบวนการที่ซีริกไอออนทำให้เกิดการเริ่มต้น โพลีเมอไรซ์แบบรีดอกซ์ โดยซีริกไอออนทำให้เกิดตำแหน่งที่เป็นฟรีเรดิคัลบน backbone ของ

โพลีแซคคาไรด์ ดังนั้นจึงกันไม่ให้เกิดโฮโมโพลีเมอร์ของโพลีอะครายลาไมด์ กลไกของปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเกิด chelate complex ซึ่งเมื่อสลายตัวไปแล้วทำให้เกิดตำแหน่งที่เป็นฟรีแรดิคอล ซึ่งฟรีแรดิคอลเหล่านี้ทำให้เกิดการขยายออกของสายโซ่โพลีอะครายลาไมด์ เมื่อมีโมโนเมอร์อยู่ด้วย จำนวนเฉลี่ยของจุดเชื่อมต่อ (grafting sites) ต่อโมเลกุลที่เป็น backbone ขึ้นกับอัตราส่วนความเข้มข้นของซีริกไอออนต่อโพลีแซคคาไรด์



ภาพที่ 5-3 แสดงกลไกการเร่งปฏิกิริยากราฟท์โคโพลีเมอร์เซชันของโพลีแซคคาไรด์ (Dextran) กับอะครายลาไมด์โมโนเมอร์ โดยซีริกไอออน

ดังนั้นจากการทดลอง เปอร์เซนต์การกราฟท์จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวริเริ่มมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการเพิ่มขึ้นของฟรีแรดิคอลที่อยู่บนแป้งมันและโมเลกุลของอะครายลาไมด์ที่มีการเติมตัวริเริ่มการกราฟท์ลงไป กล่าวคือ ซีริกแอมโมเนียมไนเตรตได้เข้าไปสัมผัสกับหมู่ NH_2 ของอะครายลาไมด์ได้โดยตรง ซึ่งจะทำให้มีการผลิตเป็นฟรีแรดิคอลเกิดขึ้นนำไปสู่การเริ่มกระบวนการกราฟท์โคโพลีเมอร์เซชัน [7] ซึ่งพฤติกรรมของฟรีแรดิคอลเหล่านี้จะทำให้เกิดการเริ่มต้นของสายโซ่การกราฟท์ที่ปรากฏอยู่ในอะครายลาไมด์โมโนเมอร์แผ่ขยายออกไป โดยสังเกตได้ว่าสายโซ่อะครายลาไมด์ขยายได้เพียงเล็กน้อยที่ตัวริเริ่มมีค่าความเข้มข้นต่ำๆ ซึ่งจะส่งผลทำให้เปอร์เซนต์การกราฟท์มีค่าต่ำลงเช่นกัน ในขณะเดียวกัน ถ้าตัวริเริ่มมีค่าความเข้มข้นมากจนเกินไป จะทำให้เปอร์เซนต์การกราฟท์มีค่าต่ำลงได้เช่นเดียวกัน (โดยความสัมพันธ์ของตัวริเริ่มที่มีค่าความเข้มข้นสูงจนเกินไป จะทำให้มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการ Oxidative termination ของ Primary radical ซึ่งจะส่งผลทำให้ปฏิกิริยาการกราฟท์สิ้นสุดลงอย่างรวดเร็ว [40] ทำให้เปอร์เซนต์การกราฟท์มีค่าต่ำลง) โดย Athawale และคณะ [36] พบว่ามีความเข้มข้นสูงสุด (critical concentration) ของซีริกไอออนค่าหนึ่ง ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพ

การกราฟท์โคโพลิเอไธเรซชั้นมีค่ามากที่สุด กล่าวคือที่ความเข้มข้นน้อยๆ การเพิ่มประสิทธิภาพการกราฟท์ น่าจะเป็นผลจากการเพิ่มจำนวนตำแหน่งที่เกิดฟรีแรดิคอลบนสายโซ่ของโพลิแซคคาไรด์ เมื่อค่อยๆเพิ่มปริมาณซิริกไอออน แต่เมื่อความเข้มข้นของซิริกไอออนเกินกว่าค่าสูงสุดดังกล่าวนี้ ประสิทธิภาพการกราฟท์กลับลดลง ซึ่งอาจเนื่องมาจาก

1. การสิ้นสุดของกระบวนการกราฟท์โดยซิริกไอออนที่มากเกินไป
2. การสิ้นสุดของฟรีแรดิคอลที่เกิดขึ้นในขั้นเริ่มต้น เช่น ปฏิกิริยาของฟรีแรดิคอลบนโครงสร้างของโพลิแซคคาไรด์โดยซิริกไอออนที่มากเกินไป ไม่สามารถกระตุ้นกระบวนการโพลิเอไธเรซชั้นได้

จากผลการทดลองจะเห็นว่า เมื่อใช้ปริมาณตัวริเริ่ม (ซิริกแอมโมเนียมไนเตรต) 0.55 กรัม จะมีค่าการดูดซับความชื้นที่ดีที่สุด แสดงว่าปริมาณตัวริเริ่มมีผลต่อปฏิกิริยากราฟท์โคโพลิเอไธเรซชั้น ถ้าตัวริเริ่มมีปริมาณต่ำ จะทำให้ปฏิกิริยากราฟท์โคโพลิเอไธเรซชั้นเกิดขึ้นอย่างช้าๆ วัสดุผสมจะมีโครงร่างตาข่ายเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำลงไปด้วย ในขณะที่ปริมาณตัวริเริ่มที่มีมากเกินไป อาจทำให้ปฏิกิริยากราฟท์โคโพลิเอไธเรซชั้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่มีประสิทธิผลลดลง ส่งผลให้ช่องว่างของโครงร่างตาข่ายของวัสดุผสมมีขนาดเล็ก การดูดซับน้ำจึงมีได้น้อย

การค้นพบความสัมพันธ์ของปริมาณซิริกไอออนต่อประสิทธิภาพของการกราฟท์โคโพลิเอไธเรซชั้นจึงสอดคล้องกับผลการทดลอง ซึ่งพบว่าปริมาณตัวริเริ่มหรือซิริกแอมโมเนียมไนเตรต 0.55 กรัม ทำให้ได้วัสดุผสมที่มีความสามารถดูดซับความชื้นได้ดีกว่าปริมาณตัวริเริ่ม 0.45 กรัม และ 0.65 กรัม นอกจากนี้การที่ซิริกไอออนที่เหมาะสม ช่วยให้ประสิทธิภาพการกราฟท์เกิดขึ้นได้ดี ส่งผลให้เกิดการดูดซับความชื้นได้ดี เป็นผลให้โพลีแซคคาไรด์ที่ผสมอยู่ในโพลิเอไธเรซลาไมด์ สามารถทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน โดยสามารถดูได้จากภาพพื้นผิวหลักที่ผ่านการเคลือบด้วยวัสดุผสมที่ใช้ซิริกแอมโมเนียมไนเตรตในปริมาณต่างๆกัน

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

6.1.1 ปริมาณของโพลียเอครายลาไมด์, โปดัสเซียมไดโครเมต, ตัวริเริ่ม (ซีริกแอมโมเนียม - ไนเตรต) และดินขาว มีผลต่อความสามารถในการดูดซับความชื้น, ความสามารถในการยืดยึด และการบวมตัว, ความต้านทานการกัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของวัสดุผสมสำหรับเคลือบพื้นผิวเหล็ก ที่จะนำไปเคลือบพื้นผิวเหล็กกล้าคาร์บอนแล้วทิ้งไว้ในสภาวะความชื้น 85 %

6.1.2 วัสดุผสมที่มีปริมาณโพลียเอครายลาไมด์เพิ่มมากขึ้น จะทำให้มีค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนสูง ซึ่งแสดงว่ามีความต้านทานการกัดกร่อนดี แต่อัตราการกัดกร่อนของเหล็กที่เคลือบวัสดุผสม มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมที่มีปริมาณโพลียเอครายลาไมด์น้อย ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับความชื้นที่ดีกว่า และอัตราการกัดกร่อนมีค่าต่ำกว่า จึงทำให้มีความสามารถในการหน่วงการกัดกร่อนได้ดีกว่า แม้ว่าจะมีค่าความต้านทานการกัดกร่อนน้อยกว่าก็ตาม โดยดูจากลักษณะของพื้นผิวเหล็กที่เคลือบวัสดุผสม ที่มีร่องรอยการเกิดการกัดกร่อนที่น้อยกว่า ไม่ว่าจะทิ้งไว้ในสภาวะความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน, 35 วัน หรือ 50 วันก็ตาม โดยปริมาณของโพลียเอครายลาไมด์ที่ทำให้วัสดุผสมมีประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 0.50 กรัม (คิดเป็น 1.76 %)

6.1.3 วัสดุผสมที่มีปริมาณโปดัสเซียมไดโครเมตเพิ่มมากขึ้น จะทำให้มีค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนต่ำ ซึ่งเป็นพฤติกรรมของโปดัสเซียมไดโครเมต ในขณะที่อัตราการกัดกร่อนของเหล็กที่เคลือบวัสดุผสม มีแนวโน้มที่ต่ำลง และมีความสามารถในการดูดซับความชื้นที่ดี ซึ่งถือว่าเป็นผลดีเนื่องจากมีความสามารถในการหน่วงการกัดกร่อนได้ดี (เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุผสมที่มีปริมาณโปดัสเซียมไดโครเมตต่ำ ซึ่งมีความต้านทานการกัดกร่อนสูง แต่ความสามารถในการหน่วงการกัดกร่อนต่ำ จึงทำให้เมื่อเกิดการกัดกร่อนแล้ว จะแผ่ขยายได้อย่างรวดเร็ว) โดยสังเกตจากลักษณะของพื้นผิวเหล็กที่เคลือบวัสดุผสม หลังจากทิ้งไว้ในสภาวะความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน, 35 วัน หรือ 50 วัน พบว่า มีร่องรอยของการกัดกร่อนเกิดขึ้นมาก สำหรับเหล็กที่เคลือบด้วยวัสดุผสมที่มีปริมาณโปดัสเซียมไดโครเมตมาก โดยปริมาณของโปดัสเซียมไดโครเมตที่ทำให้วัสดุผสมมีประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 1.00 กรัม (คิดเป็น 3.53 %)

6.1.4 เมื่อวัสดุผสมมีปริมาณตัวริเริ่มที่เหมาะสม จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสมมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะช่วยเพิ่มความสามารถในการหน่วงการกักตรอนของวัสดุผสมได้ โดยปริมาณของตัวริเริ่มที่เหมาะสมที่ทำให้วัสดุผสมมีประสิทธิภาพดีที่สุดคือ 0.55 กรัม (คิดเป็น 1.93 %) เพราะจะทำให้มีความสามารถในการหน่วงการกักตรอนได้ดีที่สุด ซึ่งถ้าตัวริเริ่มมีปริมาณที่มากกว่าหรือน้อยกว่านี้ จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของวัสดุผสมในการหน่วงการกักตรอนลดต่ำลง โดยดูได้จากภาพพื้นผิวเหล็กหลังจากทิ้งไว้ในสภาวะความชื้น 85 % เป็นเวลา 20 วัน, 35 วัน หรือ 50 วันก็ตาม พบว่า พื้นผิวเหล็กเคลือบวัสดุผสมที่มีปริมาณตัวริเริ่มเป็น 0.55 กรัม มีร่องรอยการกักตรอนน้อยมาก

6.1.5 ปริมาณของดินขาวที่กราฟท์กับแป้งมันและอะครายลาไมด์ มีผลต่อความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสม ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของการหน่วงการกักตรอนของวัสดุผสมด้วย กล่าวคือ ความสามารถในการดูดซับความชื้นที่ดีของดินขาวที่กราฟท์กับแป้งมันและอะครายลาไมด์ จะทำให้อัตราการกักตรอนของเหล็กที่เคลือบด้วยวัสดุผสมมีค่าต่ำลง ซึ่งเป็นผลทำให้มีประสิทธิภาพในการหน่วงการกักตรอนที่ดี โดยปริมาณของดินขาวที่กราฟท์กับแป้งมันและอะครายลาไมด์ ที่ทำให้วัสดุผสมมีประสิทธิภาพในการดูดซับความชื้นและหน่วงการกักตรอนได้ดีที่สุดคือ 2.00 กรัม (คิดเป็น 7.06 %)

6.1.6 จากผลการทดลองสามารถทำเป็นตารางแสดงประสิทธิภาพทางด้านต่างๆของวัสดุผสมในแต่ละอัตราส่วน เพื่อให้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการที่จะประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ทางด้านการหน่วงการกักตรอนของโครงสร้างหรือชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนได้

6.2 ประโยชน์ของสารหน่วงการกักตรอนแบบดูดซับความชื้น

6.2.1 เป็นสารหน่วงการกักตรอนสำหรับเคลือบบนผิวเหล็ก สำหรับเหล็กที่ใช้งานอยู่ในสภาวะที่มีความชื้นสูง หรือมีความเสี่ยงต่อการถูกกักตรอน เช่น โครงสร้างเหล็กกล้าต่างๆ, อุปกรณ์ที่ใช้ในส่วนที่สัมผัสกับความชื้น รวมไปถึงชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล เป็นต้น

6.2.2 เป็นสารหน่วงการกักตรอนที่สามารถนำไปใช้งานได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก และเสียค่าใช้จ่ายไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ตลอดจนทำให้อายุการใช้งานของชิ้นงานเหล็กนานขึ้น โดยดูได้จากค่าอัตราการกักตรอนที่ลดลง

6.2.3 สารหน่วงการกักตรอนแบบดูดซับความชื้นนี้ เป็นแนวทางที่ดีที่สามารถนำไปปรับปรุงและพัฒนาเทคโนโลยีในการป้องกันการกักตรอน เพื่อลดความเสียหายจากการกักตรอนได้

6.3 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการทดลองนี้ไม่ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไป ในปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน, เวลาในการทำปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน และผลของการเปลี่ยนแปลง ปริมาณของแอมันในปฏิกิริยาการกราฟท์กับดินขาวและอะครายลาไมด์ต่อประสิทธิภาพของ วัสดุผสม ดังนั้น ในอนาคตควรมีการศึกษาผลของปัจจัยที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น และเนื่องจากการควบคุมความชื้นที่ใช้ในการทดสอบนั้น เป็นสถานะที่จำลองขึ้นมา ซึ่งบางครั้งในการนำไป ใช้งานจริง อาจ会有ความชื้นที่แตกต่างไปจากนี้ ทำให้ประสิทธิภาพของวัสดุผสมเคลือบผิวหลัก มีประสิทธิภาพที่แตกต่างไปจากผลที่ทำการทดลองได้ ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ในแต่ละงาน

เอกสารอ้างอิง

1. Jihuai Wu, Yueling Wei and Songbai Lin. "Study on starch-graft- acrylamide/mineral powder superabsorbent composite." Polymer International. 44(2003) : 6513 – 6520.
2. Y.Hu and X.Liu. "Chemical composition and surface property of kaolins." Mineral Engineering.16(11) (2003) : 1279 – 1284.
3. Peter, Ciullo A. "Kaolin Clay : Functional Optical Additives." Awards and Recognition. (2003).
4. An Li and Aiqin Wang. "Synthesis and properties of clay-based superabsorbent composite." European Polymer Journal. 41(7)(2005) : 1630 - 1637.
5. Junping Zhang, Hao Chen and Aiqin Wang. "Study on superabsorbent composite." European Polymer Journal. (2005).
6. Golden Pak Chemical. "Super Absorbent Polymer." Vancouver, BC, Canada. (2005).
7. Jigar, Joshi M and Vijay kumar sinha. "Ceric ammonium nitrate induced grafting of polyacrylamide onto carboxymethyl chitosan." Carbohydrate Polymers. (2006) : 1-8.
8. ศิริลักษณ์ นิวิฐจรรยงค์. การกักกรองและการเลือกใช้วัสดุ. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2002.
9. สมศักดิ์ สุภสิทธิ์มงคล และ ณรงค์ พังวิวัฒน์. "การเคลือบผิวอะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 ด้วย โพลีเมอร์ เพื่อป้องกันการกักกรองโดยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า." วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 12(3)(2545).
10. Tretheway,K.R. and Chamberlain, J. Corrosion. 3rd edition. New York : Longman Scientific & Technical, John Wiley&Sons Inc, 1992.
11. Jones,D.A. Principle and Prevention of Corrosion. Singapore : Prentice Hall and Simon & Schuster, 1996.
12. UIC, Inc. Viscosity Analysis [serial online] 2005 [cited 2006 May 16]. Available from : URL : http://www.uicinc.com/SysSheet_PDFs/ViscoTubeBrochure.pdf.
13. Mindat.org. Classification of Kaolinite [serial online] 2005 [cited 2006 May 18]. Available from : URL : <http://www.mindat.org/min-2156.html>.

14. U.S.Geological Survey. Kaolinite group [serial online] 2001 Oct 11 [cited 2006 May 19].
Available from : URL : <http://www.pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/html/docs/clays/kaogr.htm>.
15. Juma, N.G. The Pedosphere and its Dynamics : Mineralogy, 6.3 Clay Crystals [serial online] 1998 Oct 19 [cited 2006 May 29]. Available from : URL :
http://www.stadiumturf.com/definitions_of_clay_crystals.htm.
16. James, Reeds S. "Introduction to the Principles of Ceramic Processing." Wiley Interscience. (1989).
17. Chem Industry.com. Chemical name [serial online] 2005 [cited 2006 June 4]. Available from : URL : <http://www.chemindustry.com/chemicals/271307.html>.
18. Glossary.com. Acrylamide Copolymer [serial online] 2006 [cited 2006 June 4]. Available from : URL : <http://www.glossary.oilfield.slb.com/files/OGL99074.gif>.
19. คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. การแยกและทำโปรตีนให้บริสุทธิ์โดยเทคนิคเจลฟิลเตรชันโครมาโตกราฟี [ออนไลน์] 2549 [สืบค้นวันที่ 13 พฤศจิกายน 2549]. จาก http://www.agro.cmu.ac.th/e_books/protein/Book-lesson3.pdf.
20. MTEC. Super Absorbent Polymer [serial online] 2006 [cited 2006 Aug 7]. Available from : URL : http://www.mtec.or.th/Th/news/cool_stuff/cool39.html.
21. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. เหล็กกล้าคาร์บอน [ออนไลน์] 2547 [สืบค้นวันที่ 13 พฤศจิกายน 2549]. จาก <http://ie.eng.ubu.ac.th/~254705/law.html>.
22. Ambikadevi,V.R., and Lalithambika,M. "Effect of organic acids on ferric iron removal from iron – stained kaolinite." Applied Clay Science. 16 (2000) : 133 – 145.
23. ไพฑูรย์ สุรวัฒนวิเศษ และ กฤษณะ จันทร์ขาว. "การประดิษฐ์สารหน่วงการกักร่อนชนิดดูดซับความชื้น." ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. (2003).
24. Takasago Tekko K.K. Symbol Chemical Composition [serial online] 2002 [cited 2006 Aug 27]. Available from : URL : http://www.efunda.com/materials/alloys/carbon_steels/show_carbon.cfm.
25. แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. Principles and Techniques of Instrumental Analysis. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, 2534.
26. Fanta,G.F., and Burr,R.C., Polym.Sci. (1969) : 1675 – 1678.

27. Fanta,G.F., Weaver,M.O., and Doane,W.M., Chem Tech. (9) (1974) : 675-679.
28. Wu,J.H., Lin,J.M., and Zhou,M., Macromol Rapid Commun. 21(15) (2000) :1032-1034.
29. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. ความหนืดและความ
ถ่วงจำเพาะ [ออนไลน์] 2548 [สืบค้นวันที่ 13 สิงหาคม 2549]. จาก
<http://www.eg.mahidol.ac.th/dept/egche/PDF/phy2>.
30. James,D.A. Principles and Prevention of corrosion. 2nd edition. Printice Hall. (1996) : 508.
31. Amethyst Galleries, Inc. The mineral kaolinite [serial online] 2006 [cited 2006 Aug 27].
Available from : URL :
<http://mineral.galleries.com/minerals/silicate/kaolinit/kaolinit.htm>.
32. Zhao,J.M., and Zuo,Y. “The effects of Molybdate and Dichromate anions on pit propagation
of mild steel in bicarbonate solution containing Cl⁻.” Corrosion Science. 44 (2002) :
2119 – 2130.
33. Zin,I.M., and Lyon,S.B. “The mode of action of chromate inhibitor in epoxy primer on
galvanized steel.” Progress in Organic Coatings. 33 (1998) : 203 – 210.
34. Sperling,L.H. Introduction to Physical Polymer Science. 2nd edition. John Wilay & Sons.
(1992) : 9-11.
35. Sekine,I., and Silao,L. “Progress in Organic Coatings.” 32 (1997) : 185 – 192.
36. Wikimedia Foundation, Inc. Ceric Ammonium Nitrate [serial online] 2007 Feb 25 [cited
2006 Aug 27]. Available from : URL :
[http://en.wikipedia.org/wiki/Ammonium_cerium\(IV\)_nitrate](http://en.wikipedia.org/wiki/Ammonium_cerium(IV)_nitrate).
37. Mino,G., and Kaizerman,S. “The new method for the preparation of graft copolymers and
Polymerization initiated by ceric in redox systems.” Journal of Polymer science.
31(122) (1958) : 242-243.
38. Hashem,A., Afifi,M.A. and Hebeish,A. “Synthesis ,Characterization and Saponification of
Poly(AN) - Starch Composites and Properties of their Hydrogels.” American Journal of
Applied Sciences. 2(3) (2005) : 614-621.
39. McCormic,CL., Park,LS., and Polym Sci,J. Polym chem. Ed. 19 (1981) : 2229.
40. Oz Nesrin and Ahmet Akar. “Aminomethylene phosphonic acid-ceric ion redox systems for
aqueous polymerization of vinyl monomers.” European Polymer Journal. 36 (2000) :
193-199.

ภาคผนวก ก

การเทียบปรับมาตรฐานอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การเทียบปรับมาตรฐานไฮโกรมิเตอร์

นำไฮโกรมิเตอร์มาอังไว้บน water bath โดยมีการควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นนำปิเกตอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร มาวางครอบไฮโกรมิเตอร์ ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 10 – 15 นาที ทำการอ่านและปรับค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ ให้มีค่าอยู่ที่ 100 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ ก-1 แสดงภาพไฮโกรมิเตอร์



ภาพที่ ก-2 แสดงการเทียบปรับมาตรฐานไฮโกรมิเตอร์

ภาคผนวก ข

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบด้วยเทคนิคโพเทนชิโอไดนามิก

1. อิเล็กโทรด Ag / AgCl ที่ใช้เป็นขั้ว RE (Reference Electrode)



ภาพที่ ข -1 แสดงอิเล็กโทรด Ag / AgCl

2. Pt –Electrode ที่ใช้เป็นขั้ว CE (Counter Electrode)



ภาพที่ ข -2 แสดง Pt –Electrode

3. สารละลายอิ่มตัว KCl ที่มี Luggin Probe เป็นสะพานเกลือ



ภาพที่ ข-3 แสดงสารละลายอิ่มตัว KCl และสะพานเกลือ

4. ภาชนะที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ ข-4 แสดงภาชนะที่ใช้ในการทดสอบ

5. เครื่องโพเทนชิโอสแตท



ภาพที่ ข-5 แสดงเครื่องโพเทนชิโอสแตท

6. เครื่องคอมพิวเตอร์



ภาพที่ ข-6 แสดงเครื่องคอมพิวเตอร์

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายอภิธร เสาวรศ

ชื่อวิทยานิพนธ์ : การประดิษฐ์สารหน่วงการกัดกร่อนแบบดูดซับความชื้น

สาขาวิชา : วัสดุศาสตร์

ประวัติ

ประวัติส่วนตัว เกิดวันที่ 13 พฤศจิกายน พ.ศ. 2522

บ้านเลขที่ 19/65 หมู่ที่ 7 ต.พุดตาลอง อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี 20180

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2546