สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาผลของการปรับสภาพพื้นผิวที่มีต่อสภาพการยึดติดกันระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียม

นาย วิสิทธิ์ ตระการศรีสุนันท์
นาย ศัลยพงษ์ รังสรรค์สวัสดิ์

วท.
ว7861ก
2547
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....61974
วัน,เดือน,ปี.....25 ก.ค. 2549
b.11558787
.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECTS OF SURFACE PRETREATMENT ON THE ADHESION BETWEEN NATURAL RUBBER AND ALUMINIUM SURFACE

MR. WISIT TRAKARNSRISUNAN
MR. SANYAPONG RANGSANSVASTI

A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาผลของการปรับสภาพพื้นผิวที่มีต่อสภาพการยึดติดกันระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียม
โดย	นายวิสิทธิ์ ตระการศรีสุนันท์
	นายศัลยพงษ์ รังสรรค์สวัสดิ์
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี	คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.อภินันท์ นัมคณิสรณ์

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

_____ ประธานกรรมการ
(ดร. อภินันท์ นัมคณิสรณ์)

_____ กรรมการ
(ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์)

_____ กรรมการ
(ดร. สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง การศึกษาผลของการปรับสภาพพื้นผิวที่มีต่อสภาพการยึดติดกัน
ระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียม
โดย นาย วิสิทธิ์ ตระการศรีสุนันท์ รหัสนักศึกษา 44010834
นาย ศัลยพงษ์ รังสรรค์สวัสดิ์ รหัสนักศึกษา 44010840
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. อภินันท์ นัมคณิสรณ์
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาสภาพการยึดติดระหว่างยางธรรมชาติและอะลูมิเนียม เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดติดกันระหว่างวัสดุทั้งสอง โดยการปรับสภาพผิวของโลหะ 3 ประเภท ได้แก่ วิธีการล้างด้วยสารละลายด่าง (Alkaline Detergent Cleaning) วิธีการเอชชิ่งด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก (Chromic-Sulfuric Acid Etching) และวิธีการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Anodizing) หลังจากนั้นวิเคราะห์สภาพผิวของอะลูมิเนียมหลังการปรับสภาพและสภาพผิวของอะลูมิเนียมหลังจากที่ลอกแผ่นยางออกแล้วด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ชิ้นงานที่ได้จะถูกนำไปทดสอบความสามารถในการยึดติดด้วยวิธีดึงลอก (Peel Test) ด้วยมุม 90 องศาที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าพลังงานที่ใช้ในการแยกสลายพันธะในชิ้นงานที่ถูกปรับสภาพด้วยวิธีการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริกจะมีค่าสูงที่สุด เนื่องจากลักษณะพื้นผิวของอะลูมิเนียมมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนและมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้สายโซ่ของยางสามารถยึดติดกับอะลูมิเนียมได้ดี รองลงมาคือชิ้นงานที่ถูกปรับสภาพด้วยวิธีการเอชชิ่งด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก และชิ้นงานที่ถูกปรับสภาพด้วยวิธีการล้างด้วยสารละลายด่างจะยึดติดกับอะลูมิเนียมได้น้อยที่สุด และเมื่อตรวจสอบตำแหน่งการลอกของยางออกจากอะลูมิเนียม พบว่าทั้งสามกรณีเป็นการลอกที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสเนื่องจากความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวที่ผิวสัมผัสต่ำกว่าความแข็งแรงของพันธะในเนื้อยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title Effects of Surface Pretreatment on the Adhesion between Natural Rubber and Aluminium Surface

By Mr. Wisit Trakarnsrisunan

Mr. Sanyapong Rangsansvasti

Advisor Dr. Apinan Namkanisorn

Report for Bachelor Degree of Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This project presents a study of the adhesion between natural rubber and aluminum substrate. In order to improve the adhesion between these materials, aluminum substrate was pretreated by one of the following techniques: alkaline detergent cleaning, chromic-sulfuric acid etching and phosphoric acid anodization. The morphology of the oxide following these treatments was studied using a scanning electron microscope. The adhesion strength of the joint was measured via a 90 ^{o} peel test by peeling strip of rubber from the aluminum substrate using a constant load. The experimental result revealed that the joint prepared from phosphoric acid anodization required the highest energy to peel, followed by acid etched joint and alkaline detergent cleaned joint, respectively. Inspection of the locus of failure indicated that all three cases produced fracture near the interface because the interfacial strength between natural rubber and aluminum substrate is lower than that of the cohesive strength of the rubber.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ

ดร.อภินันท์ นัมคณิสรณ์ สำหรับคำเสนอแนะ แนวทางแก้ไขปรับปรุงโครงงาน และการให้คำปรึกษาตลอดมา

อาจารย์ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประศาสน์วิชาความรู้ หลายสิ่งที่ท่านมอบให้ได้นำมาใช้ในโครงงานนี้ และหลายสิ่งที่ท่านมอบให้เป็นพื้นฐานที่จะนำไปใช้ต่อไปในอนาคต

เพื่อนๆทุกคนที่คอยแวะเวียนมาให้กำลังใจ พูดคุย และช่วยเหลือตลอดช่วงระยะเวลาการทำงาน

ครอบครัวที่คอยสนับสนุน ผลักดันให้เกิดกำลังใจในการทำงาน และอบรมเลี้ยงดูให้เกิดความคิดอ่านตลอดมา

วิสิทธิ์ ตระการศรีสุนันท์

ศัลยพงษ์ รังสรรค์สวัสดิ์

27 มีนาคม 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ

กิตติกรรมประกาศ.....ฉ

สารบัญ.....ช

สารบัญตาราง.....ฌ

สารบัญภาพ.....ญ

คำอธิบายสัญลักษณ์.....ฐ

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....1

1.3 ขอบเขตของโครงการ.....2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงงาน.....2

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....3

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกลไกการยึดเกาะ การแยกและการปรับสภาพผิว.....4

2.1 พื้นผิวและการเตรียมพื้นผิว.....4

2.2 แรงที่เกี่ยวข้องกับการยึดติด.....10

2.3 พันธะเคมี (Chemical bonding).....11

2.4 การทดสอบด้วยวิธีมาตรฐาน (Standard Test Method).....13

2.5 ยางธรรมชาติ.....14

2.6 อะลูมิเนียม.....14

บทที่ 3 ทฤษฎี.....15

3.1 ทฤษฎีกลไกการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ.....15

3.2 การปรับสภาพผิวของโลหะ.....19

3.3 การทดสอบโดยวิธีดึงลอกลอก (Peel Test).....23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ขั้นตอนการทดลอง.....25

4.1 วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง..... 25

4.2 ขั้นตอนการทดลอง.....26

4.3 การปรับสภาพผิวของแผ่นอะลูมิเนียม.....28

4.4 การขึ้นรูปชิ้นงาน.....28

4.5 การทดสอบสภาพการยึดติดและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....29

บทที่ 5 ผลการทดลอง.....31

5.1 ผลการทดลองในส่วนของการวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียม.....31

5.2 ผลการทดลองจากการทดสอบโดยวิธีดึงลอก.....40

บทที่ 6 สรุปผลและวิเคราะห์.....43

6.1 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียม.....43

6.2 การทดสอบสภาพยึดติดโดยวิธีดึงลอก.....44

6.3 วิจารณ์ผลการทดลอง.....45

บทที่ 7 ข้อเสนอแนะ.....46

เอกสารอ้างอิง.....47

ภาคผนวก.....48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 แสดงไซเลนชนิดต่างๆ.....19

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบอัตราเร็วในการลอกของการปรับสภาพผิวอะลูมิเนียมด้วยวิธีต่างๆ....41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นงานโลหะ.....4
รูปที่ 2.2 แสดงพื้นผิวของโลหะที่ปกคลุมด้วยชั้นของ ไฮเดรต ออกไซด์.....5
รูปที่ 2.3 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นงานพอลิเมอร์.....7
รูปที่ 2.4 แสดงพลังงานที่ใช้ในการยึดเกาะและการแยกออกที่ผิวสัมผัสระหว่างสารยึดติด
กับโลหะสับสเตรท.....10
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างพันธะของยางธรรมชาติ.....14
รูปที่ 3.1 ทฤษฎีการประสานทางกล.....15
รูปที่ 3.2 รูปร่างรูพรุนของออกไซด์ที่มีผลต่อการซึมผ่านของพอลิเมอร์.....15
รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมก่อนที่จะถูกกัดกร่อนด้วย
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....16
รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายสภาพพื้นผิวของพอลิสไตรีน หลังจากแผ่นอลูมิเนียมถูก
กัดกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จนหมด.....16
รูปที่ 3.5 ทฤษฎีการเกิดพันธะเคมี.....17
รูปที่ 3.6 ทฤษฎีการแพร่.....19
รูปที่ 3.7 แสดงชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลาย
กรดโครมิกซัลฟูริกหรือสารละลายกรดไดโครเมตซัลฟูริก.....20
รูปที่ 3.8 แสดงชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลาย
กรดฟอสฟอริกทำปฏิกิริยาอะโนไดเซชันกับแผ่นอะลูมิเนียม.....22
รูปที่ 3.9 แสดงชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลาย
กรดโครมิกซัลฟูริกทำปฏิกิริยาอะโนไดเซชันกับแผ่นอะลูมิเนียม.....22
รูปที่ 3.10 แสดงการทดสอบสภาพการยึดติดด้วยการลอก.....23
(1) The floating roller peel Test
(2) Climbing-drum peel Test
(3) T-peel Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการแยก กับความเร็วในการแตกสลายพันธะ....24
รูปที่ 4.1 แสดงชุดการทดลองที่ใช้ในการทดสอบสภาพการยึดติดด้วยการลอก....29
รูปที่ 5.1-1 แสดงสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวและปรับสภาพผิวด้วย สารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต....32
รูปที่ 5.1-2 แสดงสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริกและปรับสภาพผิวด้วยการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริก....33
รูปที่ 5.2 แสดงสภาพพื้นผิวหลังการลอกยางออกเปรียบเทียบกับพื้นผิวของโลหะที่ไม่มีเนื้อยางปกคลุม....35
รูปที่ 5.3-1 แสดงสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตและสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริกหลังการทดสอบด้วยการลอก....37
รูปที่ 5.3-2 แสดงสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวด้วยการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริกหลังการทดสอบด้วยการลอก....38
รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ของระยะทางกับเวลาในการลอกของอลูมิเนียมที่ปรับสภาพโดยการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต การเอชชิ่งด้วยสารละลายโครมิกซัลฟูริก และการอะโนไดเซชันในกรดฟอสฟอริก....40
รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการแยกและความเร็วที่ใช้ในการสลายพันธะของชิ้นงานที่ปรับสภาพโดยวิธีการอะโนไดเซชัน....41
รูปที่ ก.1 แสดงความเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 43.85 กรัม....49
รูปที่ ก.2 แสดงความเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 49.69 กรัม....49
รูปที่ ก.3 แสดงความเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 55.54 กรัม....50
รูปที่ ก.4 แสดงความเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 61.05 กรัม....50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ก.5 แสดงความเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 66.90 กรัม.....51
รูปที่ ก.6 แสดงความเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 74.22 กรัม.....51
รูปที่ ก.7 แสดงความเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 80.06 กรัม.....52
รูปที่ ก.8 แสดงความเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 85.90 กรัม.....52
รูปที่ ข.1 แสดงเครื่องมืออะโนไดเซชัน.....53
รูปที่ ข.2 แสดงภาพขณะทำการอะโนไดเซชัน.....54
รูปที่ ค.1 แสดงชุดเครื่องมือสำหรับการทดสอบสภาพการยึดติดด้วยวิธีดึงลอก.....55
รูปที่ ค.2 แสดงชิ้นงานขณะทำการลอก.....56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์

W_A = พลังงานในการยึดติดกันของสารยึดติดกับโลหะสับสเตรท (จูล)

W_C = พลังงานภายในเนื้อของสารยึดติดหรือโลหะสับสเตรท (จูล)

γ = พลังงานพื้นผิวอิสระของสารยึดติดหรือโลหะสับสเตรท (จูล)

γ_1 = พลังงานพื้นผิวอิสระของสารยึดติด (จูล)

γ_2 = พลังงานพื้นผิวอิสระของโลหะสับสเตรท (จูล)

γ_{12} = พลังงานผิวสัมผัสอิสระระหว่างสารยึดติดกับโลหะสับสเตรท (จูล)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิเมอร์ (นาโนเมตร)

S = ความเค้นที่ผิวสัมผัส (เมกกะปาสคาล)

G = พลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัส (จูลต่อตารางเมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ ก.5 แสดงความเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 66.90 กรัม.....51
รูปที่ ก.6 แสดงความเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 74.22 กรัม.....51
รูปที่ ก.7 แสดงความเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 80.06 กรัม.....52
รูปที่ ก.8 แสดงความเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 85.90 กรัม.....52
รูปที่ ข.1 แสดงเครื่องมืออะโนไดเซชัน.....53
รูปที่ ข.2 แสดงภาพขณะทำการอะโนไดเซชัน.....54
รูปที่ ค.1 แสดงชุดเครื่องมือสำหรับการทดสอบสภาพการยึดติดด้วยวิธีดึงลอก.....55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

จากข้อมูลของกรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ สถาบันวิจัยยาง สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย แผนพัฒนายางพาราครบวงจร (พ.ศ.2545-2549) และนิตยสาร The Rubber International ประเทศไทยผลิตยางพาราเป็นอันดับหนึ่งของโลกและเป็นพืชทางเศรษฐกิจที่ทำรายได้เป็นอันดับหนึ่งของประเทศ ใช้พื้นที่เพาะปลูกทั้งสิ้น 12.7 ล้านไร่ มีเกษตรกรผู้ปลูกประมาณ 6 ล้านคนหรือคิดเป็นร้อยละ 10 ของประเทศ ผลผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 2 ล้านตันต่อปี โดยร้อยละ 90 ของผลผลิตเป็นการผลิตเพื่อการส่งออก โดยส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์และคาดว่าความต้องการยางพาราในต่างประเทศจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.6 จนถึงปี 2549 ขณะที่ความต้องการภายในประเทศเฉลี่ยปีละ 0.22 ล้านตันหรือ ร้อยละ10 ของปริมาณยางพาราที่ผลิตทั้งหมด ซึ่งถือว่ามีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณการส่งออก จากข้อมูลดังกล่าวทำให้ทราบถึงปัญหาหนึ่งที่พบในอุสาหกรรมยางพาราคือการแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่ายางพารายังมีน้อย เนื่องจากขาดแคลนเทคโนโลยีประกอบกับการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางต้องใช้เวลาและเงินลงทุนจำนวนมาก ทำให้มีผู้ประกอบการน้อยรายที่จะลงทุนพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางพารา ประกอบกับการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ของหน่วยงานในภาครัฐที่ผ่านมายังไม่สอดคล้องกับความต้องการในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นหากสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของยางพาราเพื่อใช้ร่วมกับวัสดุอื่นๆได้ในหลายภาคอุตสาหกรรม ก็จะส่งผลให้ข้อจำกัดในการใช้ยางพาราลดน้อยลง ทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์เพื่อการส่งออกอีกด้วย

งานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาสภาพการยึดติดระหว่างยางพากับอะลูมิเนียม เพื่อเพิ่มโอกาสในการใช้ยางพาร่วมกับโลหะ และทำการทดลองเพื่อหาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดของยางพากับโลหะ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ศึกษากลไกการยึดติดระหว่างยางพากับโลหะ

1.2.2 เพื่อหาแนวทางในการเพิ่มความสามารถในการยึดติดระหว่างยางพากับโลหะ

1.2.3 เพื่อศึกษาวิธีการทดสอบความสามารถในการยึดติดของยางพากับโลหะ ด้วยวิธีการทดสอบโดยวิธีดึงลอก ซึ่งจะสามารถนำไป ประยุกต์ใช้กับชิ้นงานอื่นได้ในอีกหลายภาคอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.4 เพื่อเพิ่มโอกาสในการใช้ ยางพาราร่วมกับโลหะ ซึ่งจะส่งผลให้ข้อจำกัดในการใช้ยางพาราลดน้อยลง และเพื่อส่งเสริมความต้องการในการใช้ยางพาราของภาคอุตสาหกรรม

1.2.5 เพื่อเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ยางพารา อันจะนำไปสู่มูลค่าการส่งออกที่เพิ่มสูงขึ้น ทั้งยังเป็นการเพิ่มรายได้ แก่เกษตรกรผู้ปลูกยางพาราภายในประเทศ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ศึกษาโครงสร้าง คุณสมบัติ และกลไกในการยึดติดกันระหว่างยางพารากับอะลูมิเนียม

1.3.2 ศึกษาวิธีการปรับสภาพผิว และปรับสภาพผิวของอะลูมิเนียมโดยวิธีการล้างด้วยสารละลายด่าง (Alkaline Detergent Cleaning) วิธีการเอชชิ่งด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก (Chromic-Sulfuric Acid Etching) และ วิธีการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Anodizing)

1.3.3 ถ่ายภาพตัวอย่างของแผ่นอะลูมิเนียมก่อนและหลังการปรับสภาพผิว รวมทั้งหลังจากที่ได้ลอกแผ่นยางออกแล้ว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope: SEM) และเปรียบเทียบภาพที่ได้จากการปรับสภาพผิวของโลหะแบบต่างๆ

1.3.4 ทดสอบความสามารถในการยึดติดของชิ้นงานด้วยวิธีดึงลอกที่ผิว (Peel test) และเปรียบเทียบผลที่จากการปรับสภาพผิวของโลหะแบบต่างๆ

1.3.5 คำนวณหาค่าพลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัส (Fracture Energy,G)

1.3.6 สรุปและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองและการพัฒนาการยึดติดระหว่างยางพารากับอะลูมิเนียม

1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงงาน

งานวิจัยชิ้นนี้มีขั้นตอนในการดำเนินงาน 3 ส่วนหลักคือ

1.4.1 การศึกษาโครงสร้าง คุณสมบัติ และ กลไกในการยึดติดกันระหว่างยางพารากับโลหะ

1.4.2 การทดลองเพิ่มความสามารถในการยึดติด โดยการปรับสภาพผิวสัมผัสของอะลูมิเนียม เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดติดระหว่างอะลูมิเนียมกับยางพารา โดยใช้วิธีการปรับสภาพผิว 3 วิธี คือ

1) การล้างด้วยสารละลายด่าง (Alkaline Detergent Cleaning)

2) การเอชชิ่งด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก (Chromic-Sulfuric Acid Etching)

3) การอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Anodizing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.3 การทดสอบชิ้นงานโดยแบ่งออกเป็น 2 แนวทางคือ

1) การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวก่อนและหลังการปรับสภาพ รวมทั้งหลังจากที่ได้ลอกแผ่นยางออก ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope: SEM)

2) การทดสอบประสิทธิภาพ โดยการทดสอบคุณสมบัติทางกลด้วยวิธีดึงลอก และใช้กล้องวีดีโอ (Video Camera) จับภาพเพื่อหาอัตราเร็วในการลอก และนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัส (Fracture Energy, G)

เปรียบเทียบผลที่ได้จากการเพิ่มความสามารถในการยึดติดด้วยวิธีการแบบต่างๆเพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมในการนำยางพารามาใช้ร่วมกับโลหะต่อไป

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เข้าใจกลไกในการยึดติดระหว่างยางพารากับโลหะ

1.5.2 สามารถทำให้ยางพารากับโลหะยึดติดกันได้อย่างมีประสิทธิภาพดีขึ้น

1.5.3 พัฒนาองค์ความรู้ที่ได้ เพื่อนำยางพาราไปใช้ร่วมกับโลหะ ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้ อย่างหลากหลาย สนับสนุนการเจริญเติบโตในภาคอุตสาหกรรมของไทยในขณะนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ความรู้พื้นฐาน

2.1 พื้นผิวและการเตรียมพื้นผิว

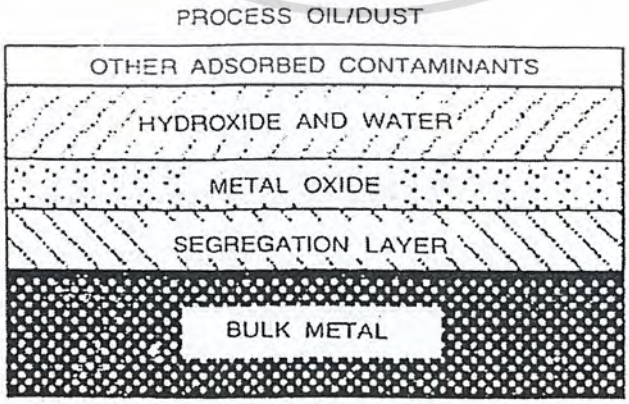
เนื่องจากการยึดติดกันจะขึ้นอยู่กับผิวสัมผัสของวัสดุที่ใช้ ดังนั้นสภาพพื้นผิวของสารยึดติดจะมีผลต่อการสร้างพันธะ และการยึดติดของชิ้นงานอย่างมากโดยทั่วไปแล้วมีวิธีการปรับสภาพผิวอยู่ 4 วิธีที่นิยมใช้ได้แก่ วิธีการทำความสะอาด (Cleanliness) การทำให้เกิดความต่อเนื่อง (Continuty) การทำให้เกิดเสถียรภาพ (Stability) การทำให้เปียก (Wetting) โดยมีจุดประสงค์เพื่อการกำจัดเอาสิ่งสกปรก และสารที่มาสร้างพันธะแบบอ่อนๆออกจากพื้นผิว เช่น คราบน้ำมัน คราบสกปรก และสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อน เพื่อให้เกิดพื้นผิวที่สามารถจะเกิดการยึดติดกับวัสดุอื่นได้ [1]

2.1.1 ลักษณะของพื้นผิวของชิ้นงาน (Nature of substrate surface)

คำว่า "พื้นผิว" หมายถึง ทั้งพื้นที่ระหว่างชิ้นงานส่วนที่ติดกัน และส่วนของความลึกที่เกิดปฏิกิริยาของวัสดุที่ใช้ในการยึดติด เช่นสำหรับแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีการอะโนไดเซชันสารยึดติดที่มีความหนืดต่ำๆสามารถผ่านลึกลงไปได้มากถึงหลายร้อยนาโนเมตรหรือมากกว่านั้น สำหรับพื้นผิวที่มีความเป็นรูพรุนมาก เช่นไม้ พื้นที่ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้จะลึกลงไปหลายมิลลิเมตร เป็นต้น

2.1.1.1 พื้นผิวของโลหะ (Metallic surface)

พื้นผิวของโลหะเช่น เหล็ก หรือ อะลูมิเนียมผสม อาจประกอบด้วยพื้นที่หลายๆส่วนเป็นชั้นๆซึ่งไม่อาจกำหนดขอบเขตของแต่ละชั้นได้อย่างแน่ชัด ดังแสดงในรูป 2.1

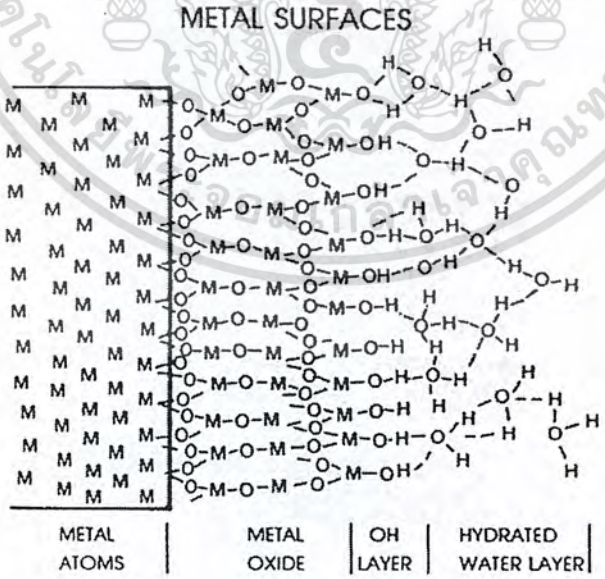


รูปที่ 2.1 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นงานโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาส่วนนอกของเนื้อโลหะถึงแม้ดูคล้ายว่าเป็นส่วนที่คงความเป็นโลหะอยู่ แต่มีความแตกต่างกับส่วนเนื้อของโลหะในด้านองค์ประกอบทางเคมี เนื่องจาก การแยกตัวขององค์ประกอบทางเคมี (Segregation) ของธาตุผสม และสิ่งเจือปน ส่วนชั้นถัดมาจะเป็นส่วนที่มีการผสมกันระหว่างชั้นออกไซด์ของโลหะ (Metal Oxide Layer) และชั้นของไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Layer) ซึ่งบางทีอาจมีการดูดซับน้ำไว้ในชั้นนี้ด้วย นอกจากนี้อาจมีสารปนเปื้อนจากการดูดซับจากสิ่งแวดล้อม เช่น ซัลเฟอร์ ไนโตรเจน ฮาโลเจน สารประกอบต่างๆจากการทำปฏิกิริยาของโลหะ และมลพิษภายในโรงงานที่ผลิตโลหะนั้น ชั้นของสารปนเปื้อนยังขึ้นอยู่กับวิธีการเก็บรักษา และจัดการกับโลหะนั้น ซึ่งวิธีการเก็บรักษาพื้นผิวโลหะก็มีหลายวิธี เช่น การเคลือบผิวด้วยน้ำมัน สารหล่อลื่น และ การเติมสารช่วยยับยั้งการกัดกร่อน เป็นต้น

ตามความเป็นจริงแล้วบนพื้นผิวของโลหะทุกชนิดต้องมีชั้นของ ไฮเดรต ออกไซด์ ดังแสดงในรูป 2.2 แม้กระทั่งโลหะพวกเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steels) นิกเกิล (Nickel) และโครเมียม (Chromium) ก็ยังมีชั้นของโลหะออกไซด์ ที่ยึดอยู่กับชั้นน้ำอย่างน้อย 1 ชั้น ดังนั้นสารยึดติดที่จะใช้กับโลหะจะต้องสามารถเข้ากันได้ดีกับชั้นของน้ำที่ยึดแน่นอยู่กับชั้นออกไซด์ของโลหะ โดยลักษณะของชั้นออกไซด์ของโลหะจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ และสภาวะที่เกิดเป็นชั้นออกไซด์นั้นขึ้น และสารยึดติดต่างชนิดกันก็จะมีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยากับชั้นของออกไซด์แตกต่างกันด้วย ตัวอย่างเช่น สารยึดติดที่มีความหนืดต่ำ จะสามารถผ่านเข้าไปในรูพรุนของชั้นออกไซด์ได้ดีกว่าประเภทที่มีความหนืดสูง



รูปที่ 2.2 แสดงพื้นผิวของโลหะที่ปกคลุมด้วยชั้นของ ไฮเดรต ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อต้องปฏิบัติการเกี่ยวกับการยึดติดของโลหะ สิ่งที่ต้องตระหนักอยู่เสมอคือธรรมชาติของพื้นผิวจะมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดแม้ในโลหะชนิดเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของพื้นผิวจะขึ้นอยู่กับกระบวนการขึ้นรูป และความร้อนที่ได้รับของโลหะนั้น รวมไปถึงกระบวนการต่อเนื่อง เช่น การตัดแต่ง (Machining) การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ (Forming) วิธีการในการเก็บรักษา และการจัดการกับโลหะนั้น นอกจากนี้ลักษณะของพื้นผิวยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ และสภาวะในการเตรียมพื้นผิวก่อนการเกิดพันธะ เช่นในอะลูมิเนียมก่อนที่จะเกิดพันธะ สารเจือปนในน้ำล้าง (Rinsing Water) หรือในสารละลายที่ใช้เอชชิ่ง (Etching) และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในการปรับสภาพจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของอะลูมิเนียมอย่างมาก

วิธีการและระดับความเข้มข้นในการปรับสภาพที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งบางทีอาจต้องการให้ชิ้นงานนั้นสัมผัสกับสารยึดติดโดยตรงโดยปราศจากชั้นของออกไซด์ สารปนเปื้อน หรือฟิล์มที่มาเคลือบจากปฏิกิริยาอะโนไดเซชั่น แต่สำหรับวัสดุบางชนิดเช่น อะลูมิเนียมจะมีชั้นออกไซด์ที่บาง หนาแน่น และมีความแข็งแรงซึ่งจะช่วยป้องกันอะลูมิเนียมจากการถูกกัดกร่อน และการเปลี่ยนสภาพเนื่องจากการใช้งาน ทองแดงจะมีพันธะออกไซด์ที่ไม่แข็งแรง และควรกำจัดออกก่อนการเตรียมพื้นผิวสำหรับเกิดพันธะเป็นต้น

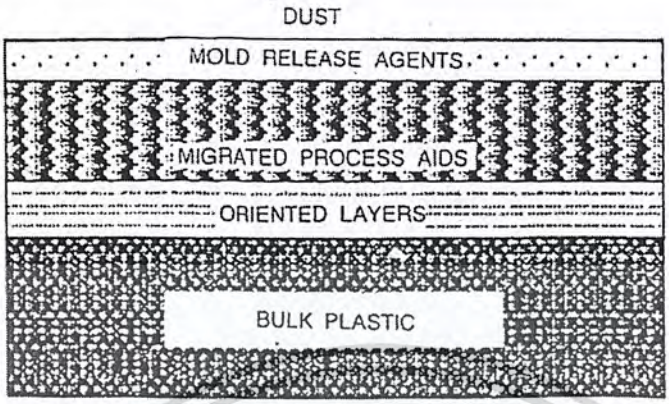
2.1.1.2 พื้นผิวของพอลิเมอร์ (Polymeric Surface)

สารอินทรีย์จำพวกพลาสติก หรือ อิลาสโตเมอร์ มักมีความซับซ้อนมากกว่าโลหะ แต่มีพลังงานที่ผิว (Surface Energy) และความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ต่ำกว่า และที่สำคัญคือ ที่พื้นผิวของพอลิเมอร์มีความว่องไว และเปลี่ยนแปลงง่ายกว่าโลหะ ดังนั้นจึงมีความน่าจะเป็นที่จะเกิดความเปลี่ยนแปลงกับพื้นผิวของพอลิเมอร์ได้มากกว่า ดังแสดงในรูป 2.3 พื้นผิวของพอลิเมอร์จะมีความเป็นขั้วสูง ง่ายต่อการเกิดพันธะกับ อนุภาคที่มีมวลโมเลกุลต่ำๆ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน พลาสติไซเซอร์ สารเติมแต่งที่ใช้ในกระบวนการ (Processing Aid) น้ำ และ สารอินทรีย์ที่ปนเปื้อน ซึ่งทั้งหมดนี้สามารถพบได้ที่ผิวของพอลิเมอร์ และจะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของพันธะ แต่จะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของเนื้อสารน้อยมาก

องค์ประกอบภายในเนื้อ (Bulk) ของพอลิเมอร์ จะสามารถเคลื่อนออกมาอยู่บริเวณพื้นผิวของพอลิเมอร์นั้นได้โดยเราสามารถพบ สารพอลิเมอร์โมเลกุลต่ำ โอลิโกเมอร์ พลาสติไซเซอร์ ผงสี (Pigments) สารป้องกันการหดตัว (Shrink Control Agent) และสารอื่นๆที่ใช้ในกระบวนการ ได้พอๆกับสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิว ยิ่งไปกว่านั้นบริเวณผิวหน้าของพลาสติกจะเป็นบริเวณที่มีความว่องไวมาก (Dynamic Region) ตลอดจนสามารถเกิดสมดุลใหม่เป็นสมดุลภายในเนื้อสารกับสมดุลภายนอกกับสิ่งแวดล้อม เช่น ในพลาสติกอสัญฐาน (Amorphous Plastic) ชนิดที่มีความยืดหยุ่นสูง ที่อุณหภูมิสูงกว่าสภาวะกลาส ทรานซิชัน (Glass Transition) องค์ปะกอบที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มวลโมเลกุลต่ำจะสามารถแพร่จากภายในเนื้อสารออกสู่พื้นผิว ในขณะที่มีธาตุบางอย่างในสิ่งแวดล้อมแพร่เข้าสู่บริเวณที่เกิดพันธะยึดติด



รูปที่ 2.3 แสดงภาพตัดขวางของชิ้นงานพอลิเมอร์

ผลจากการเกิดปฏิกิริยาแบบไดนามิก ทำให้เราไม่สามารถมั่นใจได้ว่าพันธะที่เกิดขึ้นจริงเป็นไปตามที่เราคาดการไว้หรือไม่เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่พื้นผิวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากเกิดพันธะขึ้นแล้ว และหลังจากการใช้งาน ดังนั้นพันธะอ่อนๆที่ไม่ได้เกิดขึ้นระหว่างการสร้างพันธะก็จะเกิดขึ้นภายหลังการใช้งานไปแล้ว ซึ่งจะก่อให้เกิดความไม่แข็งแรงของพันธะระหว่างพื้นผิว ถึงแม้ว่าเหตุการณ์นี้จะไม่ได้เกิดขึ้นทุกครั้งก็ตาม แต่ในระหว่างการออกแบบกระบวนการ ก็ควรมีการทดสอบความเป็นไปได้ว่าจะเกิดพันธะอ่อนๆที่ไม่ต้องการหรือไม่ โดยสร้างเป็นแบบจำลองสำหรับการทดสอบ

2.1.2 การปรับสภาพพื้นผิว (Surface Treatment)

การปรับสภาพพื้นผิวสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การปรับสภาพแบบพาสซีฟ (Passive Surface Preparation Method) และการปรับสภาพแบบแอคทีฟ (Active Surface Treatments)

2.1.2.1 การปรับสภาพแบบพาสซีฟ

การปรับสภาพด้วยวิธีนี้เป็นกระบวนการเตรียมพื้นผิวโดยไม่ได้เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี แต่จะเป็นการทำความสะอาดพื้นผิว และกำจัดชั้นของสารปนเปื้อนที่มาสร้างพันธะแบบอ่อนๆกับพื้นผิวออกไป เช่นในกระบวนการล้างด้วยสารละลาย (Solvent Washing) การทำความสะอาดโดยใช้สารเคมี (Chemical Cleaning) การขัดถูพื้นผิวของชิ้นงาน (Mechanical Abrasion) อาจใช้กระบวนการปรับสภาพผิวแบบนี้แบบเดียว หรือใช้เป็นขั้นตอนแรกของการปรับสภาพก็ได้

การปรับสภาพแบบพาสซีฟ ยังแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การปรับสภาพแบบพาสซีฟด้วยวิธีการทางเคมี (Passive Chemical Surface Treatment)

เป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า เช่น น้ำมัน ทราย ไขมันสัตว์ รอยนิ้วมือ ฯลฯ การกำจัดโดยวิธีทางเคมีหมายถึง ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงในเนื้อสาร ตัวอย่างการปรับสภาพด้วยวิธีการแบบนี้ได้แก่วิธี Vapor Degreasing, การล้างด้วยสารละลาย (Solvent Washing), การทำความสะอาดด้วยสารละลายด่าง และผงซักฟอก (Alcaline & Detergent Cleaning) และ การทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaning)

- การทำความสะอาดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Cleaning) การปรับสภาพด้วยวิธีนี้มีจุดประสงค์เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ หรือผงทรายที่ปนเปื้อนออกจากชิ้นงานด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ ถ้าสารที่ปนเปื้อนเป็นสารอินทรีย์ คราบน้ำมัน หรือไขมันสัตว์ การปรับสภาพโดยการทำความสะอาดด้วยตัวทำละลายเพียงอย่างเดียวจะทำให้ได้พื้นผิวที่มีพันธะอ่อนๆไปถึงปานกลาง การปรับสภาพด้วยวิธีนี้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย และควรมีการปรับสภาพเบื้องต้นก่อนเพื่อเตรียมชิ้นงาน ด้วยวิธีการขัดถู หรือใช้สารเคมี อย่างไรก็ตามวิธีการนี้เป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพน้อยที่สุด

- การทำความสะอาดด้วยสารเคมี (Chemical Cleaning) การปรับสภาพด้วยวิธีนี้เป็นการใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงเพื่อจับกับสิ่งสกปรกบนพื้นผิว แล้วหลุดออกไป สามารถใช้ได้กับทั้งชิ้นงานที่มีพื้นผิวเป็นโลหะ และอโลหะ โดยวิธีการนี้จะนิยมมากถ้าชิ้นงานเป็นพอลิเมอร์ เนื่องจากสารละลายที่ใช้จะย่อยสลายผิวหน้าบางส่วนของชิ้นงานที่มีสารปนเปื้อนติดอยู่ และสามารถกำจัดออกได้โดยง่ายโดยใช้สารละลาย ส่วนใหญ่การปรับสภาพด้วยวิธีนี้มักใช้ร่วมกับวิธีอื่นๆ เนื่องจากการปรับสภาพโดย Chemical Cleaning เพียงอย่างเดียวจะไม่สามารถกำจัดสารปนเปื้อนที่ยึดเกาะกับชิ้นงานด้วยพันธะที่แข็งแรงได้ เช่น สนิม (Rust) หรือ ตะกรัน (scale) โดยสารละลายที่ใช้ทำความสะอาด ที่นิยมได้แก่ คอสติก (Caustics) ซิลิเกต (Silicates) เอมีน (Amines) ฟอสเฟต (phosphates) เอซิด เอด (Acid aid) และคีเลต (Chelates)

2) การปรับสภาพแบบพาสซีฟด้วยวิธีการทางกล (Passive Mechanical Treatment)

การปรับสภาพด้วยวิธีนี้เป็นการปรับสภาพโดยอาศัยแรงทางกล เช่น วิธีการขัดพื้นผิว การขัดด้วยกระดาษทราย และ ผงแร่ โดยจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการกำจัดสารปนเปื้อนที่หนัก คราบสกปรก ตะกรัน และ ชั้นออกไซด์ ในการปรับสภาพด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องมีการทำความสะอาดพื้นผิวของชิ้นงานทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพ และควรกำจัดสารปนเปื้อนพวกคราบไขมันออกจากพื้นผิวก่อนการปรับสภาพ โดยการขัดที่ผิวของชิ้นงานเพื่อป้องกันการผังตัวของคราบไขมันลงบนชิ้นงาน และเศษอนุภาคของแข็งเล็กๆที่ตกค้างอยู่บนพื้นผิวหลังจากการขัด สามารถกำจัดออกได้โดยการเป่าด้วยอากาศแห้ง หรือเช็ดออกด้วยตัวทำละลาย เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.2 การปรับสภาพแบบแอคทีฟ

การปรับสภาพด้วยวิธีการแอคทีฟทั้งทางเคมี และฟิสิกส์ไม่เพียงแต่จะเป็นการทำความสะอาดพื้นผิว และกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มาเกาะอยู่กับพื้นผิวแรงพันธะอ่อนๆออกเท่านั้น แต่ยังเป็นการผลัดเปลี่ยนผิวหน้าของชิ้นงานเพื่อให้พร้อมสำหรับการเกิดพันธะต่อไปการปรับสภาพด้วยวิธีการแอคทีฟนี้ได้แก่ การเอชชิ่งด้วยสารละลายกรด การออกซิเดชั่น การอะโนไดเซชัน เป็นต้น

1) การปรับสภาพแบบแอคทีฟด้วยวิธีการทางเคมี (Active Chemical SurfaceTreatment)

การปรับสภาพด้วยวิธีการทางเคมีจะเปลี่ยนคุณสมบัติทั้งทางเคมี และฟิสิกส์ของพื้นผิวของชิ้นงานเพื่อสร้างพื้นผิวใหม่ที่มีความพร้อมต่อการยึดติดมากขึ้น การปรับสภาพด้วยวิธีนี้ใช้ได้กับพื้นผิวทั้งที่เป็นโลหะและอโลหะ โดยสารเคมีที่ใช้จะมีทั้งกรดและเบส สารเคมีที่นิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายได้แก่ กรดซัลฟูริก-โซเดียม ไดโครเมต (Sulfuric Acid-Sodium Dichromate) ฟีนอล (Phenol) โซเดียม แนฟทาลีน (Sodium Naphthalene) เฟอร์ริก คลอไรด์-กรดไนตริก (Ferric Chloride-Nitric Acid) และสารละลายกรดไนตริก-ไฮโดรฟลูออริก (Nitric-Hydrofluoric Acid Solutions)

- การปรับสภาพพื้นผิวโลหะด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical Treatment of Metallic Surface)

วัตถุประสงค์ของการปรับสภาพผิวของโลหะเพื่อกำจัดออกไซด์ที่ไม่ต้องการ และกำจัดชั้นของสารที่มายึดติดกับพื้นผิวด้วยแรงพันธะที่อ่อนๆ หรือช่วยป้องกันพื้นผิวจากการกัดกร่อน การปรับสภาพพื้นผิวด้วยวิธีทางเคมียังช่วยให้พื้นผิวของชิ้นงานมีความขรุขระในระดับไมโครสเกล ซึ่งช่วยเพิ่มการยึดติดทางกลมากขึ้นอีกด้วย การปรับสภาพผิวด้วยวิธีนี้มักจะกำจัดสารที่มีองค์ประกอบเชิงซ้อน (Complex Element) ที่อยู่บนชิ้นงานออก และแทนที่ด้วยสารที่มีโครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบ หนาแน่น และแข็งแรงมากยิ่งขึ้น เช่น การเอชชิ่งด้วยสารละลายกรด และการอะโนไดเซชัน

- การปรับสภาพพื้นผิวพอลิเมอร์ด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical Treatment of Polymeric Surface)

การปรับสภาพพื้นผิวทางเคมีของพอลิเมอร์ที่มีพลังงานต่ำๆอาจทำได้โดยการปรับสภาพด้วย กรดโครมิก (Chromic Acid) โพแทสเซียมไอโอเดต (Potassium Iodate) กรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid) และ การฟอกจาง (Bleach) โดยสารเคมีและสภาวะที่เลือกใช้จะขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์นั้นๆ

2) การปรับสภาพผิวพอลิเมอร์แบบแอคทีฟด้วยวิธีการทางเคมี (Active Chemical Surface Treatment for Polymeric Surface)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

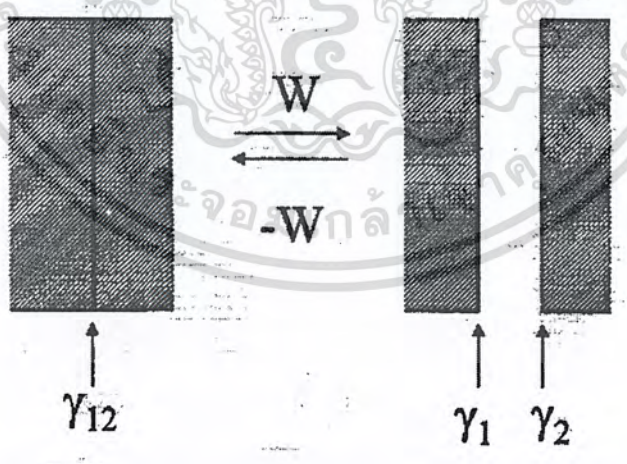
เนื่องจากการปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมีมีข้อเสียคือ ความอันตรายของสารเคมีที่เลือกใช้ และใช้เวลาในการปฏิบัติการนาน จึงทำให้มีการใช้การปรับสภาพโดยวิธีการทางฟิสิกส์ โดยจะปรับสภาพผิวของพอลิเมอร์เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงให้พร้อมต่อการยึดติด เช่นการปรับสภาพโดยวิธีใช้ เปลวไฟ (Flame) รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultra Violet) พลาสมา (Plasma) อิเล็กตริกดิสชาร์จ (Elictric Discharge) และ เลเซอร์ (Laser) เป็นต้น

2.2 แรงที่เกี่ยวข้องกับการยึดติด

การจะทราบถึงแรงที่เกิดขึ้นในการยึดติดของสารที่นำมายึดติดกันนั้น ต้องเข้าใจเกี่ยวกับการเชื่อมต่อกันระหว่างอะตอมและโมเลกุลของสารทั้งสองก่อน โดยจะมีแรงที่เกี่ยวข้องหลายประเภทซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นแรงที่เกิดขึ้นโดยทางกายภาพและทางเคมี จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องทำความเข้าใจเพื่อนำไปพัฒนาการยึดติดต่อไป

กลไกการยึดติดระหว่างสารยึดติดกับโลหะสับสเตรท อาศัยแรงที่ใช้ในการยึดติด 2 ประเภท ได้แก่

2.2.1 แรงยึดติดระหว่างพื้นผิว (Adhesive force) เป็นแรงระหว่างพื้นผิวของสารยึดติดกับโลหะสับสเตรท โดยค่าพลังงานในการยึดติดกันของวัสดุทั้งสองจะมีค่าเท่ากับการแยกผิวสัมผัสออกจากกันเพื่อทำให้เกิดพื้นผิวอิสระสองพื้นผิวแต่มีทิศทางตรงกันข้ามดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงพลังงานที่ใช้ในการยึดเกาะและการแยกออกที่ผิวสัมผัสระหว่างสารยึดติดกับโลหะสับสเตรท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถหาพลังงานในการยึดติดกันของสารยึดติดกับโลหะสับสเตรทได้ดังสมการ

$$W_A = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}$$

โดยที่ W_A = พลังงานในการยึดติดกันของสารยึดติดกับโลหะสับสเตรท (จูล)

γ_1 = พลังงานพื้นผิวอิสระของสารยึดติด (จูล)

γ_2 = พลังงานพื้นผิวอิสระของโลหะสับสเตรท (จูล)

γ_{12} = พลังงานผิวสัมผัสอิสระระหว่างสารยึดติดกับโลหะสับสเตรท (จูล)

2.2.2 แรงโคฮีซีฟ (Cohesive force) เป็นแรงภายในเนื้อของสารยึดติดและโลหะสับสเตรท โดยพลังงานที่ใช้หาได้จาก

$$W_C = 2\gamma$$

โดยที่ W_C = พลังงานภายในเนื้อของสารยึดติดหรือโลหะสับสเตรท (จูล)

γ = พลังงานพื้นผิวอิสระของสารยึดติดหรือโลหะสับสเตรท (จูล)

แรงแอดฮีซีฟ และแรงโคฮีซีฟ เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลหรืออะตอม ซึ่งเป็นผลของประจุไฟฟ้าที่ต่างกัน โดยโมเลกุลที่มีขั้วบวกจะดึงดูดโมเลกุลที่มีขั้วลบบริเวณใกล้เคียง ซึ่งถ้ามีจำนวนประจุมากและระยะห่างระหว่างโมเลกุลน้อยแล้ว ก็จะส่งผลให้มีแรงดึงดูดมากขึ้นการที่วัตถุทั้งสองจะหลุดออกจากกันนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากแรงแอดฮีซีฟหรือแรงโคฮีซีฟมีค่าลดน้อยลง โดยสามารถสังเกตการฉีกขาดของวัสดุทั้งสอง ถ้ามีการฉีกขาดบริเวณพื้นผิวของวัสดุทั้งสองแสดงว่าแรงแอดฮีซีฟในการยึดติดนั้นมีค่าน้อย แต่ถ้ามีการฉีกขาดในเนื้อของวัสดุแสดงว่าแรงโคฮีซีฟ มีค่าน้อย

2.3 พันธะเคมี (Chemical bonding)

การเกิดพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุ เป็นการลดพลังงานศักย์ของอะตอมลงในสภาวะที่เกิดพันธะขึ้น นั่นคืออะตอมที่เกิดพันธะจะมีสภาวะของพลังงานที่เสถียรมากขึ้นกว่าอะตอมเมื่ออยู่อย่างอิสระ โดยทั่วไปพันธะเคมีระหว่างอะตอมแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ พันธะปฐม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภูมิหรือพันธะที่แข็งแรง (primary bonds) และพันธะฑุติยภูมิหรือพันธะที่ไม่แข็งแรง (secondary bonds)

2.3.1 พันธะโลหะ (Metallic bonds)

พันธะโลหะเป็นพันธะปฐมภูมิชนิดหนึ่งโดยจะเกิดกับโลหะที่เป็นของแข็งทั่วไป อะตอมจะสามารถเข้าไปรวมตัวกันใกล้มากๆ และมีโครงสร้างของผลึกที่แน่นอน มีความหนาแน่นของประจุอิเล็กตรอนต่ำ และอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปในผลึกโลหะได้อย่างอิสระ จึงทำให้โลหะมีสมบัตินำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี โลหะส่วนมากสามารถเปลี่ยนรูปได้โดยไม่เกิดการแตกร้าว เพราะอะตอมของโลหะสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันได้โดยไม่ทำให้พันธะโลหะของโครงสร้างแตกออกหรือเสียหายได้

ผิวของโลหะจะเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายในอากาศ ทำให้อยู่ในรูป ออกไซด์ ซัลไฟด์ และไฮเดรต และจะเกิดพันธะยึดติดกับสารยึดติดบนชั้นนี้ ดังนั้นในการพิจารณาการยึดติดกับวัสดุอื่นจะต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของพันธะที่ยึดติดกันระหว่างชั้นออกไซด์ของโลหะ ความแข็งแรงภายในเนื้อของโลหะและพันธะที่ยึดติดกันระหว่างชั้นออกไซด์ของโลหะกับสารยึดติด โดยทั่วไปชั้นของออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนโลหะจะมีแรงยึดเหนี่ยวกันน้อยมาก แต่ในกรณีของอลูมิเนียมจะเกิดชั้นออกไซด์ที่ยึดติดกันได้ดีและมีความคงทนสูง ทำให้อลูมิเนียมเป็นโลหะที่ต้านการสึกกร่อนได้ดี

โลหะทุกชนิดจะมีพลังงานที่ผิวสูง และสารมารถเกิดพันธะได้ง่าย แต่ก็อาจพบปัญหาในการนำโลหะไปใช้ในการทำวัสดุสับสเตรท ปัญหาหนึ่งก็คือความคงทนของพันธะซึ่งจะลดน้อยลงเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความชื้นหรือมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูง นอกจากนี้ถ้าไม่มีการปรับสภาพผิวของโลหะก่อนที่จะมีการยึดติด อาจมีสารอินทรีย์หรือสิ่งเจือปนอื่นๆปกคลุมบริเวณผิวของโลหะทำให้การยึดติดซึ่งเกิดขึ้นที่ชั้นออกไซด์ของโลหะนั้นทำได้ยากขึ้น

2.3.2 พันธะโควาเลนต์ (Covalent bonds)

พันธะโควาเลนต์เป็นพันธะปฐมภูมิอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างอะตอมที่มีค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตี (E_N) แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นนอกสุดร่วมกันโดยอาจใช้อิเล็กตรอนร่วมกันเพียงตัวเดียวซึ่งจะเกิดเป็นพันธะเดี่ยวหรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหลายอิเล็กตรอนเช่น การเกิดพันธะคู่ เพื่อให้การจัดอิเล็กตรอนเป็นไปตามกฎออกเตต และเนื่องจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันในการสร้างพันธะทำให้พันธะมีความแข็งแรงและมีทิศทางที่แน่นอน

พันธะโควาเลนต์สามารถเกิดขึ้นได้กับโมเลกุลของก๊าซหรือธาตุที่มี 2 อะตอม และโมเลกุลของสารประเภทไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ยังเป็นพันธะที่ใช้เชื่อมต่อในสายโซ่ของวัสดุพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 พันธะไอออนิก (Ionic bonds)

พันธะไอโอนิกเกิดจากธาตุที่มีประจุไฟฟ้าบวกสูง (โลหะ) กับธาตุที่มีประจุไฟฟ้าลบ (อโลหะ) โดยจะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากอะตอมหนึ่งของธาตุที่มีประจุไฟฟ้าบวกไปยังอีกอะตอมหนึ่งของธาตุที่มีประจุไฟฟ้าลบ ทำให้เกิดแคตไอออนและแอนไอออน และเกิดแรงดึงดูดระหว่างไอออนทั้งสองเกิดเป็นพันธะไอออนิก ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงมากและไม่มีทิศทาง

2.3.4 พันธะทุติยภูมิ (Secondary bonds)

พันธะทุติยภูมิเป็นพันธะที่มีพลังงานพันธะค่อนข้างต่ำ อาจเรียกว่าพันธะ (แรง) แวนเดอร์วาลส์(van der Waals bonds (force)) เกิดจากการดึงดูดของประจุระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลที่มีขั้ว โดยทั่วไปพันธะทุติยภูมิที่เกิดขึ้นกับอะตอมหรือโมเลกุลมีอยู่ 2 ชนิด ได้แก่

- Fluctuating Dipoles เป็นแรงดึงดูดที่เกิดเนื่องจากความไม่สมมาตรของการกระจายของประจุ อิเล็กตรอนในอะตอมจึงทำให้เกิดขั้วไฟฟ้าขึ้น
- Permanent Dipoles โมเลกุลที่เกิดด้วยพันธะโควาเลนต์สามารถเกิดแรงดึงดูดที่ไม่แข็งแรงระหว่างโมเลกุลได้ ถ้าโมเลกุลมีขั้วที่ถาวร (Permanent Dipoles) เช่น โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

2.4 การทดสอบด้วยวิธีมาตรฐาน (Standard Test Method)

การทดสอบการยึดติดทางกายภาพเพื่อนำมาประเมินเปรียบเทียบกระบวนการและวัสดุที่นำมายึดติดกัน โดยเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการยึดติดของแต่ละวัสดุ และควบคุมตัวแปรต่างๆให้อยู่ในสภาวะที่ไม่มีผลต่อพันธะที่เกิดขึ้น เช่น เวลาในการเตรียมสารยึดติด กระบวนการที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวของโลหะสับสเตรท (substrate) สภาวะแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความดัน องค์ประกอบในสารยึดติด องค์ประกอบในวัสดุสับสเตรท

ผลที่ได้จากการทดสอบการยึดติด ทำให้สามารถอธิบายและวิเคราะห์ประเภทของการฉีกขาดสาเหตุที่เกิดขึ้น รวมถึงสามารถระบุส่วนที่พันธะมีความแข็งแรงน้อยในการยึดติดที่เกิดขึ้น การทดสอบการยึดติดด้วยวิธีมาตรฐานมีหลายวิธี เช่น

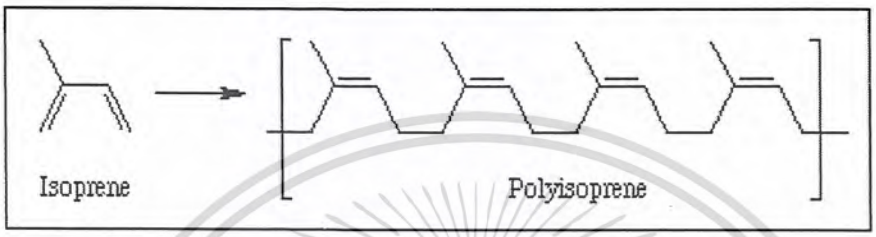
- การทดสอบโดยวิธีดึงลอก (Peel Test)
- การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)
- การทดสอบรอยแยก (Cleavage Test)
- การทดสอบความเค้น (Lap shear Test)
- การทดสอบความล้า (Fatigue Test)
- การทดสอบความแข็ง (Impact Test)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การทดสอบการคืบ (Creep Test)
- การทดสอบผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Test)

2.5 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติเป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งเรียกว่าพอลิไอโซพรีน เกิดจากโมโนเมอร์ไอโซพรีน (2-เมททิล-1,3-บิวตะไดอีน) [2] เชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาวด้วยพันธะโควาเลนต์



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างพันธะของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติสามารถเป็นส่วนผสมที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง มีความอ่อนและเหนียวจนถึงแข็งมาก ยางธรรมชาติจะมีความยืดหยุ่นสูง เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี มีความฝืดต่ำ และต้านทานสารอินทรีย์ เช่น กรด เกลือ และด่าง แต่ไม่คงทนต่อผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ยางธรรมชาติใช้กับงานที่ต้องการความแข็งแรงสูงได้เช่น ทำยางรถยนต์ นอกจากนี้ยังถูกใช้ทำท่อยางน้ำ สายพาน เครื่องจักร ยางตัน ปุ่มยาง และถุงมือ

2.6 อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่ใช้ทำสับสเตรทได้ดี เนื่องจากมีพลังงานที่ผิวสูงและมีความต้านทานต่อสภาวะแวดล้อมต่างๆได้ดี นอกจากนี้โครงสร้างโมเลกุลของอะลูมิเนียมมีอัตราส่วนระหว่างความยาวพันธะกับน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในการนำมาใช้ในการยึดติดกับวัสดุอื่น ทำให้ถูกนำมาใช้อุตสาหกรรมอากาศยานและยานยนต์ต่างๆ นอกจากนี้ยังถูกนำมาใช้เป็นวัสดุสับสเตรทเพื่อเปรียบเทียบการยึดติดของสารยึดติดต่างๆ รวมถึงการเปรียบเทียบกระบวนการยึดติดที่ใช้

อะลูมิเนียมมีพื้นผิวที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย ทำให้เกิดชั้นออกไซด์ขึ้นอย่างรวดเร็วหลังการปรับสภาพผิว โดยชั้นของอะลูมิเนียมออกไซด์นี้ จะมีความคงทนแข็งแรงในการยึดติดกับอะลูมิเนียมและช่วยในการยึดติดกับสารยึดติดได้ดีมากกว่าการนำสารยึดติดมายึดติดบนเนื้อของอะลูมิเนียมโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ทฤษฎี

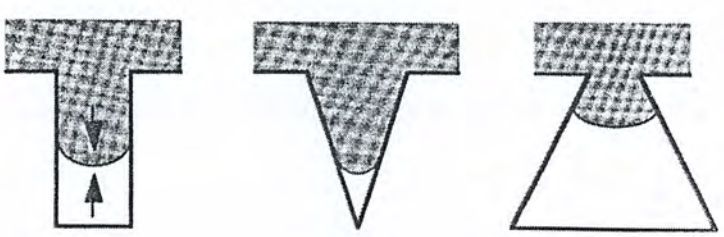
3.1 ทฤษฎีกลไกการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ

3.1.1 ทฤษฎีการประสานทางกล (Mechanical Interlocking)

ทฤษฎีการประสานทางกล ถูกเสนอโดย McBain และ Hopkins [3] เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกลไกของการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ โดยอธิบายว่าพอลิเมอร์กับโลหะสามารถยึดเกาะกันได้เนื่องจากพอลิเมอร์ซึมผ่านเข้าไปในโพรง หรือรูพรุนของออกไซด์ที่อยู่บนผิวหน้าของโลหะที่มีความขรุขระดังแสดงในรูป 3.1

รูปที่ 3.1 ทฤษฎีการประสานทางกล

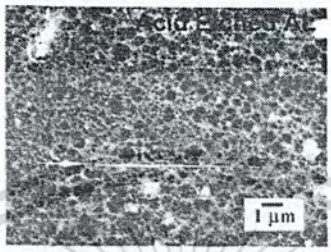
ซึ่งการซึมผ่านนี้สามารถเข้าไปได้ที่ความลึกระดับหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากเกิดความดันย้อนกลับที่อยู่ภายในรูพรุนของออกไซด์ ทำให้เกิดการต้านการซึมผ่านของพอลิเมอร์และยังพบว่าความขรุขระที่ผิวหน้าของโลหะเป็นปัจจัยสำคัญของการยึดเกาะกัน ระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ เนื่องจาก ความขรุขระทำให้ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น จึงทำให้พอลิเมอร์กับโลหะยึดเกาะกันได้ดีขึ้น ซึ่งนอกจากความขรุขระแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีความสำคัญต่อการยึดเกาะกันของพอลิเมอร์กับโลหะ เช่น ความหนืดของพอลิเมอร์ ค่าเวทอะบิลิตี (Wet Ability) ของโลหะ หรือรูปร่างรูพรุนของออกไซด์ เช่น ทรงกระบอก หรือทรงกรวย เป็นต้น แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 [4]



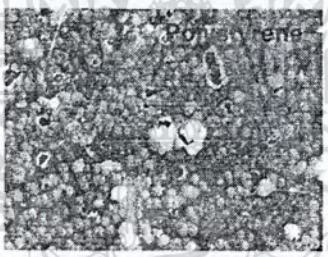
รูปที่ 3.2 รูปร่างรูพรุนของออกไซด์ที่มีผลต่อการซึมผ่านของพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่สนับสนุนทฤษฎีการประสานทางกลคือนำชิ้นงานของการยึดเกาะกันระหว่างพอลิสไตรีนกับแผ่นอลูมิเนียมแช่ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) เข้มข้น ซึ่งจะทำให้แผ่นอลูมิเนียมถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จนหมด คงเหลือแต่พอลิสไตรีน ที่มีผิวหน้าขรุขระดังรูปที่ 3.3 [5] และสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมก่อนที่จะถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.4 [5]



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมก่อนที่จะถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายสภาพพื้นผิวของพอลิสไตรีน หลังจากแผ่นอลูมิเนียมถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จนหมด

3.1.2 ทฤษฎีการเกิดพันธะเคมี (Chemical Bonding Theory)

ทฤษฎีการเกิดพันธะเคมีเป็นอีกทฤษฎีหนึ่ง ที่มีความเกี่ยวข้องกับกลไกการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ กล่าวว่าจะมีพันธะเคมีเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์กับโลหะ โดยที่ปลายด้านหนึ่งจะเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ ส่วนอีกด้านจะเกิดพันธะกับโลหะ ทำให้พอลิเมอร์กับโลหะสามารถยึดเกาะกันได้ดังแสดงในรูป 3.5 พันธะที่กล่าวถึงนี้เป็นพันธะแบบปฐมภูมิ เช่น พันธะไอออนิก หรือพันธะโควาเลนท์ เป็นต้น โดยมีค่าความแข็งแรงของพันธะมีค่าตั้งแต่ 100 ถึง 1,000 กิโลจูลต่อโมล ส่วนพันธะอีกแบบหนึ่ง คือ พันธะแบบทุติยภูมิ เช่นแรงวานเดอร์วาวล์ มีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าธนบุรี

ความแข็งแรงของพันธะไม่เกิน 50 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งพันธะที่ผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะจะต้องเป็นพันธะปฐมภูมิ จึงจะมีค่าความแข็งแรงเพียงพอในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

รูปที่ 3.5 ทฤษฎีการเกิดพันธะเคมี

ค่าความแข็งแรงทางกลที่ผิวสัมผัสสามารถหาได้ โดยการวัดค่าพลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัส (Fracture Energy, G) ออกจากกัน จากทฤษฎีการเกิดพันธะเคมี ค่าพลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสออกจากกันจะแปรผันโดยตรงกับกำลังสองของทั้งจำนวนพันธะที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยพื้นที่ (Arial Density of Bonded Sites,$\sum$) และแรงที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสออกจากกัน (f) ดังสมการที่ 3.1

$$G \propto \sum^2 f^2 \frac{D}{S} \qquad (3.1)$$

โดยที่ D = เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิเมอร์ (นาโนเมตร)

S = ความเค้นที่ผิวสัมผัส (เมกกะปาสคาล)

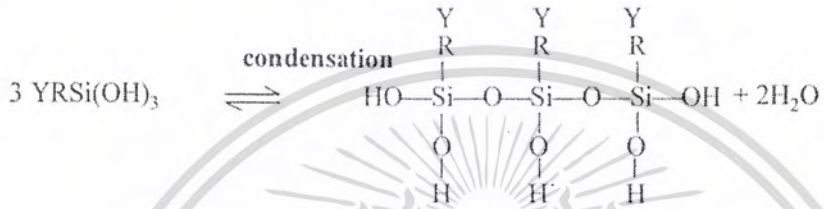
นอกจากพันธะเคมี ที่ทำให้โลหะกับพอลิเมอร์สามารถยึดเกาะกันได้แล้ว ยังมีสารอีกประเภทหนึ่ง ที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะกันของโลหะกับพอลิเมอร์ได้ โดยเฉพาะเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีน้ำหรือความชื้น สารชนิดนี้ คือไซเลนคัปปลิงเอเจนต์ (Silane Coupling Agent) ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของไซเลนเป็นส่วนใหญ่ [6,7] และมีโครงสร้างทั่วไปเป็น X_3Si-R-Y โดยที่ X คือ หมู่ไฮโดรไลซ์ (Hydrolyzable Group) ที่อยู่บนอะตอมของซิลิกอน ซึ่งอยู่ในรูปของพันธะออกเซน (M-O-Si) R คือโมเลกุลที่อยู่ระหว่างอะตอมของซิลิกอนกับหมู่พอลิเมอร์รีแอคทีฟ (Polymer Reactive Group) และ Y คือ หมู่ออร์กาโนฟังชัน (Organofunctional Group) ที่สามารถสร้างพันธะกับออร์แกนิกพอลิเมอร์ (Organic Polymer) ได้และมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของโลหะ ดังนี้

61974
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

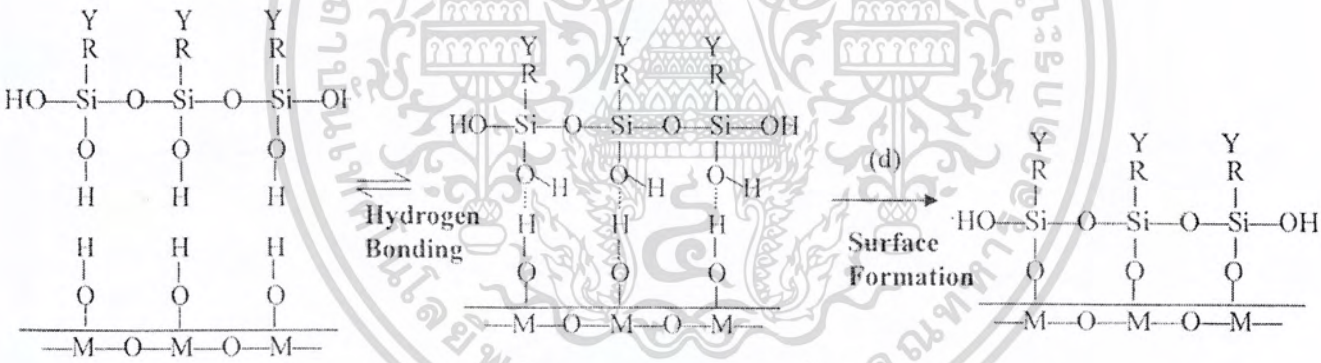
$$(R'O)_3SiRY + 3H_2O \overset{\text{hydrolysis}}{\rightleftharpoons} YRSi(OH)_3 + R'OH \qquad (3.2)$$

2. ปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน (Condensation)



(3.3)

3. ปฏิกิริยาไฮโดรเจนบอนดิง (Hydrogen Bonding)



(3.4)

ในการเลือกใช้ไซเลนให้เหมาะสมกับชนิดของพอลิเมอร์ จะพิจารณาจากหมู่ออร์กาโนฟังก์ชันของไซเลนว่าสามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ชนิดนั้นได้หรือไม่ ซึ่งชนิดของไซเลนที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป แสดงได้ดังตาราง 3.1 [6]

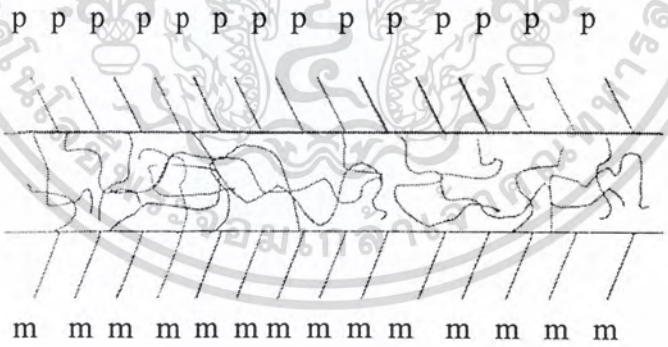
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Organofunctional group	Chemical structure
A. Vinyl	$CH_2=CHSi(OCH_3)_3$
B. Chloropropyl	$ClCH_2CH_2CH_2Si(OCH_3)_3$
C. Epoxy	$CH_2\overset{O}{\diagdown\diagup}CHCH_2OCH_2CH_2CH_2Si(OCH_3)_3$
D. Methacrylate	$CH_2=\overset{CH_3}{\overset{\vert}{C}}-COOCH_2CH_2CH_2Si(OCH_3)_3$
E. Primary amine	$H_2NCH_2CH_2CH_2Si(OC_2H_5)_3$
F. Diamine	$H_2NCH_2CH_2NHCH_2CH_2CH_2Si(OCH_3)_3$
G. Mercapto	$HSCH_2CH_2CH_2Si(OCH_3)_3$
H. Cationic styryl	$CH_2=CHC_6H_4CH_2NHCH_2CH_2NH(CH_2)_3Si(OCH_3)_3\cdot HCl$

ตารางที่ 3.1 แสดงไซเลนชนิดต่างๆ

3.1.3 ทฤษฎีการแพร่ (Diffusion Theory)

การยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์แอดฮีซีฟกับโลหะสับสเตรท เกิดจากการแพร่ของโมเลกุลที่ผิวสัมผัสของพอลิเมอร์แอดฮีซีฟกับโลหะสับสเตรท ดังรูปที่ 3.6 [8] ความแข็งแรงของผิวสัมผัสขึ้นอยู่กับความสามารถในการแพร่ของพอลิเมอร์แอดฮีซีฟเข้าไปยังโลหะสับสเตรท นอกจากนี้ ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลคือ เวลาที่ผิวหน้าของพอลิเมอร์แอดฮีซีฟกับโลหะสับสเตรทสัมผัสกัน อุณหภูมิ และน้ำหนักของโมเลกุล เป็นต้น ซึ่งทฤษฎีการแพร่นี้ โดยปกติแล้วจะมีความสำคัญในกรณีที่ผิวสัมผัสที่เกิดจากการนำพอลิเมอร์ต่างชนิดกันมายึดเกาะกัน



รูปที่ 3.6 ทฤษฎีการแพร่

3.2 การปรับสภาพผิวของโลหะ

นอกจากการศึกษากลไกการยึดเกาะและการแยกออกจากกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะที่เป็นสิ่งสำคัญสำหรับความต้องการที่จะเพิ่มความแข็งแรงของการยึดเกาะกันแล้ว การปรับสภาพพื้นผิวของโลหะก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะทำให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะกันเพิ่มขึ้น โดยอาศัย

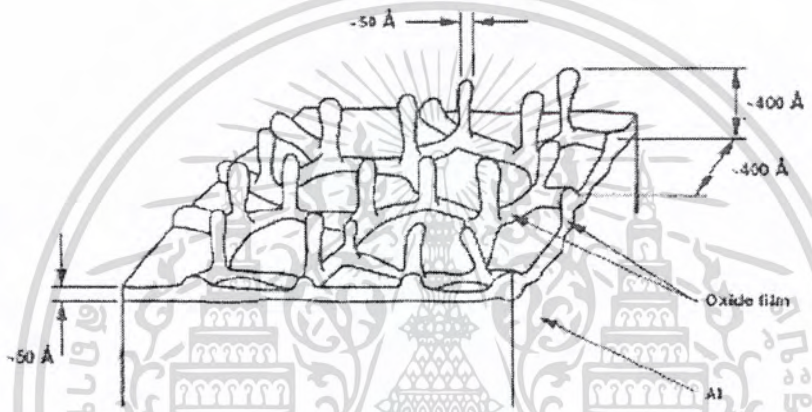
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการที่ว่า เมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้มากขึ้น จะทำให้การยึดเกาะกันดีขึ้น ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กันมีอยู่ 3 วิธีดังนี้

3.2.1 การกัดด้วยสารละลายกรด (Acid Etching) แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1) Cr(VI)-Based Etchants

ใช้สารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก หรือ สารละลายกรดไดโครเมตซัลฟูริก (Dichromate Sulfuric Acid) ในการปรับสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียม สารละลายจะปรับโครงสร้างของชั้นออกไซด์ที่อยู่บนผิวอลูมิเนียมดังรูปที่ 3.7 [9]



รูปที่ 3.7 แสดงชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริกหรือสารละลายกรดไดโครเมตซัลฟูริก

การปรับสภาพผิวด้วยวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริกจะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น 2 ปฏิกิริยา[10] เช่นกันและสามารถแสดงในรูปของสมการเคมีได้ ดังนี้

$$Al_2O_3 + 3H_2SO_4 \longrightarrow Al_2(SO_4)_3 + 3H_2O \qquad (3.5)$$

$$2Al + 4H_2SO_4 + Na_2Cr_2O_7 \longrightarrow Al_2O_3 + Na_2SO_4 + Cr(SO_4)_4 + 4H_2O \qquad (3.6)$$

2) Non-Cr(VI) Etchants

การปรับสภาพผิววิธีนี้ใช้สารละลายกรดซึ่งไม่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ เช่น สารละลายกรดไฮโดรฟูออริกไนตริก (Hydrofluoric Nitric Acid) โครงสร้างของออกไซด์หลังจากการปรับสภาพผิวจะมีลักษณะที่คล้ายกับในแบบแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การล้างด้วยสารละลายด่าง

การปรับสภาพผิวโดยใช้สารละลายในการทำความสะอาด โดยสารละลายที่เลือกใช้จะจับกับสิ่งสกปรก และสารปนเปื้อนบนพื้นผิวของชิ้นงานแล้วหลุดออกไป หากสารละลายที่เลือกใช้มีฤทธิ์เป็นด่าง จะเหมาะสมในการทำความสะอาดพื้นผิวของโลหะก่อนการเกิดพันธะ

การปรับสภาพผิวด้วยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกที่สุดวิธีหนึ่ง ในการใช้เพื่อเตรียมผิวของโลหะอลูมีเนียม สำหรับนำไปยึดเกาะกับพอลิเมอร์โดยมีปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญเกิดขึ้น 2 ปฏิกิริยา [7] ด้วยกัน คือ

1) ปฏิกิริยาการกำจัดชั้นของออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ

2) ปฏิกิริยาการสร้างชั้นของออกไซด์ขึ้นมาใหม่

สามารถแสดงในรูปของสมการเคมีได้ ดังนี้

สมการการกำจัดชั้นของออกไซด์

$$Al_2O_3 + 2OH^- + 3H_2O \longrightarrow 2(Al(OH)_4)^- \qquad (3.7)$$

สมการการสร้างชั้นของออกไซด์

$$2Al + 3H_2O \longrightarrow Al_2O_3 + 3H_2 \qquad (3.8)$$

3.2.3 อะโนไดเซชัน (Anodization)

การปรับสภาพผิวของโลหะด้วยวิธีอะโนไดเซชันจะช่วยให้เกิดพันธะออกไซด์ขึ้นที่พื้นผิว และสำหรับอะลูมิเนียม การอะโนไดซ์จะช่วยให้มีความทนทานมากที่สุดเมื่อใช้เป็นสารยึดติดใต้น้ำ วิธีการปรับสภาพโดยวิธีนี้ถูกใช้มากในอุตสาหกรรมผลิตยานยนต์ และเครื่องบิน อะโนไดเซชันสามารถทำได้ทั้งในอิเล็กโตรไลต์ของกรดฟอสฟอริก และโครมิก แต่จะนิยมอะโนไดเซชันในกรดฟอสฟอริกมากกว่า เนื่องจากมีความเป็นพิษต่ำ และสามารถกำจัดได้ง่าย

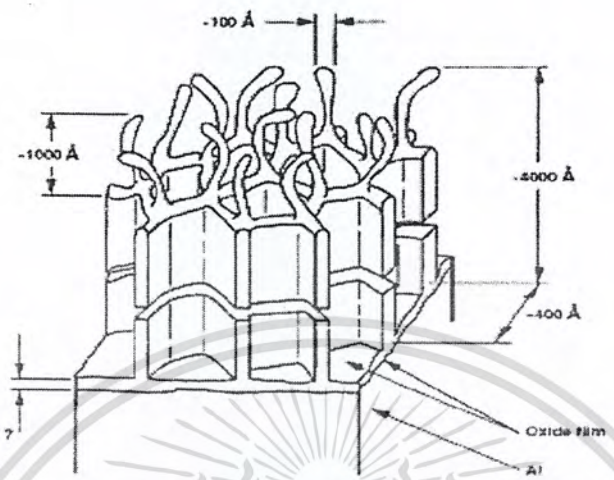
อะโนไดเซชันจะสร้างพันธะออกไซด์ ภายใต้สภาวะที่ควบคุมกระแสไฟฟ้า และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยดังกล่าวให้มีความแน่นอนจะส่งผลถึงความหนาของชั้นพันธะที่เกิด และประสิทธิภาพของพันธะนั้นด้วย การปรับสภาพด้วยวิธีอะโนไดเซชันแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) Phosphoric Acid Anodizing (PAA)

ปฏิกิริยาอะโนไดเซชัน (Anodization) ของอลูมิเนียมในสารละลายกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid) จะทำให้เกิดโพรงหรือรูพรุนบนชั้นของออกไซด์ โดยลักษณะของออกไซด์ที่ได้นั้นจะมีลักษณะเป็นร่างแหรูปหกเหลี่ยมและมีความลึกไปจนถึงผิวของโลหะดังรูปที่ 3.8 [9] ขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

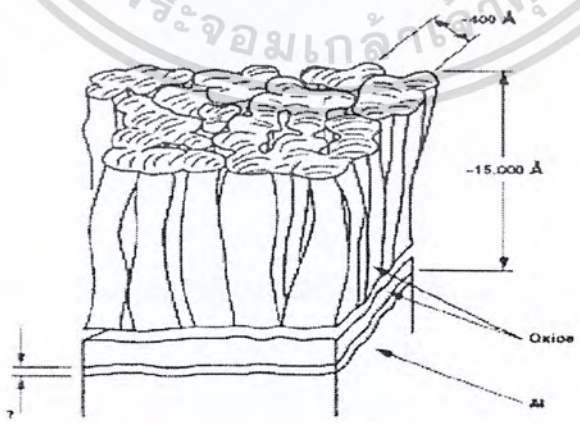
ของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนจะขึ้นอยู่กับค่าของศักย์ไฟฟ้าที่ให้และชนิดของสารละลายที่ใช้ ส่วนความหนาของชั้นออกไซด์จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแสและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา



รูปที่ 3.8 แสดงชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกทำปฏิกิริยาอะโนไดเซชันกับแผ่นอลูมิเนียม

2) Chromic Acid Anodizing (CAA)

วิธีนี้จะใช้สารละลายกรดโครมิกซัลฟูริกในการปรับโครงสร้างของออกไซด์ก่อน แล้วจึงใช้สารละลายกรดโครมิกในการทำปฏิกิริยาอะโนไดเซชัน ผลที่ได้คือชั้นของออกไซด์จะเกิดเป็นรูลึกลงไปจนถึงผิวของโลหะ แต่โครงสร้างของออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีความเป็นระเบียบน้อยกว่าใช้วิธี PAA ดังรูปที่ 3.9 [9]



รูปที่ 3.9 แสดงชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริกทำปฏิกิริยาอะโนไดเซชันกับแผ่นอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดสอบโดยวิธีดึงลอก (Peel Test)

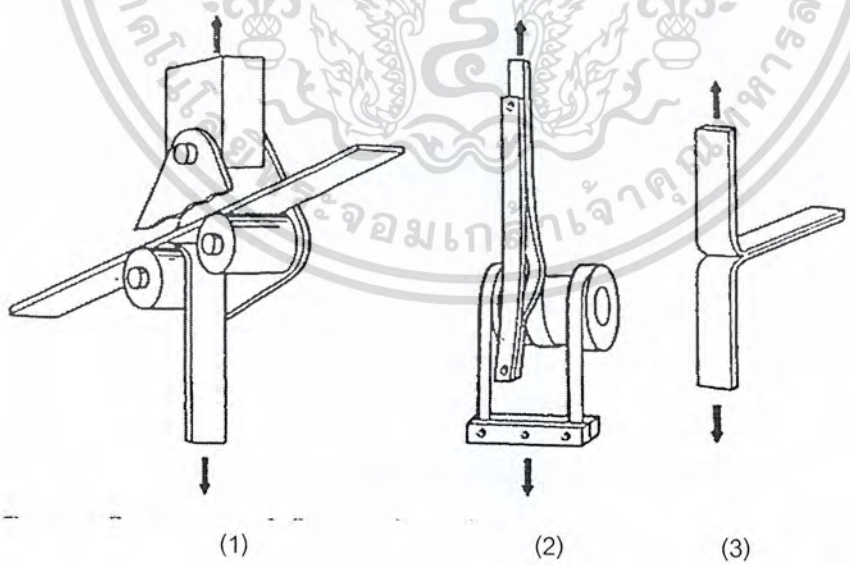
เป็นวิธีมาตรฐานในการทดสอบการยึดติดวิธีหนึ่ง เพื่อหาค่าแรงที่น้อยที่สุดในการยึดติดกันของสารยึดติดและสับสเตรท โดยใช้สารยึดติดที่สามารถยืดหยุ่นได้และสับสเตรทจะสามารถยืดหยุ่นหรือไม่ก็ได้ ผลที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับประเภทของสารยึดติด และสภาวะแวดล้อมขณะที่ทำการทดสอบ

ในการทดสอบโดยทั่วไปจะทำการลอกออกที่มุม 90 หรือ 180 องศา และสามารถแบ่งวิธีการทดสอบได้เป็น 3 วิธี [1] ได้แก่

1. T-peel Test เป็นวิธีการทดสอบที่นิยมที่สุด โดยสารยึดติดและสับสเตรทเป็นวัสดุที่สามารถยืดหยุ่นได้ เนื่องจากมุมในการลอกไม่สามารถควบคุมได้ ทำให้ค่าที่ได้จากการวัดนั้นมีความแน่นอนน้อยกว่าวิธีอื่นๆ

2. The floating roller peel Test เป็นวิธีการทดสอบโดยใช้สารยึดติดที่สามารถยืดหยุ่นได้และใช้สับสเตรทเป็นของแข็งที่ไม่สามารถยืดหยุ่นได้ ทำให้สามารถกำหนดมุมในการลอกด้วยลูกกลิ้ง และค่าที่ได้จากการวัดจะมีความแน่นอนมากกว่าการลอกในลักษณะรูปตัวที (T-peel Test)

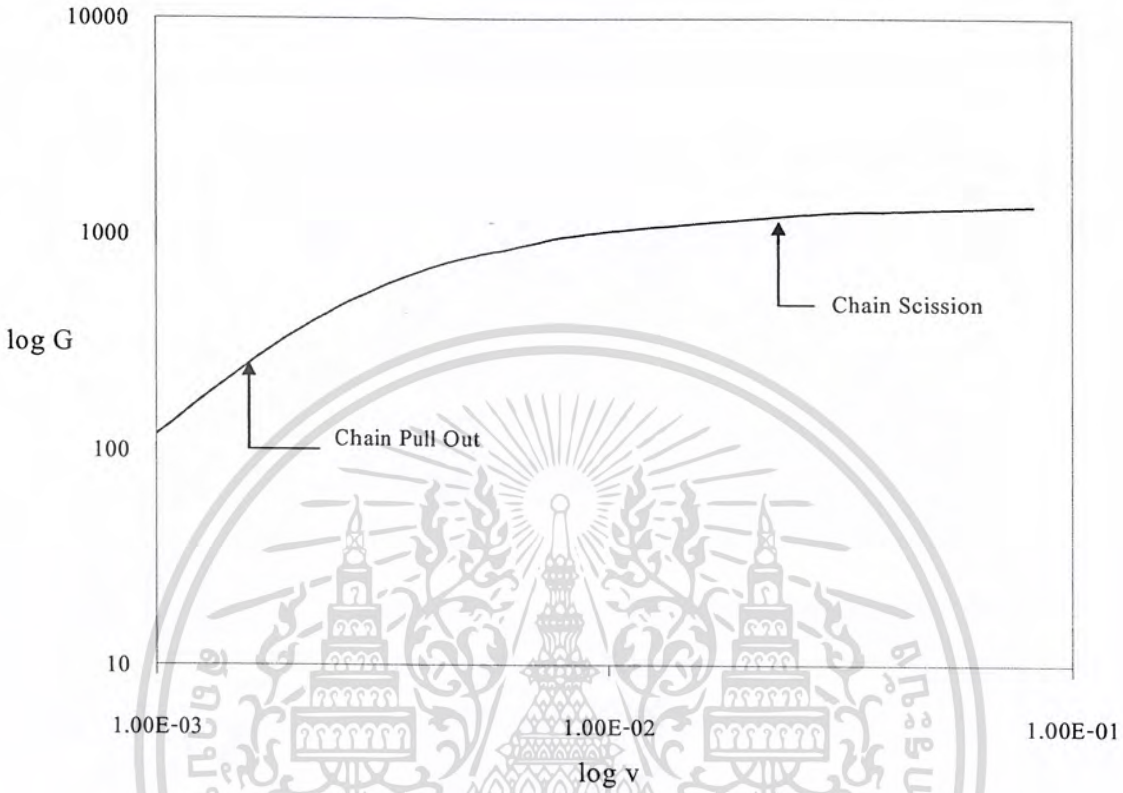
3. Climbing-drum peel Test โดยทั่วไปจะถูกใช้ในการทดสอบการยึดติดระหว่างโลหะกับวัสดุที่มีรูพรุน แต่ก็สามารถนำมาทดสอบกับการยึดติดของสารยึดติดกับสับสเตรทอย่างใดอย่างหนึ่งที่สามารถยืดหยุ่นได้ หรือสามารถยืดหยุ่นได้ทั้งสองชนิด โดยจะได้ผลที่มีค่าค่อนข้างแน่นอนเนื่องจากมีลูกกลิ้งที่ควบคุมมุมที่ใช้ในการลอก



รูปที่ 3.10 แสดงการทดสอบสภาพการยึดติดด้วยวิธีดึงลอกโดย (1)The floating roller peel Test (2) Climbing-drum peel Test (3) T-peel Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบโดยวิธีดึงลอกสามารถนำความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการแยกกับความเร็วที่ใช้ในการสลายพันธะได้ดังรูปที่ 3.11 [11]



รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการแยก กับความเร็วในการแตกสลายพันธะ

จากรูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการแยก กับความเร็วในการแตกสลายพันธะ จะเห็นว่าเมื่อความเร็วในการแตกสลายพันธะสูงขึ้น พลังงานที่ใช้ในการแยกจะมีค่าสูงขึ้นด้วย และในช่วงที่ที่ความเร็วในการแตกสลายพันธะต่ำๆ การเพิ่มขึ้นของความเร็วจะมีผลต่อค่าของพลังงานที่ใช้ในการลอก ในช่วงนี้เรียกว่า Chain Pull Out โดยการฉีกขาดของชิ้นงานจะเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของพอลิเมอร์และโลหะ (Interfacial Failure Mode) สำหรับในช่วงความเร็วในการสลายพันธะสูงๆ การเพิ่มขึ้นของความเร็วจะมีผลต่อค่าของพลังงานที่ใช้ในการลอกน้อยมาก ถึงแม้ว่าจะใช้ความเร็วมากขึ้นแต่พลังงานที่ใช้ในการลอกจะยังคงมีค่าเท่าเดิม ดังนั้นการฉีกขาดของชิ้นงานจึงเกิดขึ้นในเนื้อของพอลิเมอร์ (Cohesive failure Mode) และเรียกช่วงนี้ว่า Chain Scission

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่4
ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

<u>ส่วนที่ 1</u> การทดลองเพื่อวิเคราะห์สภาพผิวของอะลูมิเนียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของชิ้นงานที่ปรับสภาพผิวโดยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต วิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก วิธีการอะโนไดเซชัน และชิ้นงานที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว ใน 2 ขั้นตอน คือ

1. วิเคราะห์สภาพผิวของอะลูมิเนียมหลังการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการต่างๆ
2. วิเคราะห์สภาพผิวของอะลูมิเนียมหลังการทดสอบความสามารถในการยึดติดโดยการลอก

<u>ส่วนที่ 2</u> การทดลองเพื่อทดสอบความสามารถในการยึดติดของชิ้นงานที่ปรับสภาพผิวโดยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต วิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก วิธีการอะโนไดเซชัน และชิ้นงานที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว โดยวิธีการลอก

4.1 วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

4.1.1 วัสดุ

1) ยางธรรมชาติ
2) แผ่นอะลูมิเนียมความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร
3) แผ่นเทฟลอนความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร
4) แผ่นเหล็กความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร

4.1.2 อุปกรณ์

1) บีกเกอร์ปริมาตร 100และ 1000 มิลลิลิตร
2) กระบอกตวงขนาด 50และ 100 มิลลิลิตร
3) ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร
4) ชุดเครื่องให้ความร้อน (hot plate)
5) ถาดสแตนเลสสตีล ขนาด 18.5x28.5x4.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร
6) เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) กระดาษทรายเบอร์ 1000

4.1.3 สารเคมี

1) สารละลายกรดซัลฟูริก เข้มข้น 95-97% ผู้ผลิต Merck

2) สารละลายกรดฟอสฟอริก เข้มข้น 85% ผู้ผลิต Mallinckrodt

3) โซเดียมไดโครเมต (Sodiumdichromate) ผู้ผลิต Asia Pacific Specialty Chemical Limited.

4) โซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต ผู้ผลิต Fisher Scientific UK Limited

4.1.4 เครื่องมือ

1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ผู้ผลิต LEO รุ่น LEO 1455VP

2) กล้องวีดีโอ ผู้ผลิต SONY รุ่น SSC-DC398P

3) ชุดเครื่องมือทดสอบการลอกที่ผิว

4) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Power supply) ขนาด 600 มิลลิแอมแปร์

4.2 ขั้นตอนการทดลอง

4.2.1 การเตรียมแผ่นอะลูมิเนียม ยางธรรมชาติ และแม่พิมพ์

<u>การเตรียมแผ่นอะลูมิเนียม</u>

1) ตัดแผ่นอะลูมิเนียม ขนาดความกว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร

2) ล้างด้วยน้ำเพื่อทำความสะอาด

3) ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1000

4) ล้างด้วยน้ำเพื่อทำความสะอาดอีกครั้ง และทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ

<u>การเตรียมยางธรรมชาติ</u> (ตามสูตร สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร)

1) ยางธรรมชาติลงในบีกเกอร์ ใช้แท่งแก้วคนสารกวนน้ำยางประมาณ 5 นาทีเพื่อกำจัดแอมโมเนีย

2) ชั่งน้ำยางให้มีน้ำหนัก 167 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร

3) ผสมสารเติมแต่งส่วนแรกได้แก่ ซัลเฟอร์, ZDEC, ZMBT และ WINGSTAY L ในอัตราส่วน 4:2:2:2 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร

4) เทสารเติมแต่งที่เข้ากันดีแล้วผสมกับน้ำยาง และคนให้เข้ากัน

5) ผสมสารเติมแต่งส่วนที่ 2 ได้แก่ DPG และ ZNO ในอัตราส่วน 2:10 ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) เทสารเติมแต่งส่วนที่ 2 ผสมกับน้ำยางและคนให้เข้ากัน (ระวังอย่าให้เกิดฟองหากเกิดฟองให้ใช้ช้อนอลูมิเนียมตักออก)

<u>การเตรียมแม่พิมพ์</u>

1) ตัดแผ่นเทฟลอนขนาดความกว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร

2) นำแผ่นเทฟลอนที่ได้มาตัดช่องตรงกลางออกให้มีลักษณะคล้ายกรอบรูป โดยให้มีความหนา ของกรอบ 0.5 เซนติเมตร

4.2.2 การเตรียมสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก สารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตและสารละลายกรดฟอสฟอริก

<u>การเตรียมสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก</u>

1) ชั่งสารโซเดียมไดโครเมต จำนวน 20 กรัม

2) ตวงสารละลายกรดซัลฟูริก เข้มข้น 96%ปริมาตร 112.1 มิลลิลิตร

3) ตวงน้ำปริมาตร 596.6 มิลลิลิตร

4) เทสารละลายกรดซัลฟูริก เข้มข้น 96% ลงในน้ำ แล้วจึงเทสารโซเดียมไดโครเมตลงไปผสมในบีกเกอร์

5) นำไปวางลงบนเครื่องให้ความร้อนโดยมีแม่เหล็กปั่นกวน เพื่อให้สารทั้งหมดละลายเข้าด้วยกัน

<u>การเตรียมสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต</u>

1) ชั่งสารโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต จำนวน 54.00 กรัม

2) ตวงน้ำปริมาตร 1,746 มิลลิลิตร

3) เทผสมในบีกเกอร์ โดยมีแม่เหล็กปั่นกวนเพื่อให้ละลายเข้าด้วยกัน

4) ได้สารละลายสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต เข้มข้น 3%โดยมวล

<u>การเตรียมสารละลายกรดฟอสฟอริก</u>

1) ตวงสารละลายกรดฟอสฟอริก เข้มข้น 85%โดยปริมาตร ปริมาตร 600 มิลลิลิตร

2) ตวงน้ำปริมาตร 4,494 มิลลิลิตร

3) สารละลายกรดฟอสฟอริก เข้มข้น 85% ลงในน้ำ แล้วคนให้เข้ากัน

4) ได้สารละลายกรดฟอสฟอริก เข้มข้น 10%โดยมวล ปริมาตร 5,094 มิลลิลิตร

4.3 การปรับสภาพผิวของแผ่นอะลูมิเนียม

4.3.1 การปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) นำสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริกเทใส่บีกเกอร์ ขนาด 1000 มิลลิลิตรแล้วนำไปให้ความร้อนบนเครื่องให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 58 องศาเซลเซียส

2) ใส่แผ่นอะลูมิเนียมลงในสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก ทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที

3) นำแผ่นอะลูมิเนียมออกจากสารละลาย นำไปล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized Water)

4) เป่าให้แห้งด้วยอากาศร้อน

4.3.2 การปรับสภาพผิวด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต

1) ใส่แผ่นอะลูมิเนียมลงในสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต ที่อุณหภูมิ 29 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

2) นำแผ่นอะลูมิเนียมออกจากสารละลาย แล้วนำไปล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน

3) เป่าให้แห้งด้วยอากาศร้อน

4.3.3 การอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริก

1) เตรียมอุปกรณ์ดังรูปในภาคผนวก ข.1 โดยกำหนด

- เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า 600 มิลลิแอมแปร์
- อุปกรณ์ปรับความต้านทาน 1-35 โอห์ม
- แผ่นอะลูมิเนียม เป็นขั้วแอโนด (ขั้วบวก)
- แผ่นเหล็ก เป็นขั้วแคโทด (ขั้วลบ)

2) เทสารละลายกรดฟอสฟอริกลงในภาชนะทดลอง

3) เปิดเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า (Power Supply) และควบคุมกระแสให้ผ่านชิ้นงานแต่ละชิ้น 100 มิลลิแอมแปร์ โดยปรับที่อุปกรณ์ปรับความต้านทาน แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที

4) นำแผ่นอะลูมิเนียมออกจากที่จับ แล้วล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized Water)

5) เป่าให้แห้งด้วยอากาศร้อน

4.4 การขึ้นรูปชิ้นงาน

1) นำแม่พิมพ์เทฟลอนวางประกบลงบนแผ่นอะลูมิเนียมที่ปรับและไม่ได้ปรับสภาพผิว แล้วใช้ตัวหนีบหนีบไว้

2) เทน้ำยางที่เตรียมไว้จากข้อ 1.2 ลงในแม่พิมพ์ให้เต็ม และนำแม่พิมพ์ไปเรียงในถาดสแตนเลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) นำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที

4) แกะชิ้นงานที่แข็งตัวดีแล้วออกจากแม่พิมพ์

4.5 การทดสอบสภาพการยึดติดและวิเคราะห์ผลการทดลอง

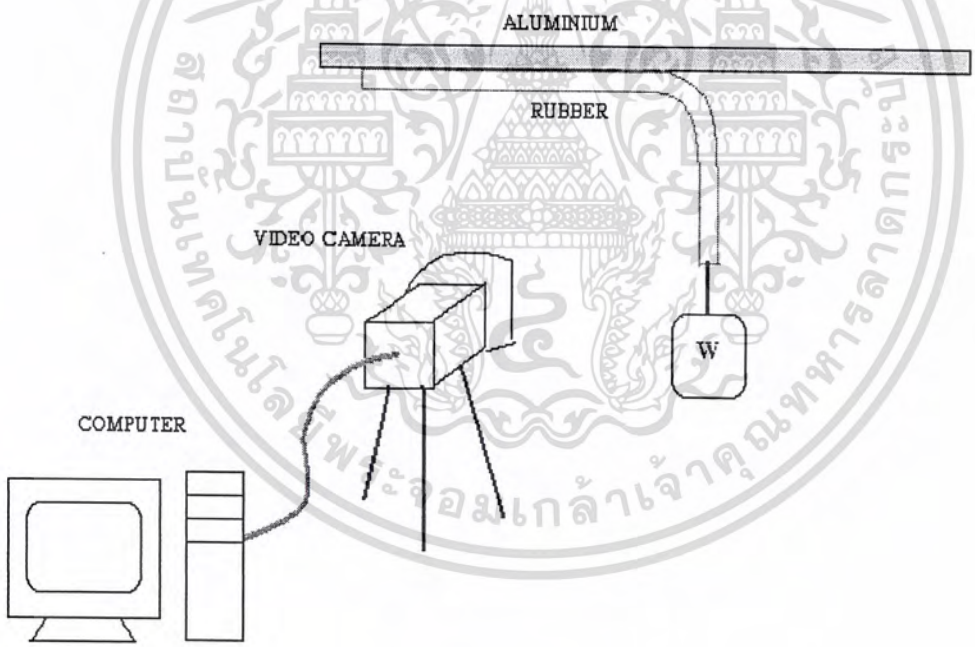
4.5.1 การทดสอบการยึดติดโดยวิธีการลอกที่ผิว

1) เตรียมอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.1

2) นำคลิปถ่วงด้วยตุ้มน้ำหนักมาหนีบบริเวณส่วนปลายของแผ่นยางพาราที่ยึดติดอยู่กับอะลูมิเนียม

3) นำชิ้นงานที่ถ่วงด้วยตุ้มน้ำหนักแล้วไปพาดบนชุดทดสอบ ก่อนที่จะปล่อยตุ้มน้ำหนักโดยใช้กล้องวีดีโอจับภาพการลอกออกของแผ่นยาง

4) นำภาพที่ได้มาวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.1 แสดงชุดการทดลองที่ใช้ในการทดสอบสภาพการยึดติดด้วยวิธีดึงลอก

4.5.2 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียม ทั้งที่ปรับและไม่ได้ปรับสภาพผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ตัดแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวและที่ปรับสภาพผิวด้วยการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต การกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก และการอะโนไดเซชั่นมาอย่างละ 1 ชิ้น ขนาดประมาณ 1 × 1 เซนติเมตร

2) นำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ที่กำลังขยาย 1000 5000 และ 10000 เท่า และ วิเคราะห์สภาพผิวของแผ่นอะลูมิเนียม ที่ได้จากภาพถ่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ผลการทดลอง

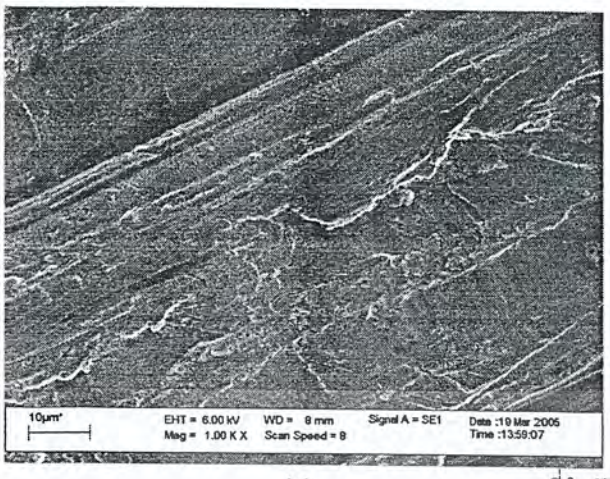
ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมภายหลังการปรับสภาพการทดสอบด้วยการดึงลอก อีกส่วนหนึ่งเป็นผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานโดยวัดแรงที่ใช้ในการดึงลอกชิ้นงานเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการยึดติดของยางธรรมชาติกับพื้นผิวอะลูมิเนียมที่ได้รับการปรับสภาพทั้ง 3 วิธี

5.1 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียม

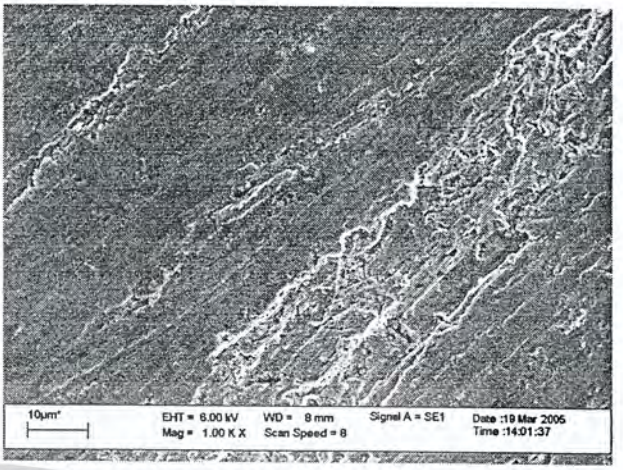
5.1.1 ผลการทดลองในส่วนของการวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมหลังการปรับสภาพผิว

ภาพถ่ายสภาพพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว ปรับสภาพผิวโดยสาร ละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต ปรับสภาพผิวโดยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก และปรับสภาพผิวโดยการอะโนไดเซชัน ดังรูปที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



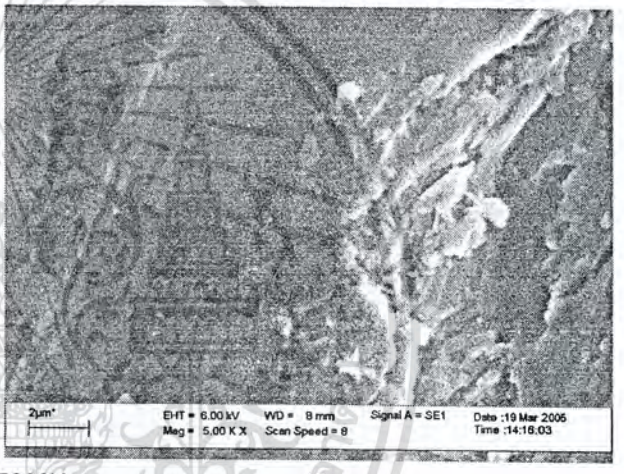
(1)



(4)

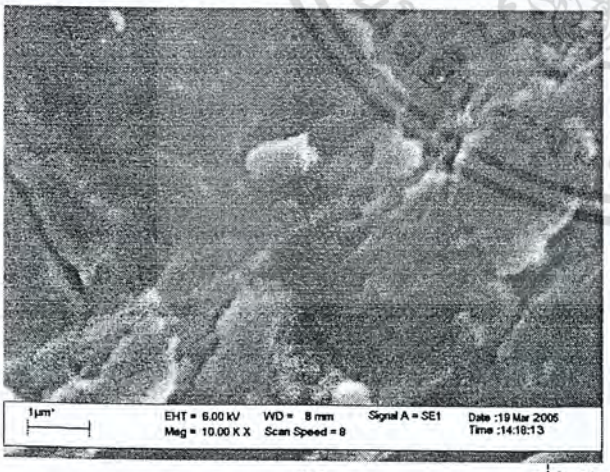
ที่กำลังขยาย 1000X

(2)

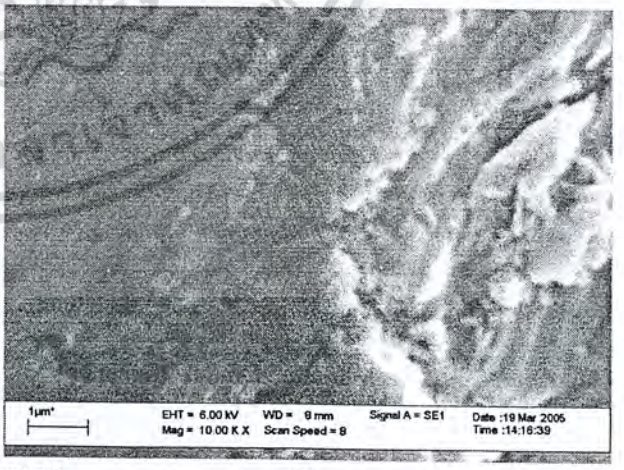


(5)

ที่กำลังขยาย 5000X



(3)

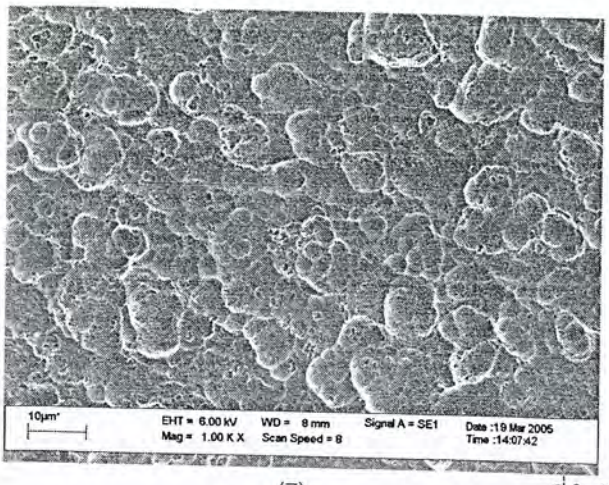


(6)

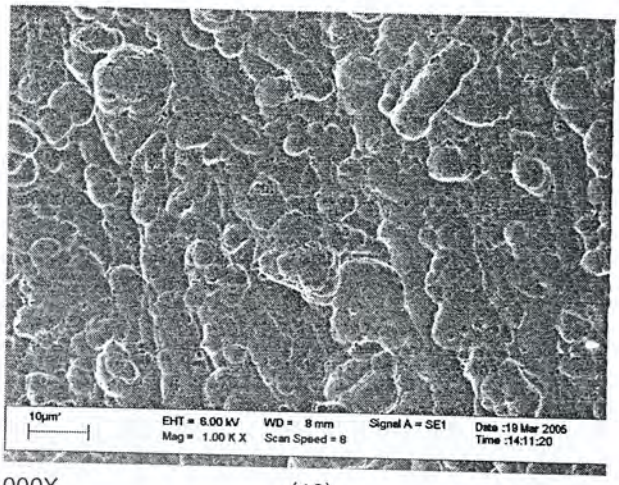
ที่กำลังขยาย 10000X

รูปที่ 5.1-1 แสดงสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวและปรับสภาพผิวด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต โดยรูปที่ (1),(2) และ(3) ไม่ได้ปรับสภาพผิว รูปที่ (4),(5) และ (6)ปรับสภาพผิวด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

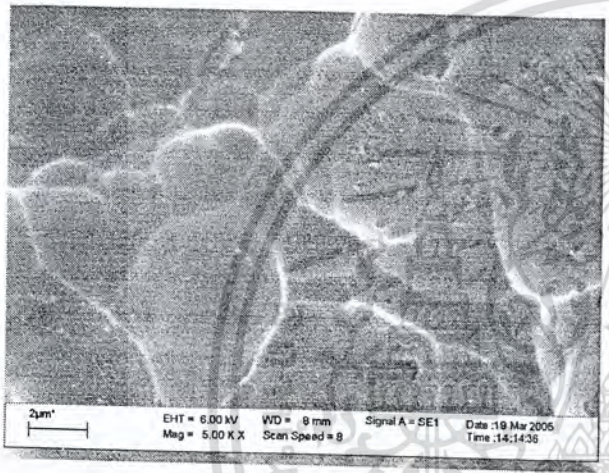


(7)

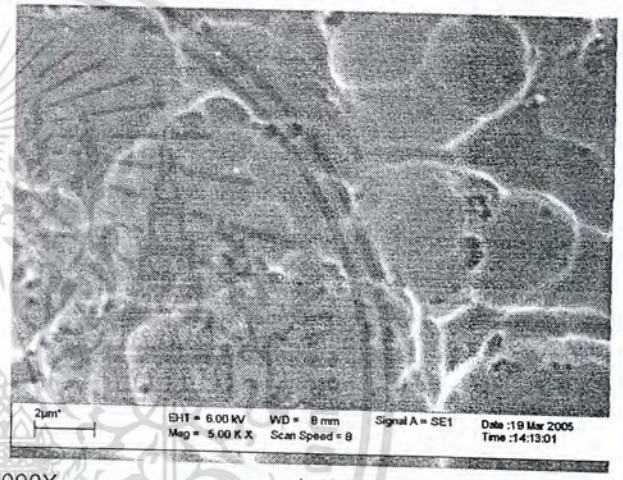


(10)

ที่กำลังขยาย 1000X

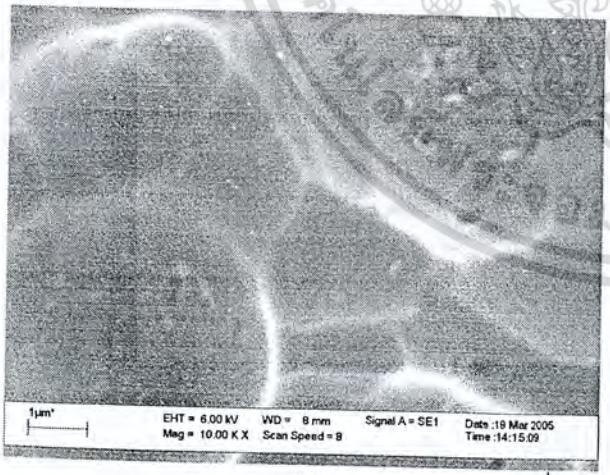


(8)

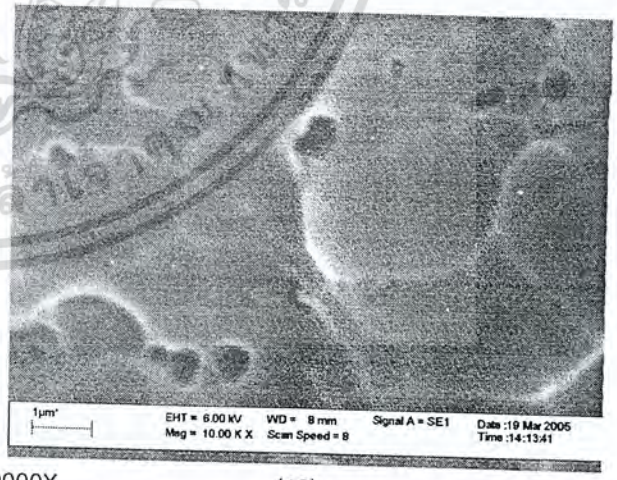


(11)

ที่กำลังขยาย 5000X



(9)



(12)

ที่กำลังขยาย 10000X

รูปที่ 5.1-2 แสดงสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริกและปรับสภาพผิวด้วยการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริก โดยรูปที่ (7),(8) และ(9) ปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก รูปที่ (10),(11) และ(12)ปรับสภาพผิวด้วยการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.1-1 และ 5.1-2 แสดงให้เห็นว่า

1) พื้นผิวที่ไม่ได้ปรับสภาพ

พื้นผิวไม่ราบเรียบ ปรากฏเป็นลายเส้น ซึ่งเป็นรอยที่เกิดจากการเตรียมชิ้นงานโดยการขัดด้วยกระดาษทรายแต่ไม่ปรากฏโครงสร้างออกไซด์ขึ้น

2) พื้นผิวที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต

พื้นผิวมีความขรุขระปรากฏให้เห็น เนื่องจากเกิดโครงสร้างของออกไซด์ขึ้นบนผิวหน้าของแผ่นอลูมิเนียมแต่ไม่สามารถสังเกตเห็นเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุน และมีลักษณะคล้ายรูปหกเหลี่ยมได้ เพียงแต่จะเห็นความขรุขระที่ชัดเจนขึ้นเมื่อเพิ่มกำลังขยายเท่านั้น

3) พื้นผิวที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโครมิกซัลฟูริก

พื้นผิวมีความขรุขระปรากฏให้เห็นเนื่องจากเกิดโครงสร้างของออกไซด์บนผิวหน้าของอะลูมิเนียม โดยสามารถสังเกตเห็นเป็นรูพรุนของทรงกลมทับซ้อนกันที่กำลังขยายต่ำๆ และเมื่อเพิ่มกำลังขยายจะเห็นเป็นโครงสร้างคล้ายรูปทรงหกเหลี่ยมทับซ้อนกันอยู่ โดยจะมีพื้นที่ผิวที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตและชิ้นงานที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว

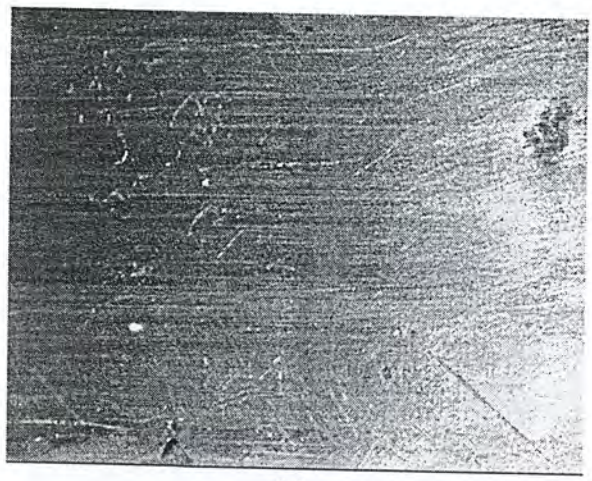
4) พื้นผิวที่ปรับสภาพโดยวิธีอะโนไดเซชัน

พื้นผิวมีลักษณะคล้ายกับพื้นผิวที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโครมิกซัลฟูริกโดยมี ความขรุขระ เนื่องจากเกิดโครงสร้างของออกไซด์บนผิวหน้าแต่มีความเป็นรูพรุนของทรงกลมที่ทับซ้อนกันมากกว่าชิ้นงานที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโครมิกซัลฟูริก และเกิดเป็นลักษณะคล้ายรูปทรงหกเหลี่ยมหลายๆรูปทับซ้อนกันรวมเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ทำให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับภาพถ่ายจากชิ้นงานที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต สารละลายโครมิกซัลฟูริก และชิ้นงานที่ไม่ได้ปรับสภาพ และเมื่อเพิ่มกำลังขยายจะทำให้เห็นความละเอียดของพันธะมากยิ่งขึ้น

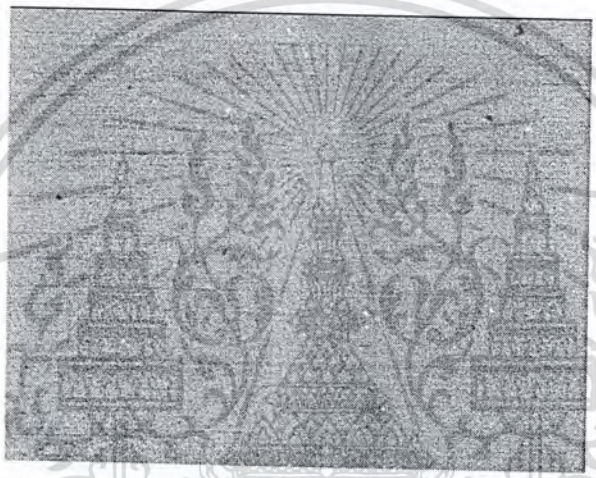
5.1.2 ผลการทดลองในส่วนของการวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมหลังการทดสอบโดยการลอก

5.1.2.1 ภาพถ่ายสภาพพื้นผิวโดยกล้องวีดีโอของแผ่นอะลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวโดยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต ปรับสภาพผิวโดยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก และปรับสภาพผิวโดยการอะโนไดเซชัน หลังจากการทดสอบสภาพโดยการลอก ดังรูปที่ 5.2

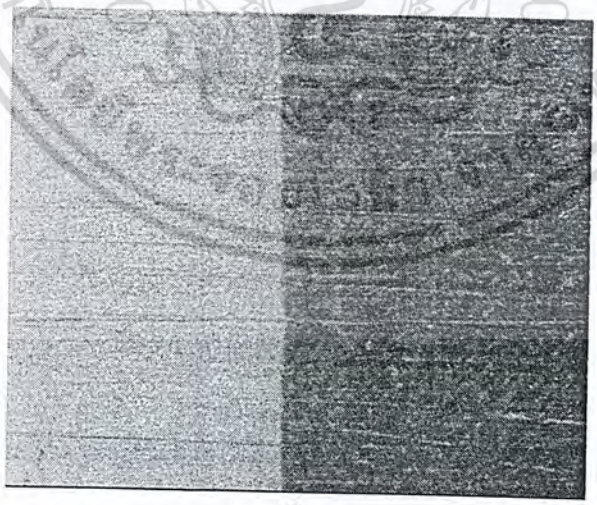
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(1)



(2)



(3)

รูปที่ 5.2 แสดงสภาพพื้นผิวหลังการลอกยางออกเปรียบเทียบกับพื้นผิวของโลหะที่ไม่มีเนื้อยาง ปกคลุมของชิ้นงานที่ปรับสภาพผิวด้วย (1)สารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (2)สารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก และ(3)ปรับสภาพผิวด้วยการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.2 แสดงว่า

1) พื้นผิวที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต

ไม่สังเกตเห็นชั้นของยางที่ติดอยู่บนแผ่นอะลูมิเนียม โดยสามารถสังเกตเห็นได้เพียงส่วนที่ลอกยางออกจะมีสีคล้ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนที่เป็นอะลูมิเนียม เนื่องจากชิ้นงานที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต เกิดชั้นของออกไซด์น้อยที่สุดเมื่อเปรียบ เทียบกับการปรับสภาพโดยวิธีการอื่นๆจึงเกิดพันธะยึดติดกับยางพาราน้อยมาก ดังนั้นหลังการทดสอบโดยการลอกยางออกจึงมีเนื้อยางติดอยู่บนแผ่นอะลูมิเนียมน้อยมาก และไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยภาพถ่ายจากกล้องวีดีโอ

2) พื้นผิวที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก

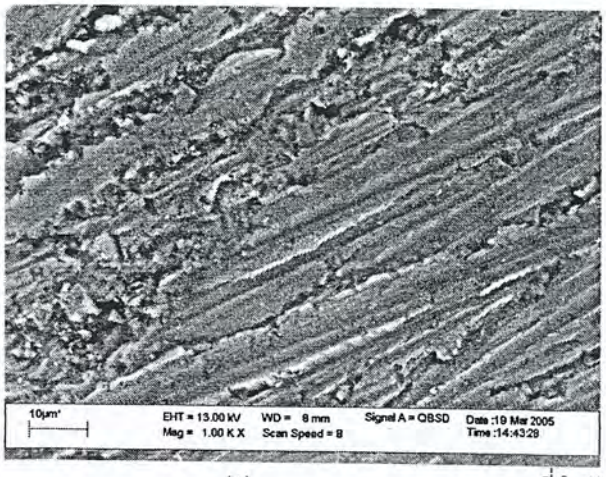
สังเกตเห็นเนื้อยางติดอยู่บนแผ่นอะลูมิเนียมเพียงบางๆ โดยความแตกต่างระหว่างส่วนที่ลอกยางออกกับส่วนเนื้อของอะลูมิเนียมสามารถสังเกตเห็นได้น้อยมาก เนื่องจากชิ้นงานหลังการปรับสภาพโดยใช้สารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก จะเกิดชั้นของออกไซด์ขึ้นที่ผิวของแผ่นอะลูมิเนียม ซึ่งความเป็นรูพรุนของโครงสร้างจะทำให้สามารถยึดติดกับยางพาราได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นหลังการทดสอบโดยการลอกยางออก จึงมีเนื้อยางบางส่วนติดอยู่บนแผ่นอะลูมิเนียมแต่ไม่มากนัก ดังนั้นภาพถ่ายจากกล้องวีดีโอจึงไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างระหว่างส่วนที่ลอกยางออกและส่วนที่เป็นเนื้ออะลูมิเนียมได้

3) พื้นผิวที่ปรับสภาพโดยวิธีอะโนไดเซชัน

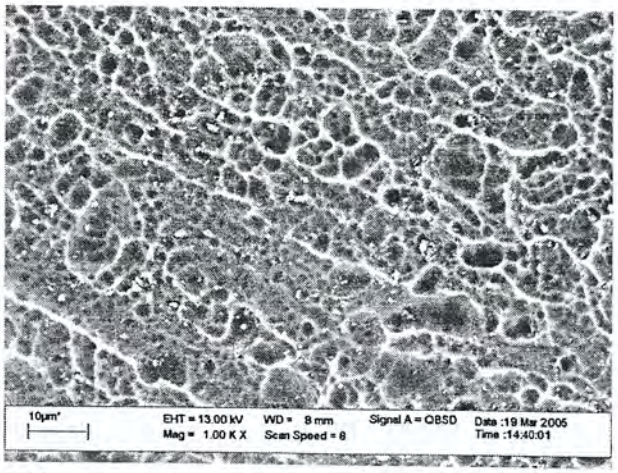
สังเกตเห็นเนื้อยางติดอยู่บนแผ่นอะลูมิเนียมเกิดความแตกต่างอย่างชัดเจน โดยสังเกตเห็นเป็นสีขาวปกคลุมอยู่ทั่วบริเวณที่ลอกยางออก และส่วนของเนื้ออะลูมิเนียมนั้นจะสังเกตเห็นเป็นสีดำ เนื่องจากชิ้นงานหลังจากการปรับสภาพโดยวิธีอะโนไดเซชัน จะเกิดชั้นของออกไซด์ที่ผิวของอะลูมิเนียม ซึ่งชั้นออกไซด์ที่เกิดจากการปรับสภาพโดยวิธีอะโนไดเซชันจะเป็นโครงสร้างที่มีความเป็นรูพรุนและพื้นที่ผิวมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตและสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก ดังนั้นหลังการทดสอบโดยการลอกยางออกจึงมีเนื้อยางติดอยู่บนพื้นผิวเป็นจำนวนมาก แม้สังเกตด้วยภาพถ่ายจากกล้องวีดีโอก็สามารถเห็นความแตกต่างระหว่างส่วนที่ลอกยางออกและส่วนที่เป็นเนื้ออะลูมิเนียมได้อย่างชัดเจน

5.1.2.2 ภาพถ่ายสภาพพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของแผ่นอะลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวโดยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต ปรับสภาพผิวโดยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก และปรับสภาพผิวโดยการอะโนไดเซชัน หลังจากการทดสอบสภาพโดยการลอก ดังรูปที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

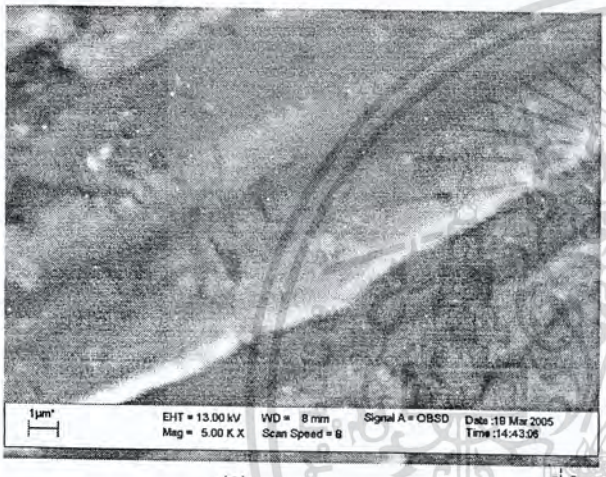


(1)

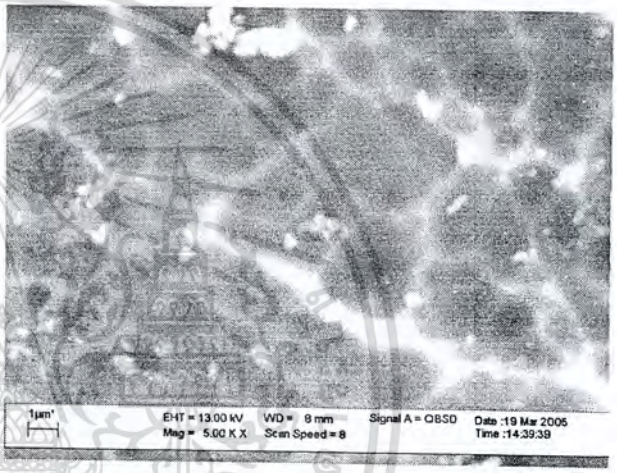


(4)

ที่กำลังขยาย 1000X

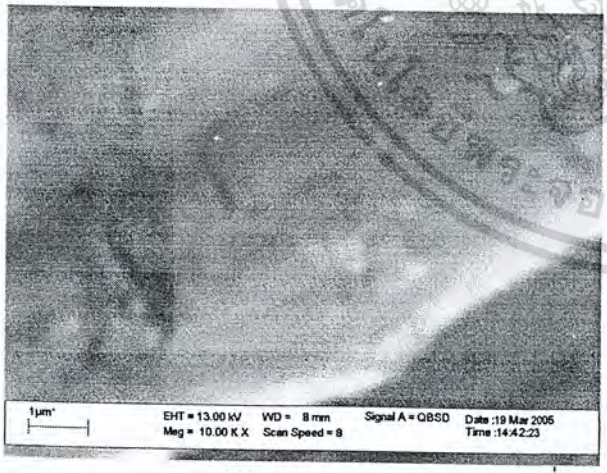


(2)

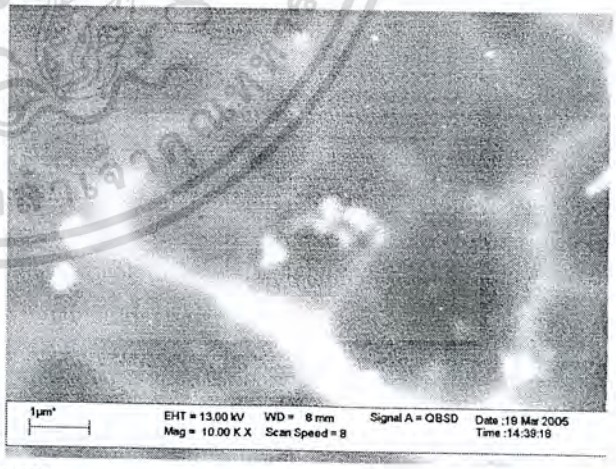


(5)

ที่กำลังขยาย 5000X



(3)

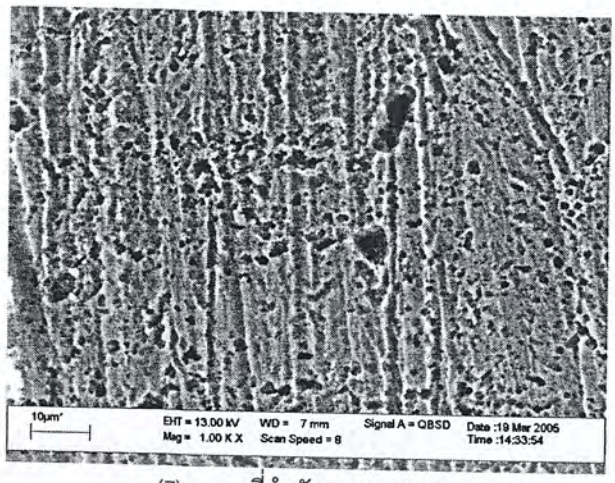


(6)

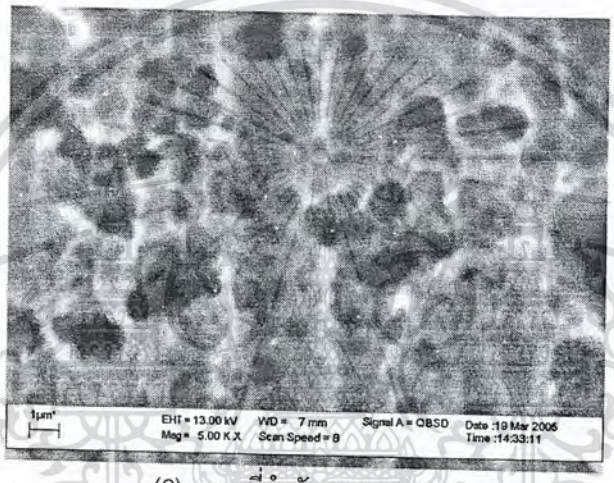
ที่กำลังขยาย10000X

รูปที่ 5.3-1 แสดงสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมหลังการลอกยางออก โดยรูปที่ (1),(2) และ (3)ปรับสภาพผิวด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต รูปที่ (4),(5) และ(6)ปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(7) ที่กำลังขยาย 1000X



(8) ที่กำลังขยาย 5000X

(9) ที่กำลังขยาย 10000X

รูปที่ 5.3-2 แสดงสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมหลังการลอกยางออก โดยรูปที่ (7),(8) และ (9) ซึ่งปรับสภาพผิวด้วยการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.3-1 และ 5.3-2 แสดงให้เห็นว่า

1) พื้นผิวที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต

พื้นผิวมีลักษณะไม่ราบเรียบ สังเกตเห็นเป็นแถบสีสว่างและสีคล้ำสลับกัน โดยพื้นที่ส่วนที่เป็นสีสว่างซึ่งเกิดจากการสะท้อนของอะลูมิเนียมจะมีบริเวณมากกว่าส่วนที่เป็นสีคล้ำจากการยึดติดของยาง เนื่องจากพื้นผิวที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต เกิดชั้นของออกไซด์น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการปรับสภาพโดยวิธีการอื่นๆ จึงเกิดพันธะยึดติดกับยางพาราน้อยมาก แต่จากภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดซึ่งมีกำลังขยายและความละเอียดของภาพสูงกว่าภาพถ่ายจากกล้องวีดีโอทำให้สามารถสังเกตเห็นเนื้อยางที่ติดอยู่บนแผ่นอะลูมิเนียมได้ แม้จะมีจำนวนน้อยก็ตาม

2) พื้นผิวที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก

พื้นผิวมีลักษณะไม่ราบเรียบ สังเกตเห็นเป็นกลุ่มของยางกระจายตัวอยู่ทั่วพื้นผิวของชิ้นงานโดยเห็นเป็นสีคล้ำและบางจุดมีการรวมตัวของยางมากจนสังเกตเห็นเป็นสีดำ และบางส่วนสังเกตเป็นสีสว่างเนื่องจากการสะท้อนของอะลูมิเนียม ซึ่งมีบริเวณน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกันชิ้นงานที่ ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต เนื่องจากชิ้นงานที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายกรดโครมิกซัลฟูริกจะเกิดชั้นของออกไซด์ขึ้นที่ผิวของแผ่นอะลูมิเนียมมากกว่า ซึ่งความเป็นรูพรุนของโครงสร้างจะทำให้สามารถยึดติดกับยางพาราได้ดียิ่งขึ้น หลังการทดสอบโดยการลอกจึงมีเนื้อยางติดปกคลุมอยู่บนแผ่นอะลูมิเนียมมากขึ้นทำให้ส่วนที่เป็นสีสว่างมีบริเวณน้อยลง และจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดทำให้สามารถสังเกตเห็นเนื้อยางที่ติดบนชิ้นงานได้ดีกว่าภาพถ่ายจากกล้องวีดีโอ

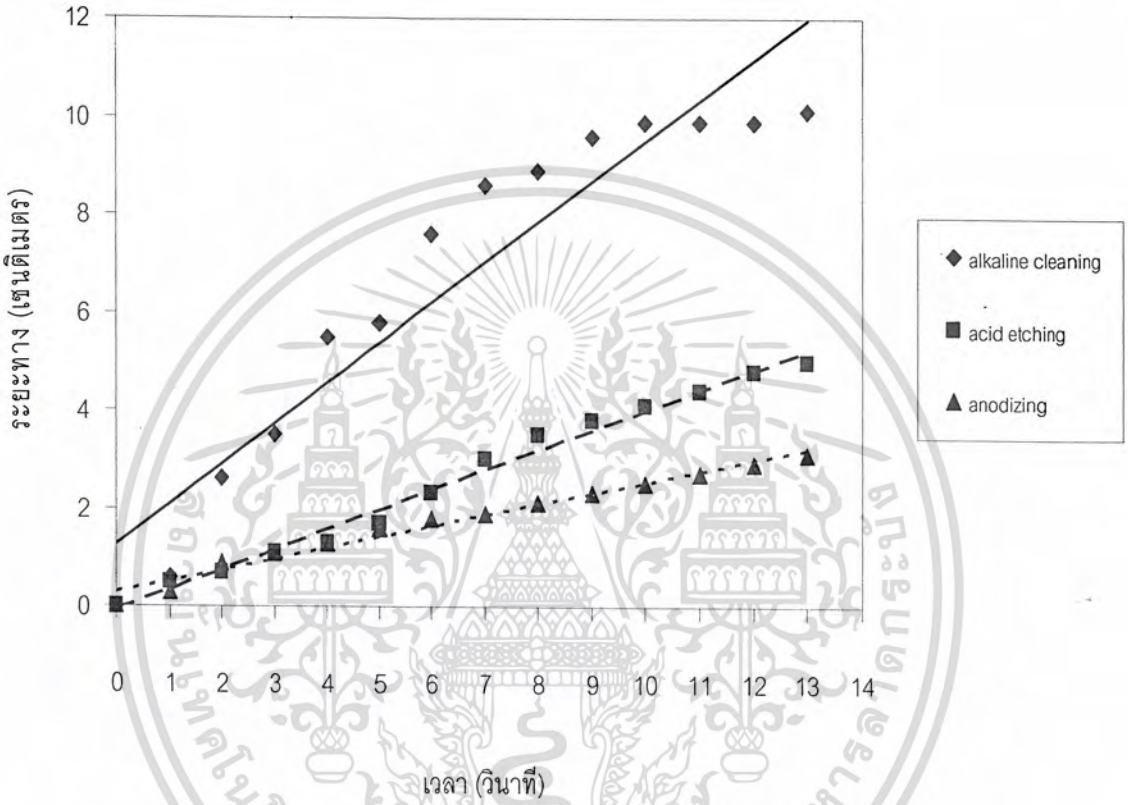
3) พื้นผิวที่ปรับสภาพโดยวิธีอะโนไดเซชัน

พื้นผิวมีลักษณะไม่ราบเรียบ สังเกตเห็นเป็นเนื้อยางปกคลุมทั่วบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานโดยสังเกตเห็นจุดที่มีการรวมตัวเป็นสีดำเนื่องจากเนื้อยางมีมากขึ้น และแทบไม่สังเกตเห็นส่วนที่เป็นสีสว่างของอะลูมิเนียม เนื่องจากชิ้นงานที่ปรับสภาพโดยวิธีอะโนไดเซชัน จะเกิดชั้นของออกไซด์ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนมากที่สุด ทำให้มีพื้นที่ผิวในการยึดติดกับยางพารามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตและสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก หลังการทดสอบโดยการลอกจึงมีเนื้อยางติดปกคลุมพื้นที่ส่วนที่เป็นอะลูมิเนียมจนเกือบหมดทำให้ส่วนที่เกิดเป็นสีสว่างลดน้อยลงมาก และจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดที่กำลังขยายสูงๆพบว่ายางจะติดอยู่กับแผ่นอะลูมิเนียมในลักษณะเป็นกลุ่มก้อน โดยติดมากในบางบริเวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ผลการทดลองจากการทดสอบโดยวิธีดึงลอก

5.2.1 การเปรียบเทียบสภาพการยึดติดระหว่างยางพารากับอะลูมิเนียมด้วยวิธีดึงลอก โดยใช้ตุ้มน้ำหนักถ่วงที่เท่ากัน เพื่อวัดความเร็วในการลอก และนำค่ามาเปรียบเทียบสภาพการยึดติดของการปรับสภาพผิวอะลูมิเนียมด้วยวิธีต่างๆ โดยแสดงผลตามรูปที่ 5.4 และตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ของระยะทางกับเวลาในการลอกของอะลูมิเนียมที่ปรับสภาพโดยการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต การเอชชิ่งด้วยสารละลายโครมิกซัลฟูริก และการอะโนไดเซชันในกรดฟอสฟอริก โดยใช้แรงในการลอกเท่ากับ 16.02 N/m

จากรูปที่ 5.4 สามารถหาความเร็วในการลอกได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะทางที่ลอกและเวลา ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบค่าความเร็วในการลอกของการปรับสภาพผิวอะลูมิเนียมด้วยวิธีต่างๆ

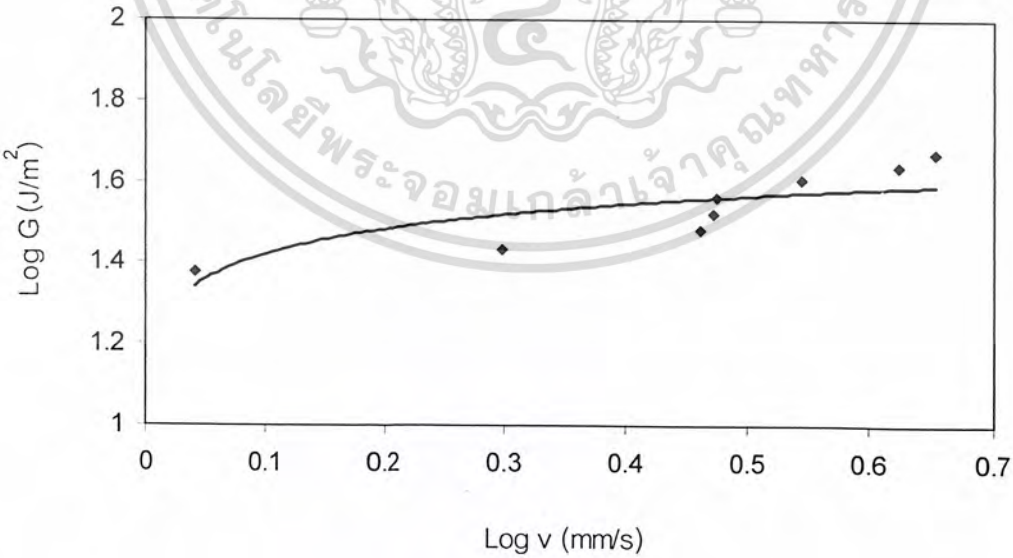
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการปรับสภาพผิวอะลูมิเนียม	ความเร็วในการลอก (มิลลิเมตรต่อวินาที)
การล้างด้วยสารละลายด่าง	8.24
การเอชชิ่ง	4.07
การอะโนไดเซชัน	2.23

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบความเร็วในการลอกของการปรับสภาพผิวอะลูมิเนียมด้วยวิธีต่างๆ

เมื่อใช้ตุ้มถ่วงน้ำหนักที่มีน้ำหนักเท่าๆกัน ชิ้นงานที่ปรับสภาพโดยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต จะมีอัตราเร็วในการลอกสูงที่สุด แสดงว่ามีความสามารถในการยึดติดน้อยกว่าชิ้นงานที่ปรับสภาพโดยวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริกซึ่งมีอัตราเร็วในการลอกมากกว่า และชิ้นงานที่ปรับสภาพโดยวิธีการอะโนไดเซชัน จะมีความสามารถในการยึดติดสูงที่สุดเนื่องจากมีความเร็วในการลอกต่ำที่สุด

5.2.2 ผลการทดลองจากการทดสอบการลอกโดยแสดงเป็นกราฟระหว่างพลังงานที่ใช้ในการลอกยางออกจากอะลูมิเนียมและความเร็วที่ใช้ในการลอกชิ้นงานที่ปรับสภาพโดยวิธีการอะโนไดเซชัน



รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการลอกยางออกจากอะลูมิเนียมและความเร็วที่ใช้ในการลอกชิ้นงานที่ปรับสภาพโดยวิธีการอะโนไดเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่าพลังงานที่ใช้ในการลอกยางออกจากอะลูมิเนียมแปรผันโดยตรงกับความเร็วของการลอกโดยความเร็วที่ทำการทดสอบอยู่ในช่วง 1.1 - 4.5 มิลลิเมตรต่อวินาที เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของกราฟในช่วงนี้กับงานวิจัยของ A.Namkanisorn และคณะ [11] พบว่ากลไกของการลอกของยางออกจากผิวโลหะ เป็นการลอกที่ผิวสัมผัส (Interfacial Mode) นั่นคือการลอกของสายโซ่ยางจะเกิดขึ้นโดยกลไกที่เรียกว่า chain pull out ซึ่งจะใช้พลังงานในการดึงลอกสูงขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของความเร็วที่ใช้ทดสอบในโครงงานนี้ เราจึงไม่สามารถบอกได้ว่าเมื่อความเร็วมีค่ามากเพียงพอ กลไกของการลอกจะเปลี่ยนเป็นการลอกโดย chain scission หรือไม่

และผลของภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด พบว่ามีเนื้อยางติดอยู่บนพื้นผิวของอะลูมิเนียมเพียงบางๆ เท่านั้นจึงเป็นการยืนยันว่าการลอกของยางออกจากผิวโลหะเป็นการลอกที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลและวิเคราะห์

6.1 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียม

6.1.1 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมภายหลังการปรับสภาพโดยวิธีการต่างๆ

การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวโดยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต วิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก วิธีการอะโนไดเซชัน และไม่ได้ปรับสภาพผิว พบว่าสภาพพื้นผิวของแผ่นอะลูมีเนียมที่ปรับสภาพผิวโดยวิธีการอะโนไดเซชันมีความขรุขระเกิดบนผิวหน้าของแผ่นอะลูมิเนียมมากที่สุด เนื่องจากเกิดชั้นของออกไซด์ที่มีรูพรุนและพื้นที่ผิวมากที่สุด โดยมีความหนาของชั้นออกไซด์ประมาณ 50 -100 นาโนเมตร [12] รองลงมาคือชิ้นงานที่แผ่นอะลูมิเนียมปรับสภาพผิวโดยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก และชิ้นงานที่ปรับสภาพผิวโดยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตเกิดความขรุขระและพันธะออกไซด์น้อยที่สุด ส่วนสภาพพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวไม่สังเกตเห็นความขรุขระบนผิวหน้าของแผ่นอะลูมิเนียม

6.1.2 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมภายหลังการทดสอบโดยวิธีดึงลอก

การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมภายหลังการทดสอบโดยวิธีดึงลอกของแผ่นอะลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวโดยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต วิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก วิธีการอะโนไดเซชัน และไม่ได้ปรับสภาพผิว พบว่าสภาพพื้นผิวของแผ่นอะลูมีเนียมที่ปรับสภาพผิวโดยวิธีการอะโนไดเซชันมีเนื้อยางติดอยู่บนพื้นผิวมากที่สุดเนื่องจากเกิดโครงสร้างของชั้นออกไซด์ที่มีรูพรุน และพื้นที่ผิวมากจึงเกิดการซึมผ่านของยางพาราเข้าไปเกิดพันธะยึดติดได้ดีเมื่อทดสอบโดยการลอกแล้วจึงยังมีเนื้อยางติดอยู่บนพื้นผิวมากที่สุดรองลงมาคือแผ่นอะลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวโดยวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริกและแผ่นอะลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวโดยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตมีเนื้อยางติดอยู่บนพื้นผิวน้อยที่สุดตามลำดับ ส่วนสภาพพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวจะไม่พบเนื้อยางติดอยู่บนพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมเนื่องจากไม่เกิดการสร้างพันธะยึดติดระหว่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การทดสอบสภาพยึดติดโดยวิธีดึงลอก

การทดสอบสภาพยึดติดโดยวิธีการลอกของชิ้นงานที่แผ่นอะลูมิเนียมปรับสภาพผิวโดยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต การกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก การอะโนไดเซชัน และชิ้นงานที่แผ่นอะลูมิเนียมไม่ได้ปรับสภาพผิว พบว่าชิ้นงานที่แผ่นอะลูมิเนียมปรับสภาพผิวโดยวิธีการอะโนไดเซชันมีความแข็งแรงของการยึดเกาะกันสูงที่สุด รองลงมาคือชิ้นงานที่แผ่นอะลูมิเนียมปรับสภาพผิวโดยวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก และการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตตามลำดับ ส่วนชิ้นงานที่แผ่นอะลูมิเนียมไม่ได้ปรับสภาพผิวไม่สามารถทดสอบโดยวิธีการลอกได้

และเมื่อทดสอบโดยใช้ตุ้มน้ำหนักที่มีน้ำหนักเท่ากันถ่วง พบว่าชิ้นงานที่แผ่นอะลูมิเนียมปรับสภาพผิวโดยวิธีการอะโนไดเซชันจะมีความเร็วที่ใช้ในการลอกน้อยที่สุด รองลงมาคือชิ้นงานที่แผ่นอะลูมิเนียมปรับสภาพผิวโดยวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก และชิ้นงานที่แผ่นอะลูมิเนียมปรับสภาพผิวโดยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต จะมีความเร็วที่ใช้ในการลอกสูงที่สุด สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพโดยวิธีการอะโนไดเซชันจะเกิดชั้นของออกไซด์ขึ้นมาใหม่ ด้วยโครงสร้างที่เป็นรูพรุนและพื้นที่ผิวของชั้นออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เกิดการซึมผ่านของอนุภาคยางพาราเข้าไปเกิดพันธะกับชั้นของออกไซด์นั้นได้มากกว่า ทำให้เกิดเป็นพันธะยึดติดที่มีความแข็งแรงมากที่สุด ความเร็วที่ใช้ในการลอกจึงมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณีของชิ้นงานที่ผ่านการปรับสภาพโดยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟตที่มีความเร็วในการลอกน้อยที่สุด และมีความแข็งแรงของพันธะยึดติดน้อยที่สุด

และจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและความเร็วที่ใช้ในการลอกของชิ้นงานที่ถูกปรับสภาพโดยวิธีการอะโนไดเซชันทำให้ทราบว่าการฉีกขาดเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของอะลูมิเนียมและยางพารา (Interfacial Failure Mode) แต่ผลจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดพบเนื้อยางติดอยู่บนพื้นผิวของอะลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวโดยวิธีการอะโนไดเซชัน ทำให้ทราบว่าการฉีกขาดบนพื้นผิวนั้นไม่ได้เกิดแต่เฉพาะที่พื้นผิวเสียทีเดียว หากแต่เป็นการฉีกขาดที่ผิวและมีเนื้อยางติดอยู่บนพื้นผิวด้วยบางส่วน ดังนั้นจึงอาจเรียกลักษณะการฉีกขาดว่าเป็นแบบ Interfacial Mixed Failure Mode เช่นเดียวกับชิ้นงานที่ปรับสภาพผิวโดยวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริกก็พบเนื้อยางพาราติดอยู่บนแผ่นอะลูมิเนียมเช่นเดียวกัน ส่วนชิ้นงานที่ถูกปรับสภาพโดยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต ผลจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดพบเนื้อยางติดอยู่บนพื้นผิวของอะลูมิเนียมน้อยมาก แสดงว่าการฉีกขาดเกิดที่ผิวสัมผัสระหว่างยางพารากับอะลูมิเนียมเท่านั้น (Interfacial Failure Mode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าพลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสของชิ้นงานที่ปรับสภาพโดยวิธีการอะโนไดเซชัน ซึ่งเป็นวิธีที่มีพลังงานที่ใช้ในการแยกพันธะสูงที่สุด พบว่ามีค่าพลังงานอยู่ในช่วงของแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากแรงแวนเดอร์วาล์วไม่ใช่แรงจากพันธะเคมี

6.3 วิจารณ์ผลการทดลอง

6.3.1 เนื่องจากแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปไม่แนบสนิทกับชิ้นงานเพียงพอ ทำให้มีเนื้อนางบางส่วนซึมออกมาบริเวณด้านข้าง เมื่อทำการทดสอบสภาพการยึดติดด้วยวิธีการลอกจะเกิดเส้นใยบางๆ ดึงเนื้อยางไว้ไม่ให้หลุดลอกออกจากชิ้นงาน ทำให้ผลการทดลองที่ได้อาจมีค่าคลาดเคลื่อนไป

6.3.2 หลังการปรับสภาพผิวโลหะด้วยวิธีต่างๆแล้ว ผิวของอะลูมิเนียมจะมีความว่องไวสูง อาจสร้างพันธะกับสิ่งเจือปนได้ หากไม่ขึ้นรูปทันที

6.3.3 ในการทดลองมีการใช้สารเคมีหลายชนิดที่สามารถระเหยได้ และไม่ได้ทำการทดลองในระบบปิดทำให้สารเคมีดังกล่าวมีค่าความเข้มข้นคลาดเคลื่อนไป

6.3.4 ในการทดสอบสภาพการยึดติดด้วยวิธีดึงลอก เมื่อปล่อยตุ้มน้ำหนัก ผลของแรงเหวี่ยงในช่วงแรกอาจทำให้ความเร็วในการลอกคลาดเคลื่อนไปบ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
ข้อเสนอแนะ

7.1 การเก็บรักษายางพาราควรเก็บในอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพและการแข็งตัว ของยางพาราเนื่องจากการระเหยของแอมโมเนีย และทำการทดลองโดยเปลี่ยนสูตรในการเตรียมยางเพื่อหาผลที่มีต่อสภาพการยึดติด

7.2 ควรศึกษาหาอุณหภูมิที่เหมาะสมก่อนการอบยาง เพื่อป้องกันยางไหม้และหดตัวออกจากแม่พิมพ์

7.3 ควรออกแบบแม่พิมพ์ให้แนบสนิทกับชิ้นงานมากที่สุดเพื่อป้องกันยางซึมออกด้านข้างของแม่พิมพ์

7.4 ควรขึ้นรูปยางพาราทันทีหลังการปรับสภาพผิวโลหะ

7.5 ควรทำการทดลองสภาพการยึดติดด้วยวิธีลอกผิวในสภาวะที่มีน้ำหรือความชื้น เพราะในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง การแยกออกจากกันระหว่างยางพาราทับ โลหะจะมีน้ำและความชื้นเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

7.6 ควรทำการทดลองสภาพการยึดติดด้วยวิธีลอกผิวในสภาวะอุณหภูมิต่างๆ เพื่อหาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการยึดติด

7.7 ในการทดสอบสภาพการยึดติดด้วยวิธีดึงลอกควรปล่อยตุ้มน้ำหนักโดยไม่ให้เกิดการแกว่ง เพื่อให้มีผลของน้ำหนักและแรงโน้มถ่วงเท่านั้น

7.8 ปรับสภาพผิวโดยวิธีการอะโนไดเซชันโดยเปลี่ยนค่าของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เพื่อศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อสภาพการยึดติด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Edward M. Petrie. (2000). *Handbook of adhesive and sealant* : McGraw-Hill Companies,inc.
2. Rob D.F.M. Taalman (1996), *Isoprene : Background and Issues, Toxicology* 113, p.242
3. J.W. McBain and D.G. Hopkins, *J Phys Chem.* 29-88 (1925).
4. K.L. Mittal and A. Pizzi, *Adhesion Promotion Techniques*. Marcel Dekker, New York (1999).
5. A. Namkanisorn, *An Arrhenius Method to Study the Hydrolytic Stability of Polymer-Metal Adhesion*. Ph.D. Thesis Lehigh University (2002).
6. E.P. Plueddemann. et. al. (1982). *Silane coupling agent*. Plenum. Newyork
7. W. Brockmann, O.-D. Hennemann, H. Kollek and C. Matz, *Int. J. Adhesion Adhesives*. 115-143 (1996).
8. Y. Bunsanong, *Effect of Fibre Surface Treatment on the Interfacial Adhesion between Aramid Fibre and Thermoplastic Elastomer*. M.D. Thesis Mahidol University (2001).
9. G.A.Nitowski. (1998) *Topographic and Surface Chemical Aspect of the Adhesion of Structural Epoxy Resin to Phosphorus Oxoacid Treated Aluminum Adherends*. Ph.D.Thesis Virginia Polytechnic Institute and State University.
10. H.M. Clearfield, D.K. McNamara and G.D. Davis, *Adhesive Bonding*. Plenum Press, New York (1982).
11. A.Namkanisorn. et. al. (2001). *A kinetic approach to study the hydrolytic stability of polymer-metal adhesion*. Ph.D.Thesis of Department of Chemical Engineering and Polymer Interface center, Lehigh University
12. K.L. Mittal, *Silane and Other Coulping Agents*. Utrecht (1992).

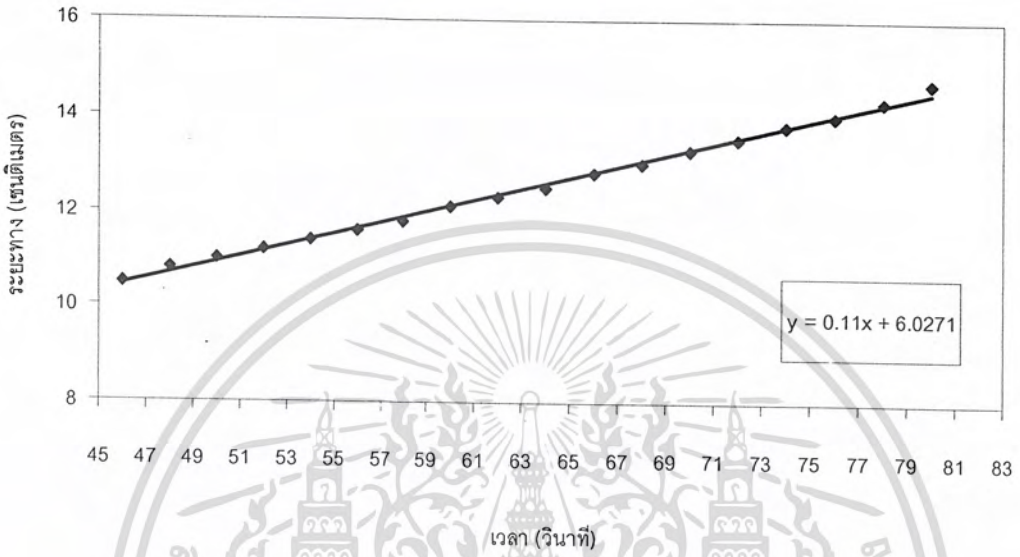
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

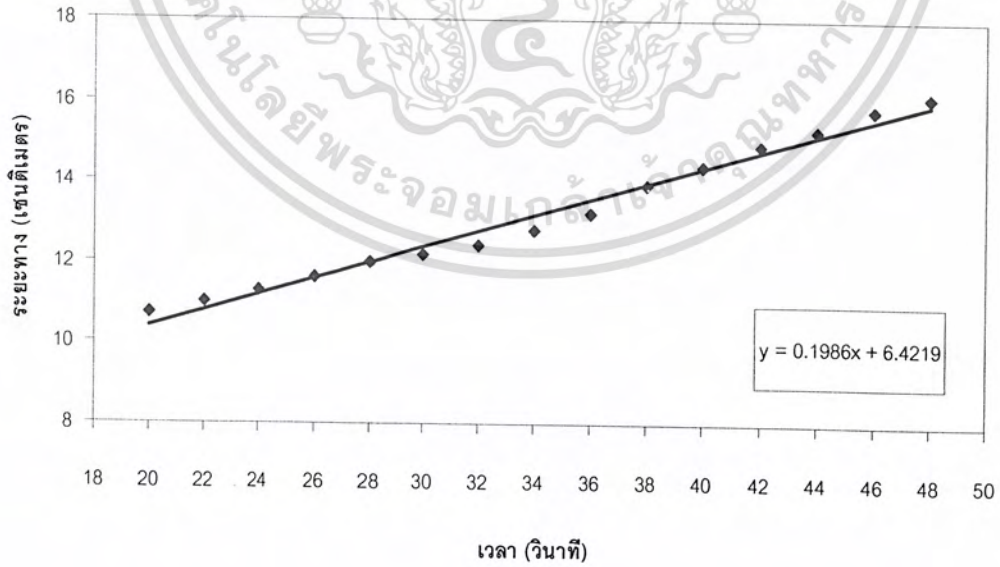
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลา ในการทดสภาพการยึดติดด้วยการลอกบนโลหะที่ปรับสภาพด้วยวิธีอะโนไดเซชัน โดยใช้ตุ้มน้ำหนักที่น้ำหนักต่างๆ

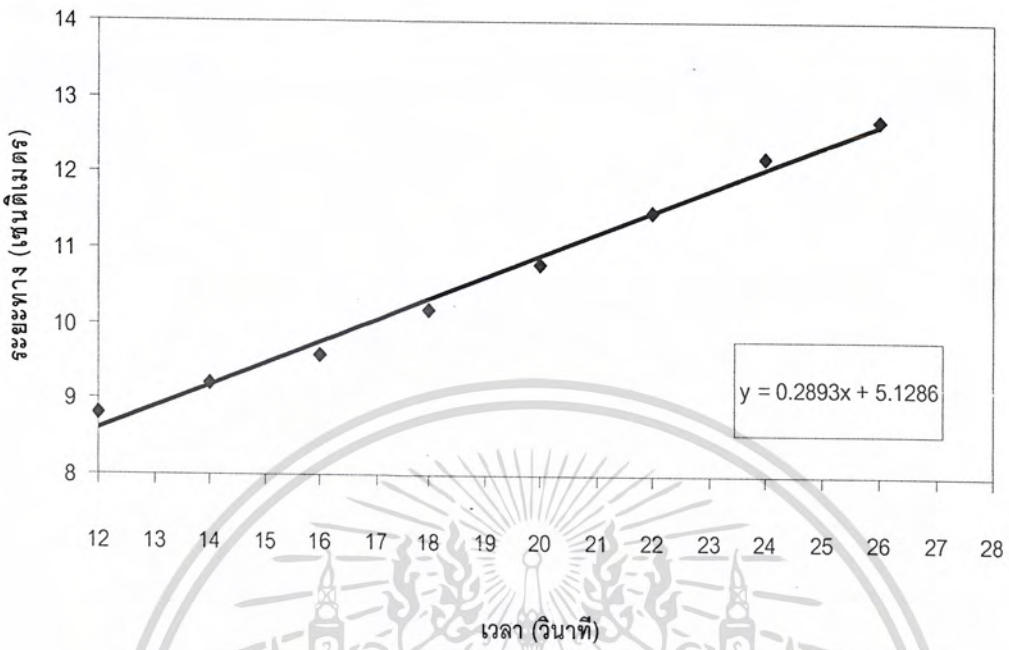


รูปที่ ก.1 แสดงอัตราเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 43.85 กรัม

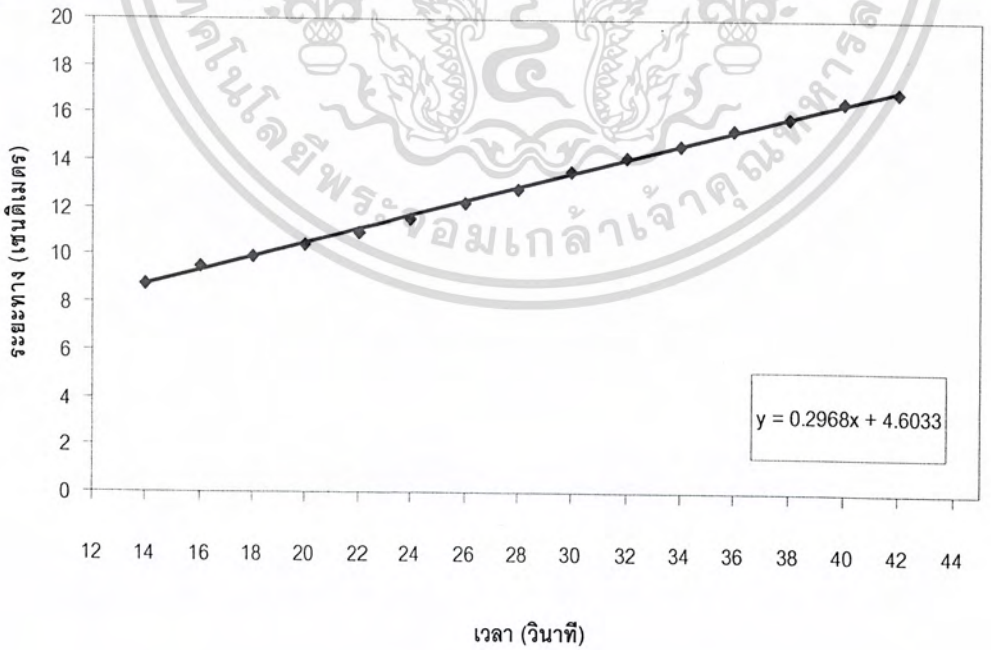


รูปที่ ก.2 แสดงอัตราเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 49.69 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

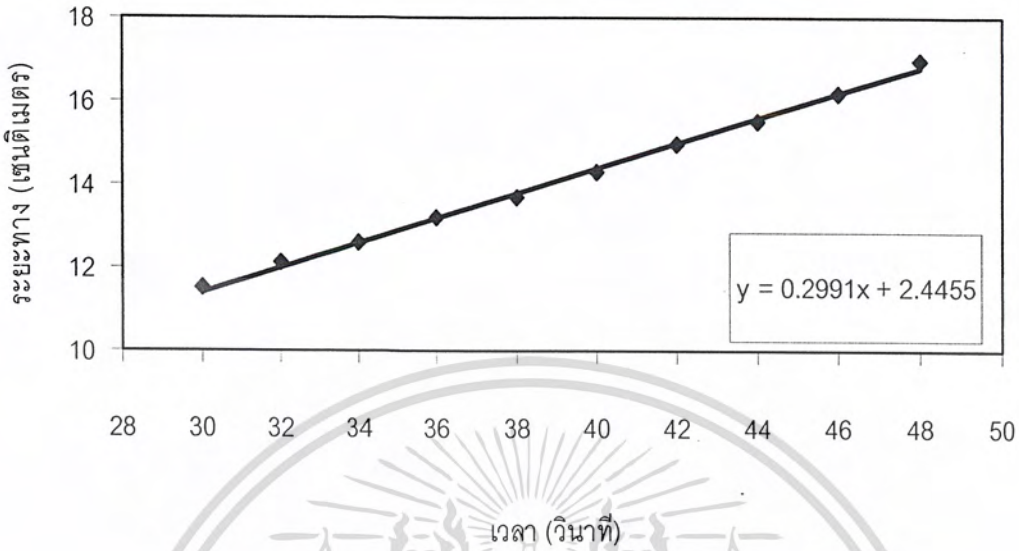


รูปที่ ก.3 แสดงอัตราเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 55.54 กรัม

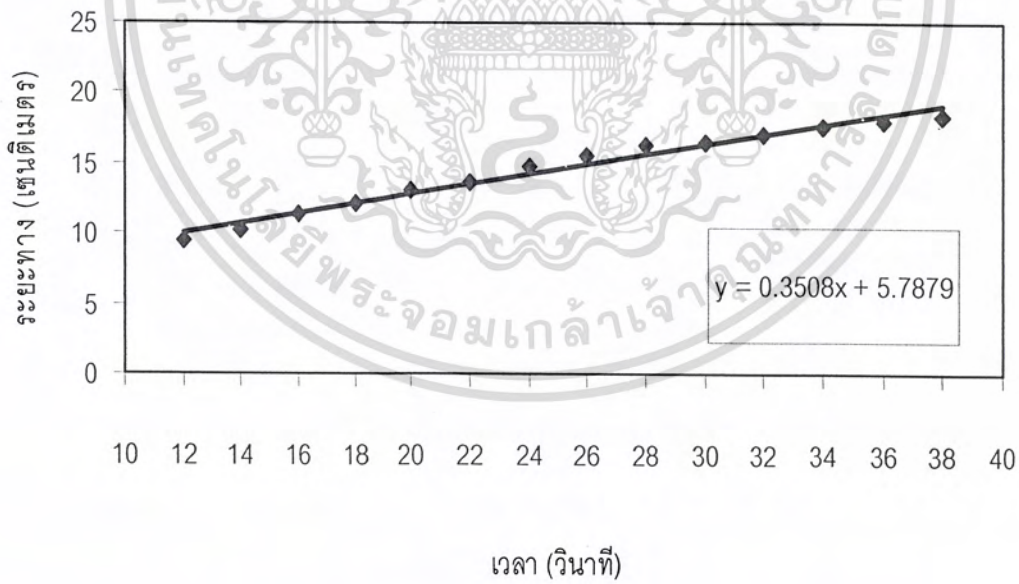


รูปที่ ก.4 แสดงอัตราเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 61.05 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

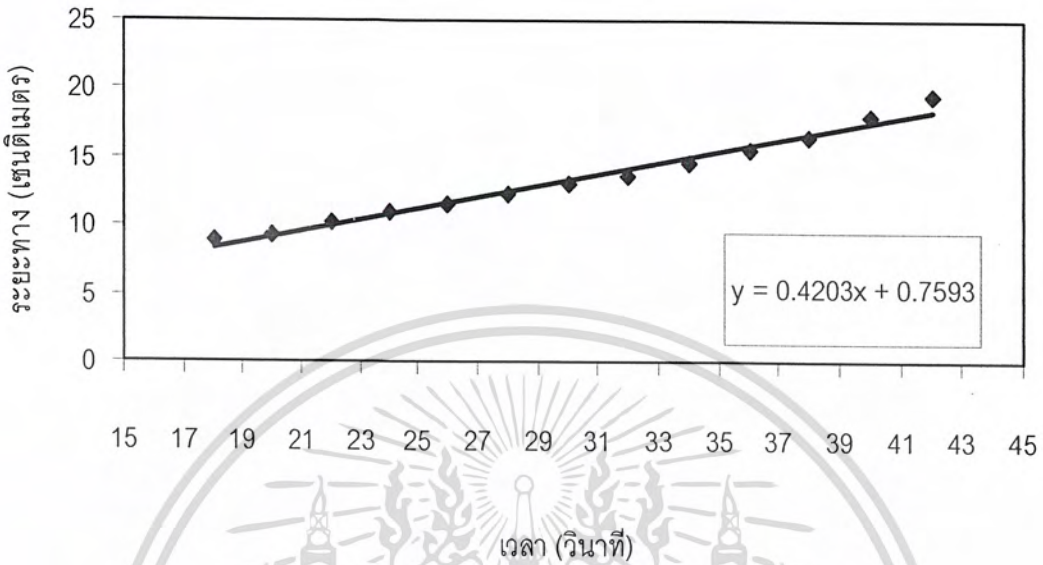


รูปที่ ก.5 แสดงอัตราเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 66.90 กรัม

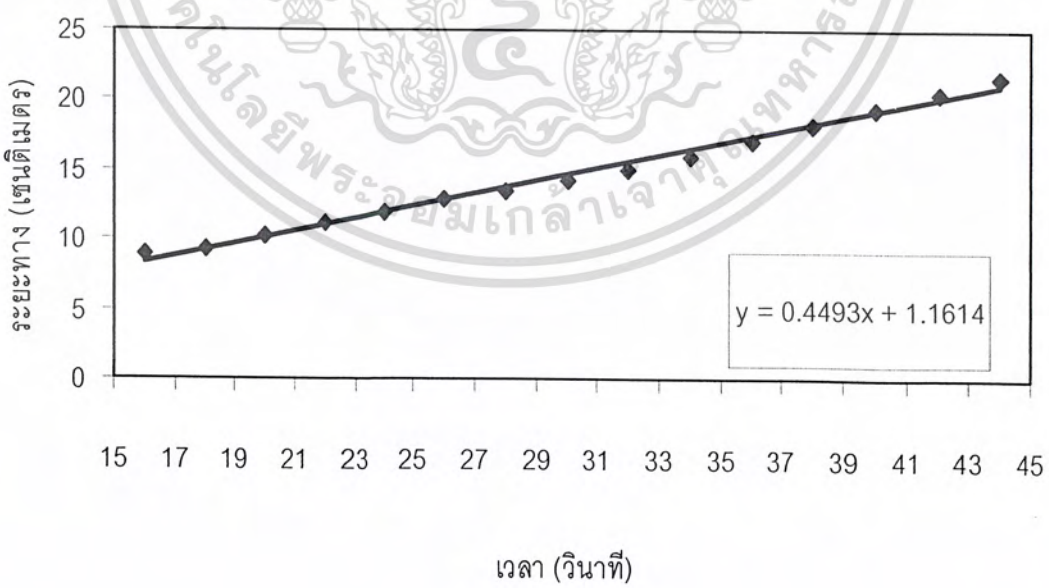


รูปที่ ก.6 แสดงอัตราเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 74.22 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.7 แสดงอัตราเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 80.06 กรัม

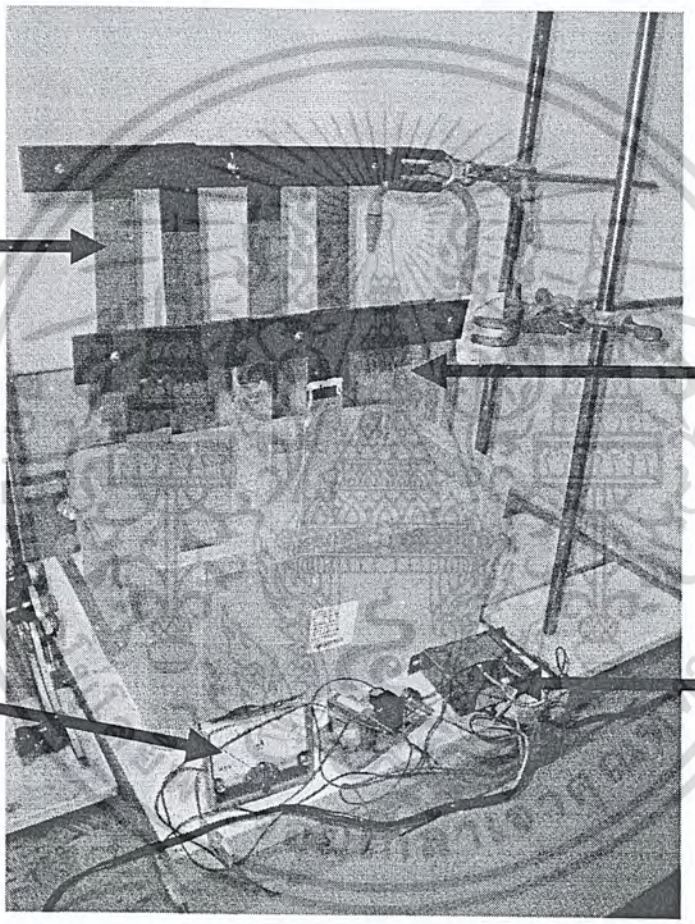


รูปที่ ก.8 แสดงอัตราเร็วในการลอกโดยใช้น้ำหนัก 85.90 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

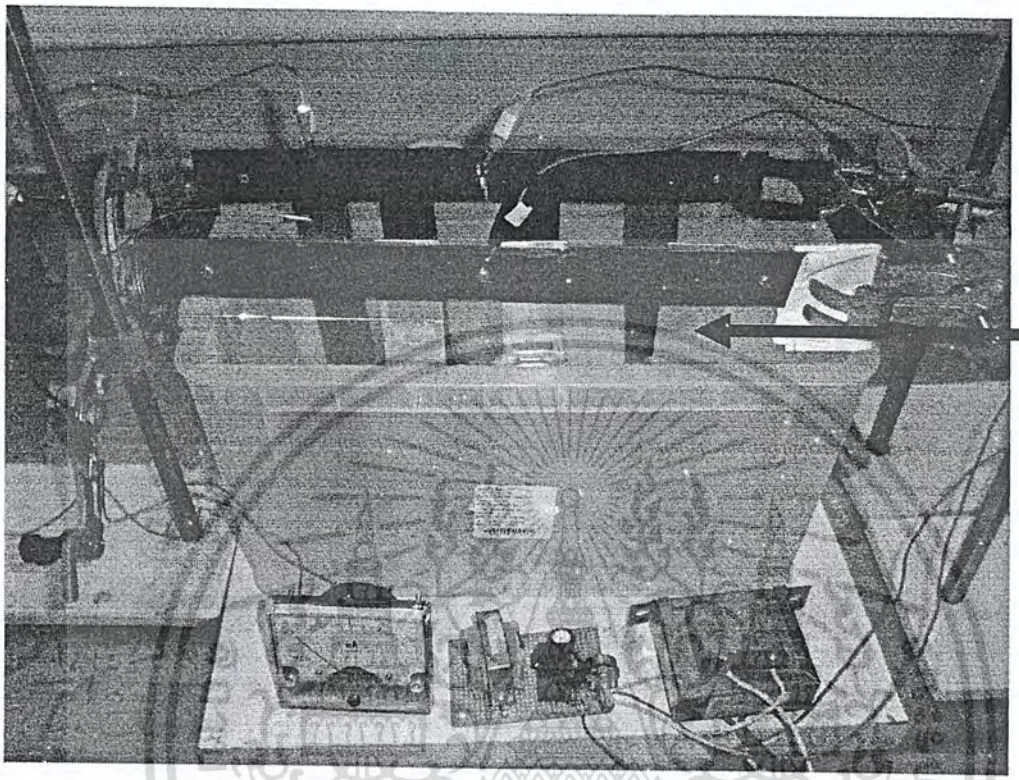
ภาคผนวก ข

แสดงชุดเครื่องมือสำหรับปรับสภาพผิวโลหะด้วยวิธีการอะโนไดเซชัน



รูปที่ ข.1 แสดงเครื่องมืออะโนไดเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

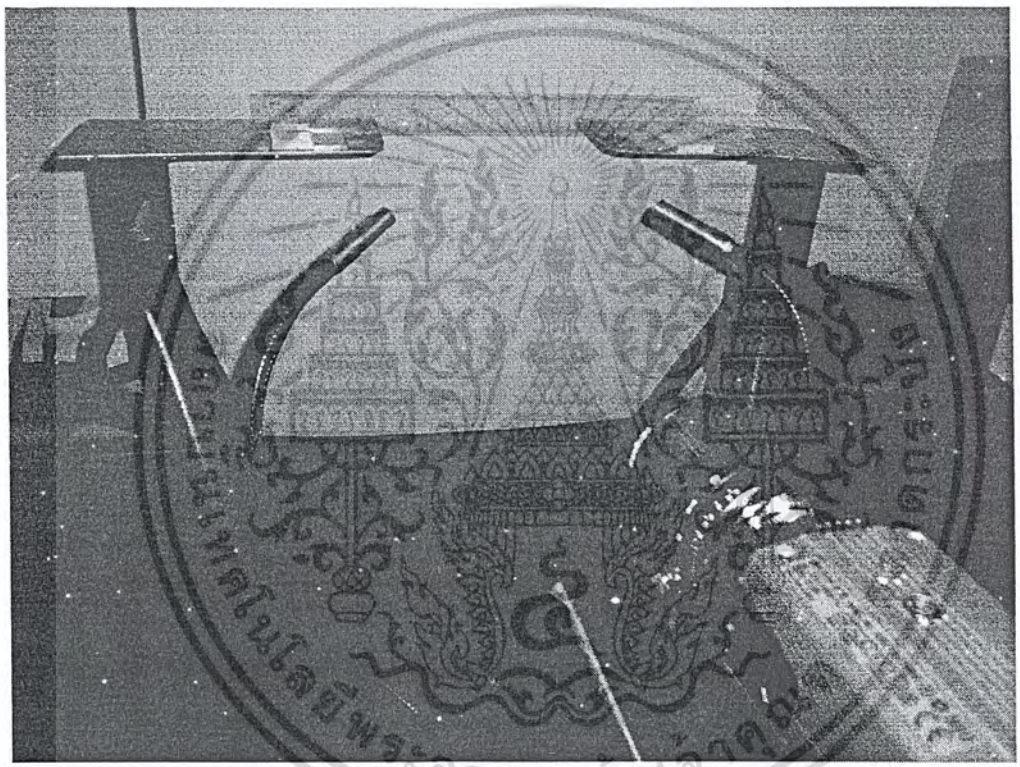


รูปที่ ข.1 แสดงภาพขณะอะโนไดเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

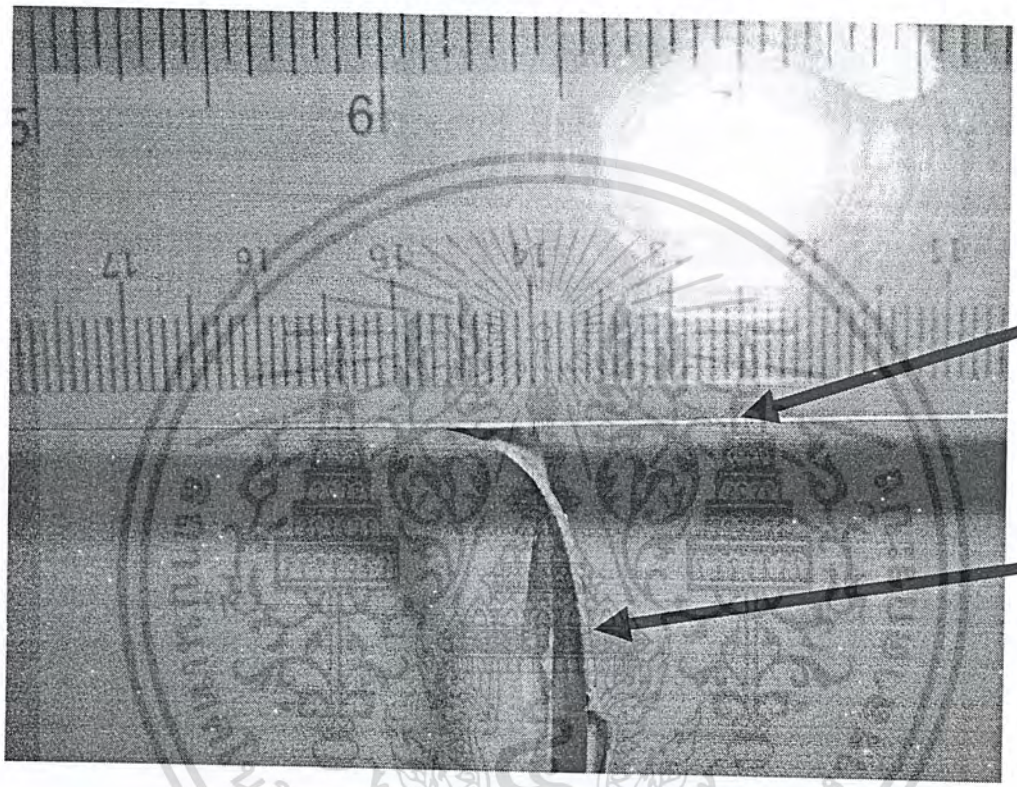
ภาคผนวก ค

แสดงชุดเครื่องมือสำหรับการทดสอบสภาพการยึดติดด้วยการลอกและขณะทำการลอก



รูปที่ ค.1 แสดงชุดเครื่องมือสำหรับการทดสอบสภาพการยึดติดด้วยการลอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.2 แสดงชิ้นงานขณะทำการลอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้