

การเพิ่มการยึดติดระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียมโดยใช้สารคู่ควบไซเลน

ENHANCEMENT OF ADHESION BETWEEN NATURAL RUBBER AND  
ALUMINIUM USING SILANE COUPLING AGENT

อนุพงศ์ ศรีรักษา  
ANUPONG SCRAKSA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2009-EN-M-220-153

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเพิ่มการยึดติดระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียมโดยใช้สารคู่ควบไซเลน

ENHANCEMENT OF ADHESION BETWEEN NATURAL RUBBER AND  
ALUMINIUM USING SILANE COUPLING AGENT



อนุพงศ์ สอรัक्षा

ANUPONG SORAKSA

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 87865  
วัน,เดือน,ปี.....19...สิ.ศ. 2552

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2551

KMITL-2008-EN-M-220-153

**ENHANCEMENT OF ADHESION BETWEEN NATURAL RUBBER AND  
ALUMINIUM USING SILANE COUPLING AGENT**

**ANUPONG SORAKSA**

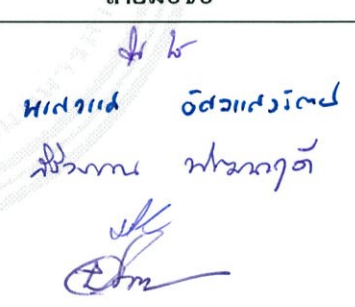
**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2008  
KMITL-2008-EN-M-220-153**

**COPYRIGHT 2008**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเพิ่มการยึดติดระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียมโดยใช้สารคู่ควบไซเลน  
Thesis Title Enhancement of Adhesion Between Natural Rubber and Aluminium Using Silane  
Coupling Agent  
นักศึกษา นายอนุพงษ์ สอรัชชา  
รหัสประจำตัว 48060114  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.อภิวัฒน์ นัมคณิศรณ  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2008-EN-M-220-153

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.สุธาสนี	เนรมิตตกพงศ์	
ดร.พรสวรรค์	อัสวแสงรัตน์	
ดร.สิริวรรณ	พัฒนาฤดี	
รศ.ดร.ประกอบ	กิจไชยา	
ผศ.ดร.อภิวัฒน์	นัมคณิศรณ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 26 กันยายน พ.ศ. 2551 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 26 กันยายน พ.ศ. 2551

<b>หัวข้อวิทยานิพนธ์</b>	การเพิ่มการยึดติดระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียมโดยใช้สาร กลุ่มควาไซเลน
<b>นักศึกษา</b>	นายอนุพงศ์ สอรักษา
<b>รหัสประจำตัว</b>	48060114
<b>ปริญญา</b>	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
<b>สาขาวิชา</b>	วิศวกรรมเคมี
<b>พ.ศ.</b>	2551
<b>อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์</b>	ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งในการเพิ่มความสามารถในการยึดติดกันระหว่างยางธรรมชาติกับพื้นผิวของอะลูมิเนียม โดยทำการปรับสภาพผิวแผ่นอะลูมิเนียมด้วยวิธีการเอทซิงด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกและการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริก ซึ่งจากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การปรับสภาพผิวแบบอะโนไดเซชันจะทำให้เกิดชั้นออกไซด์ที่มีรูพรุนมีรูปร่างหกเหลี่ยมคล้ายรังผึ้งที่มีขนาดใกล้เคียงกัน และมีความสูงของชั้นออกไซด์ที่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน ส่วนการปรับสภาพผิวโลหะด้วยการเอทซิงในสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกจะทำให้เกิดชั้นออกไซด์ที่มีขนาดใหญ่กว่าออกไซด์จากการอะโนไดเซชัน และมีความสูงของชั้นออกไซด์น้อยกว่ากรณีแรกมาก เมื่อทำการทดสอบความแข็งแรงของผิวสัมผัสด้วยวิธีการดึงลอกยางออกจากผิวของอะลูมิเนียมพบว่า ผิวสัมผัสในกรณีของการอะโนไดเซชันมีความแข็งแรงมากที่สุดเมื่อเทียบกับการเอทซิงในสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกและถ้าไม่มีการปรับสภาพใดๆ ยางแทบจะไม่ติดกับอะลูมิเนียม เมื่อผสมสารกลุ่มควาไซเลนคือ bis(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulphane (TESPT) ลงไปในเนื้อยางก่อนการขึ้นรูป พบว่าความแข็งแรงของผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารกลุ่มควาไซเลนที่เติมลงไปโดยความเข้มข้นที่ศึกษาอยู่ในช่วง 4, 6, 10, 15 และ 20 % โดยน้ำหนัก นอกจากนี้พบว่าความเร็วของการลอกขึ้นกับอุณหภูมิอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อทำการดึงลอกที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส ความเร็วของการลอกจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยมีความสัมพันธ์กับส่วนกลับของอุณหภูมิในลักษณะของฟังก์ชันอาร์เรเนียส ซึ่งจากผลการทดลองค่าพลังงานกระตุ้นในการลอกในกรณีของการปรับสภาพผิวโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกเท่ากับ 5.15 kcal/mol และ โดยการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริกมีค่าเท่ากับ 6.36 kcal/mol ตามลำดับ

<b>Thesis Title</b>	Enhancement of adhesion between natural rubber and aluminum using silane coupling agent
<b>Student</b>	Mr.Anupong Soraksa
<b>Student ID.</b>	48060114
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Chemical Engineering
<b>Year</b>	2008
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Dr. Apinan Namkanisorn

## **ABSTRACT**

This research aims to improve the adhesion of natural rubber to aluminum surface. Prior to bonding, aluminum sheets were pretreated by chromic sulfuric acid etching and phosphoric acid anodization. SEM micrographs of the surface treated by phosphoric acid anodization revealed that the oxide is of a porous structure with hexagonal, honeycomb-like shape with a uniform cell size. However, sulfuric acid etching yielded larger oxide structure and thinner oxide layer. Testing of the interfacial strength was done using a 90° peel test, in which one end of rubber was pulled apart from the aluminum surface using a fixed load. The anodized surface was found to have higher interfacial strength than etched surface, while untreated surface was not adhere to the aluminum surface very well. A silane coupling agent, namely, bis(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulphane (TESPT) was added to the rubber latex before curing to improve the adhesion. The peel results revealed that the interfacial strength increased with concentration of silane coupling agent. The concentration of silane in this study was varied from 4, 6 , 10, 15 and 20% by wt. The effects of temperature to the peel velocity were also investigated by conducting peel tests at 40, 50 and 60°C. The peel velocity increased with temperature and that the relationship between peel velocity and the reciprocal of temperature followed and Arrhenius function, from which the activation energy of the peel could be estimated. The activation energy for the case of etched surface was 5.15 kcal/mol as compared to 6.36 kcal/mol for the case of anodized surface, respectively.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดีด้วยคำแนะนำและความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆจาก ผศ.ดร.อภิรักษ์ นัมคณิสร์ณ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงยิ่ง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณบริษัท ชันมาเอสพี จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบ และบริษัท ดาวคอร์นิ่ง (ประเทศไทย) จำกัด ที่ช่วยอนุเคราะห์สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ และน้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยแนะนำและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่และน้อง และญาติๆทุกท่านที่เป็นกำลังใจ และให้ความอนุเคราะห์ในหลายๆเรื่องด้วยดีมาตลอด ทำให้ข้าพเจ้าทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จมาได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์ที่พึงได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอบใจให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นาย อนุพงศ์ สอรักษา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้.....	2
1.3 การเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม.....	2
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	3
1.7 ขั้นตอนในการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พื้นผิวของวัสดุ.....	4
2.1.1 พื้นผิวของโลหะ.....	4
2.1.2 พื้นผิวของพอลิเมอร์.....	5
2.2 การปรับสภาพพื้นผิว.....	7
2.2.1 การปรับสภาพแบบพาสซีฟ.....	7
2.2.1.1 การปรับสภาพแบบพาสซีฟด้วยวิธีทางเคมี.....	7
2.2.1.2 การปรับสภาพแบบพาสซีฟด้วยวิธีทางกล.....	8
2.2.2 การปรับสภาพแบบแอคทีฟ.....	8
2.2.2.1 การกัดด้วยสารละลายกรด.....	9
2.2.2.2 การล้างด้วยสารละลายด่าง.....	10
2.2.2.3 การอะโนไดเซชัน.....	10

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 ทฤษฎีกลไกการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ.....	12
2.3.1 ทฤษฎีการประสานทางกล.....	12
2.3.2 ทฤษฎีการเกิดพันธะเคมี.....	13
2.3.3 ทฤษฎีการแพร่.....	13
2.3.4 ทฤษฎีการดูดซับ.....	14
2.4 แรงที่เกี่ยวข้องกับการยึดติด.....	14
2.4.1 แรงแวนเดอร์วาลส์.....	14
2.4.2 แรงโคฮีซีฟ.....	16
2.5 ขางธรรมชาติ .....	17
2.6 อะลูมิเนียม.....	19
2.7 สารกึ่งตัวนำ.....	20
2.8 การทดสอบโดยการลอก.....	23
2.9 พลังงานของการแตกหักของพันธะ.....	24
2.10 กลไกการแยกในเนื้อวัสดุ.....	25
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง.....	30
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.1.1 วัสดุ.....	30
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	30
3.1.3 สารเคมี.....	30
3.2 การเตรียมวัสดุ และสารเคมี.....	31
3.2.1 การเตรียมแผ่นอะลูมิเนียม.....	31
3.2.2 การเตรียมขางธรรมชาติ.....	31
3.2.3 การเตรียมแม่พิมพ์เทฟลอน.....	31
3.2.4 การเตรียมสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก.....	31
3.2.5 การเตรียมสารละลายกรดฟอสฟอริก.....	32

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การปรับสภาพผิวของแผ่นอะลูมิเนียม.....	32
3.3.1 การปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก.....	32
3.3.2 การอะโนไดเซชัน.....	32
3.4 การขึ้นรูปชิ้นงานและการทดสอบความสามารถการยึดติด.....	33
3.4.1 การขึ้นรูปชิ้นงาน.....	33
3.4.2 การทดสอบสภาพการยึดติดด้วยวิธีการดึงลอก.....	33
3.5 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิว.....	34
3.5.1 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวโดย SEM.....	34
3.5.2 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวโดยการหามุมสัมผัส.....	34
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง.....</b>	<b>35</b>
4.1 การวิเคราะห์พื้นผิวอะลูมิเนียมหลังการปรับสภาพ.....	35
4.1.1 การวิเคราะห์พื้นผิวอะลูมิเนียมด้วย SEM และ TEM.....	35
4.1.2 การวัดค่าความขรุขระของพื้นผิวอะลูมิเนียม.....	37
4.2 ผลการทดสอบความสามารถการยึดติดด้วยวิธีการดึงลอกและวิเคราะห์สภาพ พื้นผิวหลังการทดสอบ.....	38
4.2.1 ผลของพื้นผิวที่มีต่อการยึดติด.....	38
4.2.2 ผลของปริมาณ ไซเลนที่มีต่อการยึดติด.....	39
4.2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการยึดติด.....	44
<b>บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....</b>	<b>46</b>
5.1 การวิเคราะห์พื้นผิวอะลูมิเนียมหลังการปรับสภาพก่อนขึ้นรูปกับยาง ธรรมชาติ.....	46
5.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงของพื้นผิวโดยวิธีการดึงลอก.....	46
5.2.1 ผลของการปรับสภาพพื้นผิวอะลูมิเนียม.....	46
5.2.2 ผลของการเติมสารก่อกวน ไซเลน.....	47
5.2.3 ผลของอุณหภูมิ.....	47
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	48

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	48
ภาคผนวก.....	51
ภาคผนวก ก.....	56
ภาคผนวก ข.....	
ประวัติผู้เขียน.....	60

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ประเภทของสารคู่ควบไซเลนเดน.....	21

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	พื้นผิวของโลหะที่ปกคลุมด้วยชั้นของ ไฮดรอกไซด์..... 4
2.2	ภาพตัดขวางของชิ้นงานพอลิเมอร์..... 6
2.3	ชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกหรือ สารละลายกรดไดโครเมตซัลฟิวริก..... 9
2.4	ชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกทำ ปฏิกิริยาอะโนไดเซชันกับแผ่นอะลูมิเนียม..... 11
2.5	ชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก ทำปฏิกิริยาอะโนไดเซชันกับแผ่นอะลูมิเนียม..... 11
2.6	ทฤษฎีการประสานทางกล..... 12
2.7	รูปร่างรูพรุนของออกไซด์ที่มีผลต่อการซึมผ่านของพอลิเมอร์..... 12
2.8	ทฤษฎีการเกิดพันธะเคมี..... 13
2.9	ทฤษฎีการแพร่..... 13
2.10	การเกิดการดูดซับของสายโซ่พอลิเมอร์บนผิวของโลหะ..... 14
2.11	พลังงานที่ใช้ในการยึดเกาะและการแยกออกที่ผิวสัมผัสระหว่างสารยึดติดกับโลหะ สับสเตรท..... 15
2.12	ทิศทางของแรงดึงผิวระหว่างของแข็ง-ของเหลว ในรูปเวกเตอร์ของแรงที่กระทำ ร่วมกัน..... 15
2.13	โมเลกุลของยางธรรมชาติ..... 18
2.14	(ก) สูตรทางเคมีของ bis-(3-triethoxysilylpropyl)tetrasulphane (TESPT) (ข) ปฏิกิริยาของ TESPT กับหมู่ OH บนผิวของโลหะ (ค) การเกิดพันธะทางเคมีของ TESPT กับหมู่ OH บนผิวของโลหะ..... 22
2.15	การเกิดปฏิกิริยาของ หมู่ ethoxy กับ หมู่ OH บนผิวของอะลูมิเนียม..... 22
2.16	การทดสอบสภาพการยึดติดด้วยการลอก โดย (1) การทดสอบการดึงลอกแบบลูกกลิ้ง (2) การทดสอบการดึงลอกแบบ Climbing-drum (3) การทดสอบการดึงลอกแบบตัว ที่..... 23
2.17	กลไกการเกิดการแยกของวัสดุ โดย (1) เกิดการแยกที่ผิวสัมผัส (2) เกิดการแยกในเนื้อ ของพอลิเมอร์..... 25

## สารบัญ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอุณหภูมิที่ใช้ในการลอกของยางธรรมชาติที่เติมสารคู่ควบไซเลนเข้มข้น 10 phr กับพื้นผิวอะลูมิเนียมที่ปรับสภาพโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกและปรับสภาพโดยการอะโนไดซ์ในสารละลายกรดฟอสฟอริก โดยลอกด้วยน้ำหนัก 55 กรัม ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส	45
ก.1 ชุดเครื่องมือในการกัดด้วยกรด.....	54
ก.2 ชุดเครื่องมือในการอะโนไดเซชัน.....	55
ก.3 ชุดเครื่องมือที่ใช้ทดสอบการดึงลอก.....	56
ก.4 ชิ้นงานขณะกำลังลอก.....	56
ข.1 อัตราเร็วในการลอกโดยใช้ตุ้มน้ำหนัก 43.1 กรัม.....	58
ข.2 อัตราเร็วในการลอกโดยใช้ตุ้มน้ำหนัก 58.2 กรัม.....	58
ข.3 อัตราเร็วในการลอกโดยใช้ตุ้มน้ำหนัก 73.4 กรัม.....	59
ข.4 อัตราเร็วในการลอกโดยใช้ตุ้มน้ำหนัก 95.0 กรัม.....	59
ข.5 อัตราเร็วในการลอกโดยใช้ตุ้มน้ำหนัก 116.9 กรัม.....	60
ข.6 อัตราเร็วในการลอกโดยใช้ตุ้มน้ำหนัก 128.8 กรัม.....	60

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญต่อการส่งออก ทั้งที่ส่งออกเป็นวัตถุดิบและส่งออกเป็นผลิตภัณฑ์จากยางพารา การเพิ่มมูลค่าให้กับยางพาราจึงมีความสำคัญ แนวทางที่จะช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับยางพาราคือการพัฒนาอุตสาหกรรมยางพาราเพื่อการส่งออก โดยการนำยางพาราไปใช้แทนหรือใช้ร่วมกับวัสดุอื่น เช่น วัสดุจำพวกโลหะมากขึ้น ตัวอย่างการใช้งานยางพาราร่วมกับโลหะ เช่น ใช้เป็นยางรองรับแทนเครื่อง เนื่องจากยางพาราที่ผ่านกระบวนการคงรูปแล้วจะมีสมบัติการคืนตัวเกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ จึงทำให้มีความยืดหยุ่นและรับแรงสั่นสะเทือนได้ดี แต่ปัญหาที่เป็นอุปสรรคสำคัญในการนำยางพาราไปใช้ร่วมกับวัสดุจำพวกโลหะ คือ ความสามารถในการยึดติดกันระหว่างยางธรรมชาติกับโลหะนั้นไม่ดีนัก และยังในสภาพการใช้งานที่มีความชื้นหรืออุณหภูมิสูงการยึดติดกันของวัสดุทั้งสองจะยังมีประสิทธิภาพต่ำลง เนื่องจากพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างยางธรรมชาติและพื้นผิวโลหะเป็นเพียงพันธะฟิสิกส์ที่มีประเภทรอบคอบเท่านั้น ผลที่เกิดขึ้นคือเราสามารถลอกยางธรรมชาติออกจากผิวโลหะได้โดยง่าย สิ่งนี้เป็นข้อจำกัดในการนำยางพารามาใช้ร่วมกับวัสดุจำพวกโลหะ ซึ่งถ้าลดข้อจำกัดดังกล่าวได้แล้วการนำยางพาราไปใช้ประโยชน์ก็จะมีหลากหลายมากยิ่งขึ้น

### 1.2 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้

งานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาสภาพการยึดติดระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียมเพื่อเพิ่มโอกาสในการประยุกต์ใช้งานยางพาราร่วมกับโลหะ โดยทำการทดลองเพื่อหาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดกันของพื้นผิวทั้งสองด้วยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมีโดยวิธีแรกจะอาศัยการปรับสภาพผิวโดยการขัดด้วยกระดาษทราย เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการยึดติดและเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ทำพันธะที่ไม่แข็งแรงที่ผิวออก ส่วนวิธีที่สองซึ่งเป็นวิธีการปรับสภาพผิวด้วยวิธีทางเคมีเป็นการปรับสภาพผิวด้วยสารเคมีเพื่อสร้างชั้นออกไซด์ใหม่ที่ผิวของชิ้นงานและการใช้สารคู่ควบไซเลนเพื่อเพิ่มจำนวนพันธะเคมีที่ยึดติดกับพื้นผิวของอะลูมิเนียม สำหรับการปรับสภาพพื้นผิวของโลหะอะลูมิเนียมใช้เทคนิคมาตรฐานที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรม ได้แก่ การเอทซิงในสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก [1] และการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริก [2] ซึ่งการปรับสภาพผิวของอะลูมิเนียมด้วยวิธีการเหล่านี้ จะสร้างชั้นของออกไซด์ที่มีลักษณะเฉพาะเจาะจงซึ่งเหมาะสำหรับการยึดติดกับยางธรรมชาติ ส่วนวิธีทางเคมีโดยการใช้สารคู่ควบ (Silane Coupling Agent) ซึ่งมีหมู่

ฟังก์ชันที่มีสมบัติเฉพาะที่สามารถเชื่อมต่อกับสายโซ่หลักของยางพารา โดยที่ด้านหนึ่งของหมู่ฟังก์ชันนี้สามารถยึดติดกับ โมเลกุลของยางธรรมชาติได้ดี ในขณะที่อีกด้านหนึ่งสามารถยึดติดกับพื้นผิวโลหะ ผลคือเราสามารถเพิ่มความแข็งแรงของผิวสัมผัสระหว่างยางธรรมชาติกับโลหะอะลูมิเนียม

### 1.3 การเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม

การเพิ่มขึ้นของการประยุกต์ใช้งานวัสดุพอลิเมอร์กับโลหะทำให้มีความต้องการทราบถึงกลไกที่มีผลต่อการยึดติดกันของวัสดุทั้งสองและมีความต้องการเพิ่มความสามารถในการยึดติดให้ดียิ่งขึ้น ในอดีตมีผู้วิจัยบางคนที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มคุณสมบัติการยึดติดกันระหว่างพอลิเมอร์ชนิดอื่นกับโลหะ และได้ทำการศึกษาผลของการปรับสภาพพื้นผิว เช่น Brockmann และคณะ [3] ได้ศึกษาการยึดติดของพอลิเมอร์กับโลหะและพบว่า โครงสร้างของออกไซด์ที่เหมาะสมต่อกันยึดติดกันจะต้องมีลักษณะความพรุนสูง มีโพรงอากาศเพื่อให้สายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถแพร่เข้าไปในโพรงขณะที่เป็นของเหลวและแข็งตัวลึกลงอยู่ในโพรงระหว่างที่เกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน กลไกนี้เรียกว่า (Mechanical Interlocking) ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของผิวสัมผัสโดยอาศัยการวิธีการทางกายภาพในการสร้างชั้นออกไซด์ที่มีรูปร่างเฉพาะ นอกจากนี้งานวิจัยโดย Namkanisorn และคณะ [4] ยังพบว่าการปรับสภาพผิวด้วยวิธีทางกายภาพที่เหมาะสมอาจทำให้ผิวสัมผัสระหว่างพอลิเอสไทรินและอะลูมิเนียมมีความแข็งแรงเทียบเท่ากับการใช้วิธีทางเคมีที่ใช้สารคู่ควบ (Coupling Agent) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของผิวสัมผัส และสำหรับ Ansarifar และคณะ [5] ได้ศึกษาการใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด bis(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulphane (TESPT) เพื่อเพิ่มการยึดติดระหว่างยางธรรมชาติกับอนุภาคของซิลิกาที่ใช้เสริมแรง โดยพบว่าสมบัติเชิงกลเช่น ความแข็งแรง ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความหนาแน่นที่จุดขาด และการคงตัวของเนื้อยางดีขึ้น ในทางกลับกันความแข็งแรงต่อแรงฉีก เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และการทนต่อความล้าลดลง

### 1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลการปรับสภาพพื้นผิวที่มีต่อการยึดติดกันระหว่างยางพารากับอะลูมิเนียม
2. เพื่อเปรียบเทียบปัจจัยทางกายภาพและเคมีที่มีผลต่อการยึดติดกันของผิวสัมผัส
3. เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการยึดติดกันของพื้นผิวทั้งสอง
4. เพื่อเป็นองค์ความรู้และพัฒนาเกี่ยวกับกลไกการยึดติดกันระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียม

5. เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้ยางธรรมชาติให้หลากหลายมากขึ้น เช่น กาว สารเชื่อมต่อน เป็นต้น

### 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1. หาแนวทางการปรับสภาพผิวโลหะด้วยวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี
2. ศึกษาการยึดติด (adhesion) ด้วยทดสอบการดึงลอก (peel test)
3. ศึกษาผลของพื้นผิวที่ผ่านการปรับสภาพทั้งวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมีที่มีต่อความสามารถในการยึดติดกันระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียม
4. ศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลนที่มีต่อความสามารถในการยึดติดกันระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียม
5. ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการยึดติดกันระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียม

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. เข้าใจกลไกในการยึดติดระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียม
2. สามารถเพิ่มการยึดติดกันระหว่างยางธรรมชาติกับโลหะอะลูมิเนียม
3. พัฒนาองค์ความรู้ที่ได้เพื่อนำยางธรรมชาติไปใช้ร่วมกับอะลูมิเนียม อันจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมที่หลากหลาย

### 1.7 ขั้นตอนในการวิจัย

1. ศึกษาโครงสร้าง คุณสมบัติ และกลไกการยึดติดกันระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียม
2. ทำการเพิ่มคุณสมบัติการยึดติดกันระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียม โดยการปรับสภาพพื้นผิวอะลูมิเนียมและการเติมสารคู่ควบไซเลน
3. ทดสอบความสามารถในการยึดติดกันระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียม โดยการทดสอบการดึงลอก (peel test)
4. ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมก่อนและหลังการปรับสภาพ รวมทั้งก่อนและหลังการทดสอบด้วยการดึงลอก
5. ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการยึดติด
6. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง จัดทำรายงาน

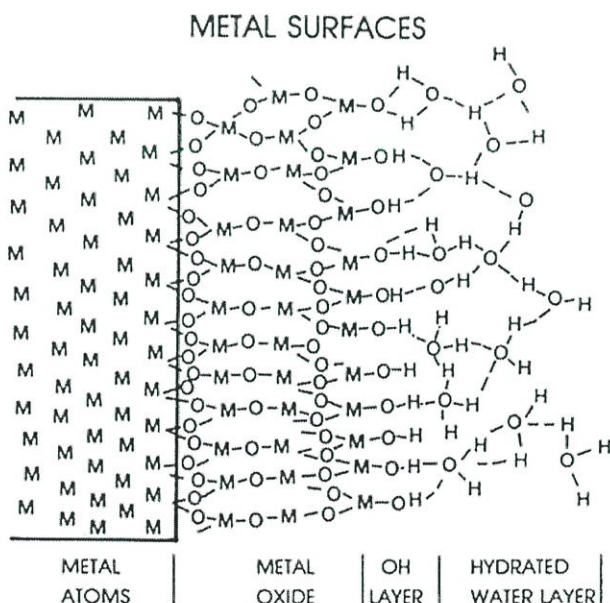
## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พื้นผิวของวัสดุ [6]

พื้นผิว ในวิทยาศาสตร์สารยึดติด หมายถึง ส่วนที่เกิดการยึดติดกันทั้งส่วนที่เป็นพื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยาและส่วนที่เป็นหลุม พื้นผิวมีความสำคัญมากในกระบวนการการยึดติดเพราะความแข็งแรงในการยึดติดนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะสภาพของพื้นผิว กระบวนการปรับสภาพพื้นผิวจึงมีความสำคัญมาก พื้นผิวที่ผ่านการปรับสภาพที่เหมาะสมจะมีผลทำให้การเกิดพันธะระหว่างสารยึดติดกับพื้นผิววัสดุดีขึ้น ทำให้ความแข็งแรงในการยึดติดเพิ่มมากขึ้นด้วย ลักษณะพื้นผิวที่สำคัญที่สนใจได้แก่ พื้นผิวของโลหะและพื้นผิวของพอลิเมอร์

#### 2.1.1 พื้นผิวของโลหะ (Metallic surface)

พื้นผิวของโลหะเช่น เหล็ก หรือ อะลูมิเนียมผสม อาจประกอบด้วยพื้นที่หลายๆส่วนแยกกันเป็นชั้นๆ ซึ่งไม่อาจกำหนดขอบเขตของแต่ละชั้นได้อย่างแน่ชัด ตามความเป็นจริงแล้วบนพื้นผิวของโลหะทุกชนิดต้องมีชั้นของไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในรูป 2.1 แม้กระทั่งโลหะจำพวกเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steels) นิกเกิล (Nickel) และโครเมียม (Chromium) ก็ยังมีชั้นของโลหะออกไซด์ ที่ยึดอยู่กับชั้นของไฮดรอกไซด์อย่างน้อย 1 ชั้น



รูปที่ 2.1 พื้นผิวของโลหะที่ปกคลุมด้วยชั้นของ ไฮดรอกไซด์ [6]

ในกระบวนการประสานพื้นผิวของวัสดุสองชนิดเข้าด้วยกัน สารยึดติดที่จะใช้กับโลหะ จะต้องสามารถเข้ากันได้ดีกับชั้นของไฮดรอกไซด์ที่ยึดแน่นอยู่กับชั้นออกไซด์ของโลหะ โดยลักษณะของชั้นออกไซด์ของโลหะจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ และสภาวะที่เกิดเป็นชั้นออกไซด์ ชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีความหนาประมาณ 40 ถึง 80 แองสตรอม (Å) สำหรับสารยึดติดต่างชนิดกัน จะมีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยากับชั้นของออกไซด์แตกต่างกันด้วย ตัวอย่างเช่น สารยึดติดที่มีความหนืดต่ำจะสามารถผ่านเข้าไปในรูพรุนของชั้นออกไซด์ได้ดีกว่าประเภทที่มีความหนืดสูง นอกจากชั้นโลหะออกไซด์และชั้นออกไซด์แล้วพื้นผิวของโลหะอาจประกอบไปด้วยสิ่งเจือปนอื่นๆ อีกด้วยเช่น ฮาโลเจน ซัลเฟอร์ ฟลูออรีน น้ำมัน หรือสารประกอบชนิดอื่นที่ทำปฏิกิริยากับผิวของโลหะ ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการจัดเก็บและกระบวนการจัดการกับโลหะ สำหรับการยึดติดของโลหะสิ่งที่จะต้องระมัดระวังคือธรรมชาติของพื้นผิวจะมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดแม้ในโลหะชนิดเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของพื้นผิวจะขึ้นอยู่กับกระบวนการขึ้นรูปและความร้อนที่ใช้ในกระบวนการ รวมไปถึงกระบวนการต่อเนื่อง เช่น การตัดแต่ง (Machining) การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ (Forming) วิธีการในการเก็บรักษา และการจัดการกับโลหะ นอกจากนี้ลักษณะของพื้นผิวยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ และสภาวะในการเตรียมพื้นผิวก่อนการเกิดพันธะ เช่น ในอะลูมิเนียมก่อนที่จะเกิดพันธะ สารเจือปนในน้ำล้าง (Rinsing Water) หรือในสารละลายที่ใช้ปรับสภาพผิวและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในการปรับสภาพผิวจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของอะลูมิเนียมอย่างมาก

วิธีการและระดับความเข้มข้นในการปรับสภาพที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งบางครั้งอาจต้องการให้ชั้นงานนั้นสัมผัสกับสารยึดติดโดยตรงโดยปราศจากชั้นของออกไซด์ สารปนเปื้อนหรือฟิล์มเคลือบที่เกิดจากปฏิกิริยาอะโนไดเซชัน แต่สำหรับวัสดุบางชนิด เช่น อะลูมิเนียมจะมีชั้นออกไซด์ที่หนาแน่น และมีความแข็งแรงซึ่งจะช่วยป้องกันอะลูมิเนียมจากการถูกกัดกร่อนและการเปลี่ยนแปลงสภาพเนื่องจากการใช้งาน ทองแดงจะมีพันธะออกไซด์ที่ไม่แข็งแรง และควรกำจัดออกก่อนการเตรียมพื้นผิวสำหรับเกิดพันธะ เป็นต้น

### 2.1.2 พื้นผิวของพอลิเมอร์ (Polymeric Surface)

สารอินทรีย์จำพวกพลาสติก หรือ อีลาสโตเมอร์ มีความซับซ้อนมากกว่าโลหะ แต่มีพลังงานพื้นผิว (Surface Energy) และความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength) ต่ำกว่า และที่สำคัญคือ ที่พื้นผิวของพอลิเมอร์มีความว่องไว และเปลี่ยนแปลงง่ายกว่าโลหะ ดังนั้นจึงมีโอกาที่จะเกิดความเปลี่ยนแปลงกับพื้นผิวของพอลิเมอร์ได้มากกว่า ดังแสดงในรูป 2.2 พื้นผิวของพอลิเมอร์จะมีความเป็นขรุขระ ง่ายต่อการเกิดพันธะกับอนุภาคที่มีมวลโมเลกุลต่ำๆ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน พลาสติกไฮเซออร์ สารเติมแต่งที่ใช้ในกระบวนการ น้ำ และ สารอินทรีย์ที่ปนเปื้อน ซึ่ง

ทั้งหมดนี้สามารถพบได้ที่ผิวของพอลิเมอร์ และจะส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของพันธะ แต่จะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของเนื้อสารน้อยมาก

องค์ประกอบภายในเนื้อ (Bulk) ของพอลิเมอร์ จะสามารถเคลื่อนออกมาอยู่บริเวณพื้นผิวของพอลิเมอร์ได้โดยเราสามารถพบสารพอลิเมอร์โมเลกุลต่ำ โอลิโกเมอร์ พลาสติกไซเซอร์ ผงสี สารป้องกันการหดตัวและสารอื่นๆ ที่ใช้ในกระบวนการในระดับเดียวกับที่พบสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิว อีกทั้งบริเวณผิวหน้าของพลาสติกจะเป็นบริเวณที่มีความว่องไวสูงสามารถเกิดสมดุลใหม่เป็นสมดุลภายในเนื้อสารกับสมดุลภายนอกกับสิ่งแวดล้อม เช่น ในพลาสติกอสัญฐานชนิดที่มีความยืดหยุ่นสูง ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass Transition) องค์ประกอบที่มีมวลโมเลกุลต่ำจะสามารถแพร่จากภายในเนื้อสารออกสู่พื้นผิว ในขณะที่มีธาตุบางอย่างในสิ่งแวดล้อมแพร่เข้าสู่บริเวณที่เกิดพันธะยึดติด



รูปที่ 2.2 ภาพตัดขวางของชิ้นงานพอลิเมอร์ [6]

ผลจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลที่สามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา ทำให้เราไม่สามารถมั่นใจได้ว่าพันธะที่เกิดขึ้นจริงเป็นไปตามที่เราคาดการณ์ไว้หรือไม่ เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่พื้นผิวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากเกิดพันธะขึ้นแล้วและหลังจากการใช้งาน ดังนั้นพันธะอ่อนๆ ที่ไม่ได้เกิดขึ้นระหว่างการสร้างพันธะก็จะเกิดขึ้นภายหลังการใช้งานไปแล้ว ซึ่งจะก่อให้เกิดความไม่แข็งแรงของพันธะระหว่างพื้นผิวได้

## 2.2 การปรับสภาพพื้นผิว

การปรับสภาพพื้นผิวสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การปรับสภาพแบบพาสซีฟและการปรับสภาพแบบแอคทีฟ

### 2.2.1 การปรับสภาพแบบพาสซีฟ

การปรับสภาพด้วยวิธีนี้เป็นกระบวนการเตรียมพื้นผิว โดยไม่ได้เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี แต่จะเป็นการทำความสะอาดพื้นผิว และกำจัดชั้นของสารปนเปื้อนที่มาสร้างพันธะกับพื้นผิวออกไป เช่น กระบวนการล้างด้วยสารละลาย การทำความสะอาดโดยใช้สารเคมี การขจัดคราบพื้นผิวของชิ้นงาน อาจใช้กระบวนการปรับสภาพผิวแบบนี้แบบเดียว หรือใช้เป็นขั้นตอนแรกของการปรับสภาพก็ได้ การปรับสภาพแบบพาสซีฟแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ การปรับสภาพแบบพาสซีฟด้วยวิธีทางเคมี และการปรับสภาพพาสซีฟด้วยวิธีทางกล

#### 2.2.1.1 การปรับสภาพแบบพาสซีฟด้วยวิธีทางเคมี (Passive Chemical Surface Treatment)

การปรับสภาพพื้นผิวแบบพาสซีฟด้วยวิธีทางเคมีเป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า เช่น น้ำมัน ทราย ไขมันสัตว์ รอยนิ้วมือ ฯลฯ กระบวนการนี้ทั้งการทำความสะอาดด้วยตัวทำละลายและการทำความสะอาดด้วยสารเคมี การทำความสะอาดด้วยตัวทำละลาย เป็นการปรับสภาพพื้นผิวโดยการกำจัดสารอินทรีย์หรือสารเจือปนอื่นๆ ที่พื้นผิวโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ โดยพื้นผิวที่ผ่านการปรับสภาพจะมีพันธะอ่อนๆ เกิดขึ้น การปรับสภาพพื้นผิวด้วยวิธีการนี้เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย เพราะทำได้ง่าย แต่ก็เป็นที่ให้ประสิทธิภาพน้อยที่สุด ส่วนการทำความสะอาดด้วยสารเคมีเป็นการใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงเพื่อจับกับสิ่งสกปรกบนพื้นผิวแล้วหลุดออกไป การใช้สารทำความสะอาด เช่น สารซักฟอก สบู่ หรือสารละลายอื่นๆ สามารถใช้ได้กับชิ้นงานที่มีพื้นผิวเป็น โลหะและอโลหะและนิยมใช้กับชิ้นงานที่เป็นพอลิเมอร์ เนื่องจากสารละลายที่ใช้จะย่อยสลายผิวหน้าบางส่วนของชิ้นงานที่มีสารปนเปื้อนติดอยู่และสามารถกำจัดออกได้โดยง่ายโดยใช้สารทำความสะอาดที่เป็นสารละลาย ส่วนใหญ่การปรับสภาพด้วยวิธีนี้มักใช้ร่วมกับวิธีอื่นๆ เนื่องจากการปรับสภาพโดยวิธีทางเคมีเพียงอย่างเดียวจะไม่สามารถกำจัดสารปนเปื้อนที่ยึดเกาะกับชิ้นงานด้วยพันธะที่แข็งแรง เช่น สนิม หรือ ตะกรัน ออกได้

### 2.2.1.2 การปรับสภาพแบบพาสซีฟด้วยวิธีทางกล (Passive Mechanical Treatment)

การปรับสภาพด้วยวิธีนี้เป็นการปรับสภาพโดยอาศัยแรงทางกล เช่น วิธีการขัดพื้นผิวด้วยแปรงลวด การขัดด้วยกระดาษทราย ผงแร่ และ เส้นใยโลหะ โดยจะมีประสิทธิภาพมากที่สุดในการกำจัดสารปนเปื้อนที่มีปริมาณมาก คราบสกปรก ตะกรัน และชั้นออกไซด์ ในการปรับสภาพด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องมีการทำความสะอาดพื้นผิวของชิ้นงานทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพ และควรกำจัดสารปนเปื้อนพวกคราบไขมันออกจากพื้นผิวก่อนการปรับสภาพโดยการขัดที่ผิวของชิ้นงาน เพื่อป้องกันการฝังตัวของคราบไขมันลงบนชิ้นงาน และเศษอนุภาคของแข็งเล็กๆ ที่ตกค้างอยู่บนพื้นผิวหลังจากการขัดสามารถกำจัดออกได้โดยการเป่าด้วยอากาศแห้ง หรือเช็ดออกด้วยตัวทำละลาย เป็นต้น

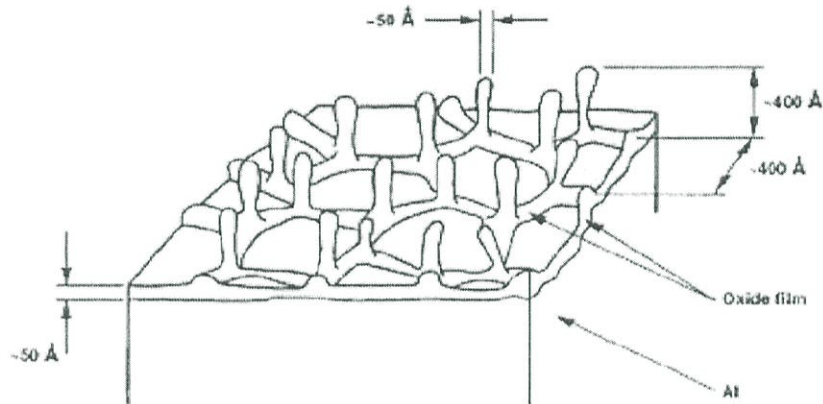
### 2.2.2 การปรับสภาพแบบแอคทีฟ

การปรับสภาพด้วยวิธีการแอคทีฟทั้งทางเคมีและฟิสิกส์ไม่เพียงแต่จะเป็นการทำความสะอาดพื้นผิวและกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่เกาะอยู่กับพื้นผิวด้วยพันธะอ่อนๆ ออกเท่านั้น แต่ยังเป็นการผลิตเปลี่ยนผิวหน้าของชิ้นงานเพื่อให้พร้อมสำหรับการเกิดพันธะต่อไปในระหว่างการปรับสภาพด้วยวิธีการแอคทีฟนี้ ได้แก่ การกัดด้วยสารละลายกรด การออกซิเดชัน การอะโนไดเซชัน เป็นต้น

การปรับสภาพแบบแอคทีฟด้วยวิธีการทางเคมีจะเปลี่ยนคุณสมบัติทั้งทางเคมีและกายภาพของพื้นผิวของชิ้นงานเพื่อสร้างพื้นผิวใหม่ที่มีความพร้อมต่อการยึดติดมากขึ้น การปรับสภาพด้วยวิธีนี้ใช้ได้กับพื้นผิวทั้งที่เป็นโลหะและอโลหะ โดยสารเคมีที่ใช้จะมีทั้งกรดและเบส สารเคมีที่นิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ได้แก่ กรดซัลฟูริก-โซเดียมไดโครเมต ฟีนอล โซเดียมเนฟทาทีน เพอร์ริค คลอไรด์-กรดไนตริก สารละลายกรดไนตริก-ไฮโดรฟลูออริก สำหรับการปรับสภาพพื้นผิวของโลหะด้วยวิธีทางเคมี มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดออกไซด์ที่ไม่ต้องการ และกำจัดชั้นของสารที่มายึดติดกับพื้นผิวด้วยแรงพันธะที่ไม่แข็งแรง หรือช่วยป้องกันพื้นผิวจากการกัดกร่อน การปรับสภาพพื้นผิวด้วยวิธีทางเคมียังช่วยให้พื้นผิวของชิ้นงานมีความขรุขระในระดับไมโครเมตร ซึ่งช่วยเพิ่มการยึดติดทางกลมากขึ้นอีกด้วย การปรับสภาพผิวด้วยวิธีนี้มักจะกำจัดสารที่มีองค์ประกอบเชิงซ้อนที่อยู่บนชิ้นงานออกและแทนที่ด้วยสารที่มีโครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบ หนาแน่น และแข็งแรงมากยิ่งขึ้น เช่น การเอซซิงด้วยสารละลายกรด และการอะโนไดเซชัน

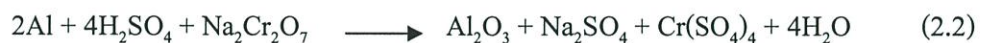
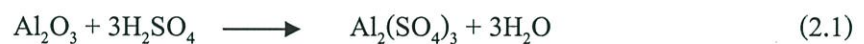
### 2.2.2.1 การกัดด้วยสารละลายกรด (Acid Etching)

การกัดด้วยสารละลายกรดมี 2 แบบคือ การกัดโดยสารที่มีองค์ประกอบของ Cr(VI) และการกัดโดยสารที่ไม่มีองค์ประกอบของ Cr(VI) สำหรับการกัดโดยสารสกัดผิวที่มีองค์ประกอบของ Cr(VI) ใช้สารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกหรือสารละลายกรดไดโครเมตซัลฟิวริกในการปรับสภาพพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียม สารละลายจะปรับโครงสร้างของชั้นออกไซด์ที่อยู่บนผิวอะลูมิเนียมดังรูปที่ 2.3



**รูปที่ 2.3** ชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกหรือสารละลายกรดไดโครเมตซัลฟิวริก [7]

การปรับสภาพผิวด้วยวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกจะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น 2 ปฏิกิริยา [8] คือ



ส่วนสารสกัดผิวที่ไม่มีองค์ประกอบของ Cr(VI) มักเป็นสารละลายกรดซึ่งไม่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ เช่น สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกไนตริก โครงสร้างของออกไซด์หลังจากการปรับสภาพผิวจะมีลักษณะใกล้เคียงกับโครงสร้างในแบบแรก

### 2.2.2.2 การล้างด้วยสารละลายด่าง (Alkali Treatment)

การปรับสภาพผิวโดยใช้สารละลายด่างในการทำความสะอาด โดยสารละลายที่เลือกใช้จะจับกับสิ่งสกปรกและสารปนเปื้อนบนพื้นผิวของชิ้นงานแล้วหลุดออกไป หากสารละลายที่เลือกใช้มีฤทธิ์เป็นด่างจะเหมาะสมในการทำความสะอาดพื้นผิวของโลหะก่อนการเกิดพันธะ การปรับสภาพผิวด้วยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกที่สุดวิธีเพื่อเตรียมผิวของโลหะอะลูมิเนียมสำหรับนำไปยึดเกาะกับพอลิเมอร์โดยมีปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญเกิดขึ้น 2 ปฏิกิริยา [3] ได้แก่ ปฏิกิริยาการกำจัดชั้นของออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและปฏิกิริยาการสร้างชั้นออกไซด์ขึ้นมาใหม่แสดงดังสมการ 2.3 และสมการ 2.4

การกำจัดชั้นของออกไซด์



การสร้างชั้นของออกไซด์

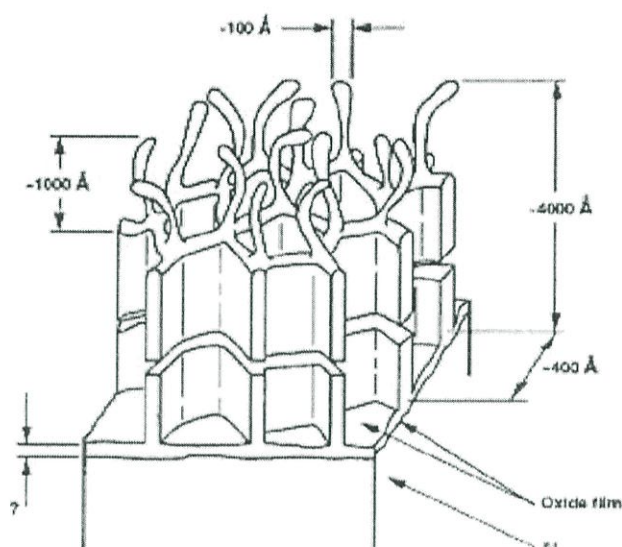


### 2.2.2.3 การอะโนไดเซชัน (Anodization)

การปรับสภาพผิวของโลหะด้วยวิธีอะโนไดเซชันจะช่วยให้เกิดพันธะออกไซด์ชั้นที่พื้นผิว สำหรับอะลูมิเนียมการอะโนไดเซชันจะช่วยให้เกิดชั้นออกไซด์ที่หนาเป็นชั้นชัดเจนและมีความเสถียรสูง วิธีการปรับสภาพโดยวิธีนี้ถูกใช้มากในอุตสาหกรรมผลิตยานยนต์และเครื่องบิน อะโนไดเซชันสามารถทำได้ทั้งในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดฟอสฟอริกและโครมิก แต่นิยมทำอะโนไดเซชันในกรดฟอสฟอริกมากกว่า เนื่องจากมีความเป็นพิษต่ำ และสามารถกำจัดได้ง่าย

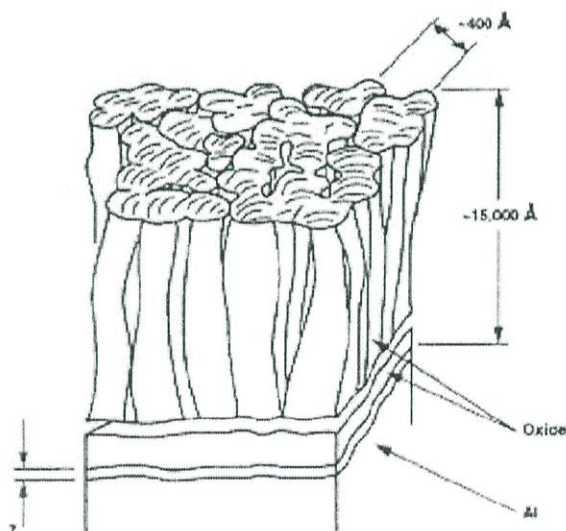
อะโนไดเซชันจะสร้างพันธะออกไซด์ภายใต้สภาวะที่ควบคุมกระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยข้างต้นส่งผลถึงความหนาของชั้นออกไซด์ โครงสร้างและความเสถียร การปรับสภาพด้วยวิธีอะโนไดเซชันแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การอะโนไดซ์ในสารละลายกรดฟอสฟอริก (PPA) และการอะโนไดซ์ในสารละลายกรดโครมิก (CAA)

การอะโนไดเซชันของอะลูมิเนียมในสารละลายกรดฟอสฟอริกจะทำให้เกิดโพรงหรือรูพรุนบนชั้นของออกไซด์ โดยลักษณะของออกไซด์ที่ได้นั้นจะมีลักษณะเป็นร่างแหรูปหกเหลี่ยม และมีความลึกไปจนถึงผิวของโลหะดังรูปที่ 2.4 ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนจะขึ้นอยู่กับค่าของศักย์ไฟฟ้าที่ให้และชนิดของสารละลายที่ใช้ ส่วนความหนาของชั้นออกไซด์จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแสและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา



**รูปที่ 2.4** ชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกทำปฏิกิริยาอะโนไดเซชันกับแผ่นอะลูมิเนียม [7]

สำหรับการอะโนไดเซชันอะลูมิเนียมในสารละลายกรดโครมิก วิธีนี้จะใช้สารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกในการปรับโครงสร้างของออกไซด์ก่อน แล้วจึงใช้สารละลายกรดโครมิกในการทำปฏิกิริยาอะโนไดเซชัน ผลที่ได้คือชั้นของออกไซด์จะเกิดเป็นรูกลึกลงไปจนถึงผิวของโลหะ แต่โครงสร้างของออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีความเป็นระเบียบน้อยกว่าวิธี PAA ดังรูปที่ 2.5



**รูปที่ 2.5** ชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกทำปฏิกิริยาอะโนไดเซชันกับแผ่นอะลูมิเนียม [7]

## 2.3 ทฤษฎีกลไกการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ

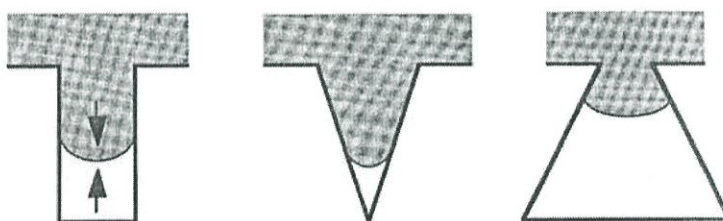
### 2.3.1 ทฤษฎีการประสานทางกล (Mechanical Interlocking)

ทฤษฎีการประสานทางกลเสนอโดย McBain และ Hopkins [9] เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกลไกของการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ โดยอธิบายว่าพอลิเมอร์กับโลหะสามารถยึดเกาะกันได้เนื่องจากพอลิเมอร์ซึมผ่านเข้าไปในโพรง หรือรูพรุนของออกไซด์ที่อยู่บนผิวหน้าของโลหะที่มีความขรุขระดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ทฤษฎีการประสานทางกล [9]

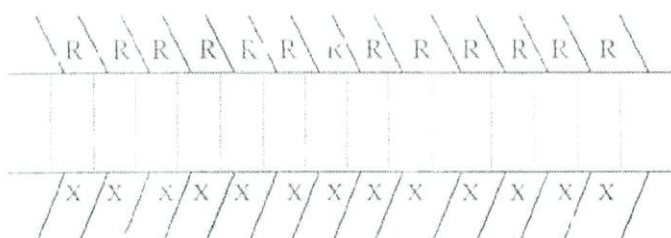
การซึมผ่านนี้สามารถเข้าไปได้ที่ความลึกระดับหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากเกิดความดันย้อนกลับที่อยู่ภายในรูพรุนของออกไซด์ ทำให้เกิดการต้านการซึมผ่านของพอลิเมอร์และยังพบว่าความขรุขระที่ผิวหน้าของโลหะเป็นปัจจัยสำคัญของการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ เนื่องจากความขรุขระทำให้ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นจึงทำให้พอลิเมอร์กับโลหะยึดเกาะกันได้ดีขึ้น ซึ่งนอกจากความขรุขระแล้วยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีความสำคัญต่อการยึดเกาะกันของพอลิเมอร์กับโลหะเช่น ความหนืดของพอลิเมอร์ ความสามารถในการเปียกของพื้นผิว (Wetability) ของโลหะ หรือรูปร่างทางเรขาคณิตของรูพรุนของออกไซด์ เช่น ทรงกระบอก หรือทรงกรวย เป็นต้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 รูปร่างรูพรุนของออกไซด์ที่มีผลต่อการซึมผ่านของพอลิเมอร์ [10]

### 2.3.2 ทฤษฎีการเกิดพันธะเคมี (Chemical Bonding Theory)

ทฤษฎีการเกิดพันธะเคมีเป็นอีกทฤษฎีหนึ่งที่มีความเกี่ยวข้องกับกลไกการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ ทฤษฎีนี้กล่าวว่า จะมีพันธะเคมีเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์กับโลหะ โดยที่ปลายด้านหนึ่งจะเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ ส่วนอีกด้านจะเกิดพันธะกับโลหะ ทำให้พอลิเมอร์กับโลหะสามารถยึดเกาะกันได้ดังแสดงในรูป 2.8 พันธะที่กล่าวถึงนี้เป็นพันธะแบบปฐมภูมิ เช่น พันธะไอออนิก หรือพันธะโควาเลนต์ เป็นต้น โดยมีค่าความแข็งแรงของพันธะมีค่าตั้งแต่ 100 ถึง 1,000 กิโลจูลต่อโมล ส่วนพันธะอีกแบบหนึ่ง คือ พันธะแบบทุติยภูมิ เช่น แรงวานเดอร์วาลส์ มีค่าความแข็งแรงของพันธะไม่เกิน 50 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งพันธะที่ผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะจะต้องเป็นพันธะปฐมภูมิ จึงจะมีค่าความแข็งแรงเพียงพอในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง



รูปที่ 2.8 ทฤษฎีการเกิดพันธะเคมี

### 2.3.3 ทฤษฎีการแพร่ (Diffusion Theory)

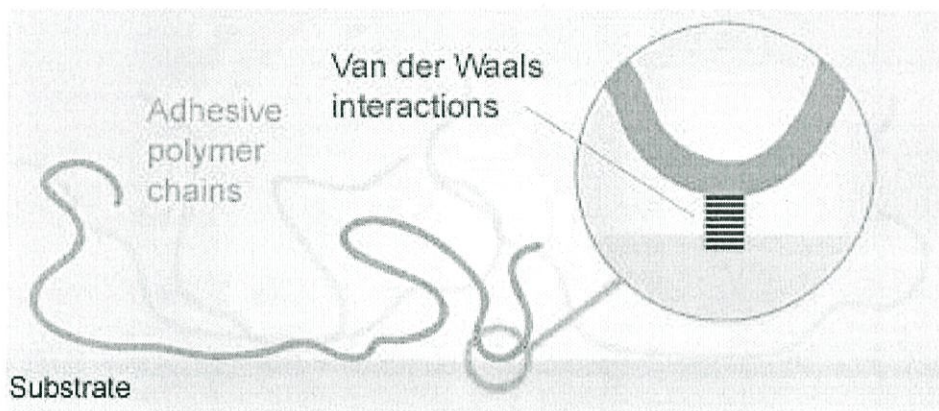
การยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์กับผิวโลหะเกิดจากการแพร่ของโมเลกุลที่ผิวสัมผัสของพอลิเมอร์แอดฮีซีฟกับโลหะสับสเตรท ดังรูปที่ 2.9 ความแข็งแรงของผิวสัมผัสขึ้นอยู่กับความสามารถในการแพร่ของพอลิเมอร์เข้าไปยังโลหะสับสเตรท นอกจากนี้ ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลคือเวลาที่ผิวหน้าของพอลิเมอร์กับโลหะสับสเตรทสัมผัสกัน อุณหภูมิ และน้ำหนักของโมเลกุล เป็นต้น ซึ่งทฤษฎีการแพร่นี้ โดยปกติแล้วจะมีความสำคัญในกรณีที่ผิวสัมผัสที่เกิดจากการนำพอลิเมอร์ต่างชนิดกันมายึดเกาะกัน



รูปที่ 2.9 ทฤษฎีการแพร่ [11]

### 2.3.4 ทฤษฎีการดูดซับ (Adsorption Theory)

ทฤษฎีการเกิดสภาวะการดูดซับนั้นเกิดจากการสัมผัสกันของโมเลกุลของวัสดุสองชนิด แล้วเกิดแรงที่พื้นผิวขึ้นทำให้เกิดการยึดติด การยึดติดจากการดูดซับนั้นโมเลกุลสารยึดติดบนสัปสเตรทจะเกิดพันธะกันซึ่งส่วนมากเป็นพันธะทุติยะภูมิ เช่นแรงวานเดอวาลส์ โดยการเกิดแรงวานเดอวาลส์นี้จะเกิดเมื่อโมเลกุลของวัสดุทั้งสองห่างกันไม่เกิน 5 Å หรือบางกรณีการเกิดการดูดซับอาจเกิดจากความแตกต่างของประจุของวัสดุทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 2.10



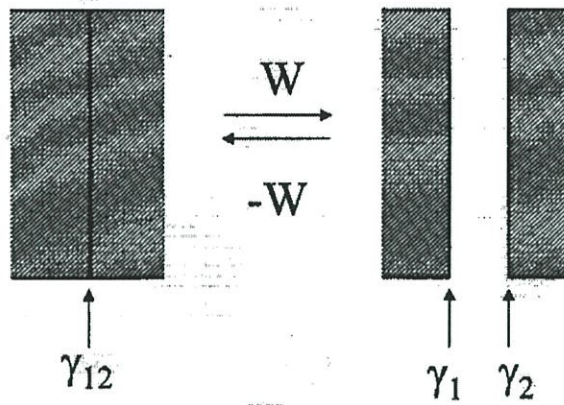
รูปที่ 2.10 การเกิดการดูดซับของสายโซ่พอลิเมอร์บนผิวของโลหะ [12]

## 2.4 แรงที่เกี่ยวข้องกับการยึดติด

การจะทราบถึงแรงที่เกิดขึ้นในการยึดติดของสารที่นำมายึดติดกันนั้นจำเป็นต้องเข้าใจเกี่ยวกับการเชื่อมต่อกันระหว่างอะตอมและโมเลกุลของสารทั้งสองก่อน โดยจะมีแรงที่เกี่ยวข้องหลายประเภทซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นแรงที่เกิดขึ้นโดยทางกายภาพและทางเคมี จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องทำความเข้าใจเพื่อนำไปพัฒนาการยึดติดต่อไป สำหรับกลไกการยึดติดระหว่างสารยึดติดกับโลหะสัปสเตรท อาศัยแรงที่ใช้ในการยึดติด 2 ประเภท ได้แก่ แรงแอดฮีซีฟ (Adhesive force) และแรงโคฮีซีฟ (Cohesive force)

### 2.4.1 แรงแอดฮีซีฟ (Adhesive force)

แรงแอดฮีซีฟ เป็นแรงระหว่างพื้นผิวของสารยึดติดกับโลหะสัปสเตรท โดยค่าพลังงานในการยึดติดกันของวัสดุทั้งสองจะมีค่าเท่ากับการแยกผิวสัมผัสออกจากกันเพื่อทำให้เกิดพื้นผิวอิสระสองพื้นผิวแต่มีทิศทางตรงกันข้ามดังรูป 2.11



**รูปที่ 2.11** พลังงานที่ใช้ในการยึดเกาะและการแยกออกที่ผิวสัมผัสระหว่างสารยึดติดกับโลหะ สับสเตรท

จากรูปที่ 2.11 สามารถหาพลังงานในการยึดติดกันของสารยึดติดกับโลหะสับสเตรทได้ดัง สมการ 2.5

$$W_A = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (2.5)$$

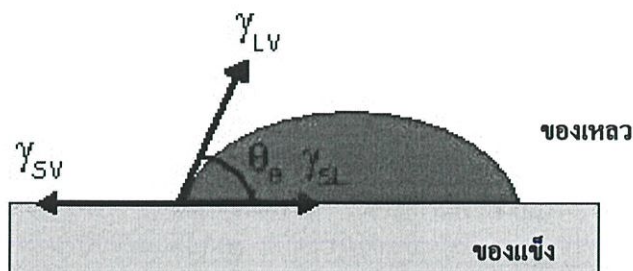
โดยที่  $W_A$  = พลังงานในการยึดติดกันของสารยึดติดกับโลหะสับสเตรท (จูล)

$\gamma_1$  = พลังงานพื้นผิวอิสระของสารยึดติด (จูล)

$\gamma_2$  = พลังงานพื้นผิวอิสระของโลหะสับสเตรท (จูล)

$\gamma_{12}$  = พลังงานผิวสัมผัสอิสระระหว่างสารยึดติดกับโลหะสับสเตรท (จูล)

ค่าพลังงานของพื้นผิวสามารถหาได้อีกวิธีหนึ่งโดยใช้วิธีการหาค่ามุมสัมผัส (Contact Angle) ค่ามุมสัมผัสคือมุมที่ของเหลวสัมผัสกับของแข็ง วิธีการวัดมุมสัมผัสเป็นการวัดแรงตึงผิวที่ อุณหภูมิห้อง โดยทั่วไปแล้วค่าแรงตึงผิวสามารถคำนวณได้เฉพาะวัสดุที่อยู่ในสถานะเป็นของเหลว Young [13] ได้เสนอสมการเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าแรงตึงผิวของของแข็ง โดยใช้เวกเตอร์แสดง ความสัมพันธ์ของค่าแรงตึงผิวระหว่างของแข็งกับของเหลวโดยแสดงดังรูปที่ 2.12



**รูปที่ 2.12** ทิศทางของแรงตึงผิวระหว่างของแข็ง-ของเหลวในรูปเวกเตอร์ของแรงที่กระทำร่วมกัน [13]

จากรูปที่ 2.11 คูณแรงของเวกเตอร์ทั้ง 3 ทิศทางจะได้ สมการที่ 2.6

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SV} - \gamma_L \cdot \cos \theta \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\gamma_{SV}$  คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็ง-ของเหลว ณ สภาวะสมดุล

$\gamma_{SL}$  คือ แรงตึงผิวระหว่างของแข็ง-ไอ ณ สภาวะสมดุล

$\gamma_L$  คือ แรงตึงผิวของของเหลว ณ สภาวะสมดุล

$\theta$  คือ มุมสัมผัสที่วัดได้จากหยดของของเหลวบนของแข็ง

ในการคำนวณหาแรงตึงผิวของแผ่นพอลิเมอร์ Dupre [13] ได้เสนอสมการในการคำนวณหางานที่เกิดขึ้นระหว่างของแข็ง-ของเหลว (Work of Adhesion,  $W_a$ ) จากการขจัดผลลัพท์ของเวกเตอร์ใน 3 ทิศทางที่เกี่ยวข้อง ดังสมการที่ 2.7

$$W_a = \gamma_L + \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (2.7)$$

เมื่อรวมสมการที่ 2.6 กับ สมการที่ 2.7 เข้าด้วยกันจะได้

$$W_a = \gamma_L \cdot (\cos \theta + 1) \quad (2.8)$$

สมการที่ 2.8 นี้เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณหางานที่เกิดจากการยึดเหนี่ยวระหว่างของแข็ง-ของเหลวได้โดยวัดมุมสัมผัสระหว่างผิวแผ่นพอลิเมอร์กับของเหลวและค่า  $\gamma_L$  สามารถหาได้จาก Marie C.M [14]

#### 2.4.2 แรงโคฮีซีฟ (Cohesive force)

แรงโคฮีซีฟ เป็นแรงภายในเนื้อของสารยึดติดและโลหะสับสเตรท โดยพลังงานที่ใช้หาได้จากสมการ 2.9

$$W_C = 2\gamma \quad (2.9)$$

โดยที่  $W_C$  = พลังงานภายในเนื้อของสารยึดติดหรือโลหะสับสเตรท (จูล)

$\gamma$  = พลังงานพื้นผิวอิสระของสารยึดติดหรือโลหะสับสเตรท (จูล)

แรงแอดฮีซีฟ และแรงโคฮีซีฟ เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลหรืออะตอม ซึ่งเป็นผลของประจุไฟฟ้าที่ต่างกัน โดยโมเลกุลที่มีขั้วบวกจะดึงดูดโมเลกุลที่มีขั้วลบที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง ซึ่งถ้ามีจำนวนประจุมากและระยะห่างระหว่างโมเลกุลน้อยแล้ว ก็จะส่งผลให้มีแรงดึงดูดมากขึ้น การที่วัตถุทั้งสองจะหลุดออกจากกันนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากแรงแอดฮีซีฟหรือแรงโคฮีซีฟมีค่าน้อยลง โดยสามารถสังเกตการฉีกขาดของวัสดุทั้งสอง ถ้ามีการฉีกขาดบริเวณพื้นผิวของวัสดุทั้งสองแสดงว่าแรงแอดฮีซีฟในการยึดติดนั้นมีค่าน้อย แต่ถ้ามีการฉีกขาดในเนื้อของวัสดุแสดงว่าแรงโคฮีซีฟมีค่าน้อย

## 2.5 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติส่วนมากเป็นยางที่ได้มาจากต้นยาง *Hevea Brazilliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำ อเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรี๊ดได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อเยื่อแห้ง (dry rubber) ประมาณ 30 % แขนงลอยอยู่ในน้ำ ถ้านำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60 % เรียกว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) การเติมสารแอมโมเนียลงไปจะช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน น้ำยางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมถุงมือยางและถุงยางอนามัย เป็นต้น แต่เมื่อนำน้ำยางสดที่กรี๊ดได้มาเติมกรดเพื่อให้อนุภาคน้ำยางจับตัวกันเป็นของแข็งแยกตัวจากน้ำ จากนั้นก็รีดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีด (two-roll mill) และนำไปตากแดดเพื่อไล่ความชื้นก่อนจะนำไปอบรมควันที่อุณหภูมิประมาณ 60-70 °C เป็นเวลา 3 วันเราก็จะได้ยางแผ่นรมควัน นอกจากยางแผ่นรมควันแล้ว อุตสาหกรรมส่วนใหญ่เริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบ ทั้งนี้เนื่องจากยางแท่งเป็นยางมีคุณภาพที่สม่ำเสมอกว่ายางแผ่นรมควัน ผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ วัตถุดิบของการผลิตยางแท่ง ได้แก่ น้ำยางหรือยางแผ่นข้นอยู่กับเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต เช่น ถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR5L ซึ่งมีสีจางมาก จำเป็นต้องใช้น้ำยางเป็นวัตถุดิบ หรือถ้าต้องการผลิตยางแท่งเกรด STR20 ซึ่งเป็นเกรดที่มีสีเงาปนสูงและมีสีเข้ม ก็อาจใช้ยางแผ่นหรือขี้ยางเป็นวัตถุดิบ เป็นต้น ส่วนกระบวนการผลิตยางแท่งค่อนข้างจะยุ่งยากต้องอาศัยเครื่องจักรที่มีราคาแพง และต้องมีการควบคุมคุณภาพอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นราคายางแท่งจึงสูงกว่ายางแผ่นรมควัน

ยางธรรมชาติเป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งมีชื่อทางเคมีคือ พอลิไอโซพรีน (cis-1,4 polyisoprene) เกิดจากโมโนเมอร์ไอโซพรีน (2-เมททิล-1,3-บิวตะไดอิน) เชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาวด้วยพันธะโควาเลนต์ ดังรูปที่ 2.13



ระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด เช่น สารป้องกันการเสื่อมสภาพ เพื่อยืดอายุการใช้งาน

## 2.6 อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่อ่อนและเบาที่มีลักษณะไม่เป็นเงา เนื่องจากเกิดการออกซิเดชันชั้นบางๆ ที่เกิดขึ้นเร็วเมื่อสัมผัสกับอากาศ โลหะอะลูมิเนียมไม่เป็นสารพิษ ไม่เป็นแม่เหล็ก และไม่เกิดประกายไฟ อะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่ใช้ทำสับสเตรทได้ดี เนื่องจากมีพลังงานที่ผิวสูงและมีความต้านทานต่อสถานะแวดล้อมต่างๆ ได้ดี นอกจากนี้โครงสร้างโมเลกุลของอะลูมิเนียมมีอัตราส่วนระหว่างความยาวพันธะกับน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในการนำมาใช้ในการยึดติดกับวัสดุอื่น ทำให้ถูกนำมาใช้อุตสาหกรรมอากาศยานและยานยนต์ต่างๆ นอกจากนี้ยังถูกนำมาใช้เป็นวัสดุสับสเตรทเพื่อเปรียบเทียบการยึดติดของสารยึดติดต่างๆ อะลูมิเนียมมีพื้นผิวที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย ทำให้เกิดชั้นออกไซด์ขึ้นอย่างรวดเร็วหลังการปรับสภาพผิว โดยชั้นของอะลูมิเนียมออกไซด์นี้ จะมีความคงทนแข็งแรงในการยึดติดกับอะลูมิเนียมและช่วยในการยึดติดกับสารยึดติดได้ดีมากกว่าการนำสารยึดติดมายึดติดบนเนื้อของอะลูมิเนียมโดยตรง

เมื่อวัดในทั้งปริมาณและมูลค่า การใช้อะลูมิเนียมมีมากกว่าโลหะอื่น ๆ ยกเว้นเหล็ก และมีความสำคัญในเศรษฐกิจโลกทุกด้าน อะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีแรงต้านการดึงต่ำ แต่สามารถนำไปผสมกับธาตุต่าง ๆ ได้ง่าย เช่น ทองแดง สังกะสี แมกนีเซียม แมงกานีส และซิลิกอน ในปัจจุบันวัสดุเกือบทั้งหมดที่เรียกว่าอะลูมิเนียมเป็นโลหะผสมของอะลูมิเนียม อะลูมิเนียมบริสุทธิ์จะใช้เฉพาะเมื่อต้องการความทนต่อการกัดกร่อนมากกว่าความแข็งแรงและความแข็ง เมื่อรวมกับกระบวนการทางความร้อนและทางกลโลหะผสมของอะลูมิเนียมจะมีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่ดีขึ้น โลหะผสมอะลูมิเนียมเป็นส่วนสำคัญของเครื่องบินและจรวด เนื่องจากมีอัตราความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง

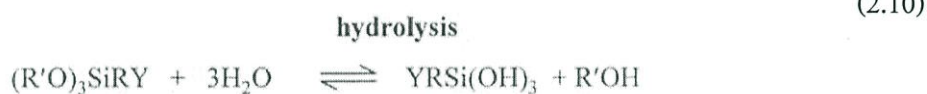
อะลูมิเนียมสามารถสะท้อนแสงที่มองเห็นได้ดีเยี่ยม (~99%) และสามารถสะท้อนแสงอินฟราเรดได้ดี (~95%) อะลูมิเนียมชั้นบาง ๆ สามารถสร้างบนพื้นผิวเรียบด้วยวิธีการควบแน่นของไอสารเคมีหรือวิธีการทางเคมี เพื่อสร้างผิวเคลือบแบบออปติคัล (optical coating) และกระจกเงา ผิวเคลือบเหล่านี้จะเกิดชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์ที่บางยิ่งกว่า ที่ไม่สึกกร่อนเหมือนผิวเคลือบเงิน กระจกเงาเกือบทั้งหมดสร้างโดยใช้อะลูมิเนียมชั้นบางบนผิวหลังของแผ่นกระจกลอย กระจกเงาในกล้องโทรทรรศน์จะมีการเคลือบอะลูมิเนียมไว้ข้างหน้าเพื่อป้องกันการสะท้อนภายใน กระจกเหล่านี้จะเกิดความเสียหายได้ง่ายกว่ากระจกตามบ้านทั่วไปที่เคลือบด้านหลัง

## 2.7 สารคู่ควบไซเลน (Silane Coupling Agent)

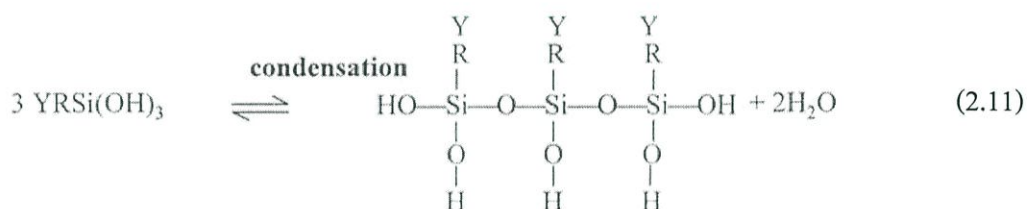
สารคู่ควบเป็นสารที่เพิ่มความสามารถในการยึดติดกันระหว่างพอลิเมอร์อินทรีย์กับพื้นผิวอนินทรีย์ นอกจากนี้สารคู่ควบยังใช้เป็นตัวเคลือบพื้นผิวหรือปรับปรุงสภาพพื้นผิวอีกด้วย ความหนาของชั้นสารคู่ควบไซเลนที่มีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มการยึดติดของพื้นผิวจะเท่ากับความหนาของการจัดเรียงตัวแบบชั้นเดียวซึ่งจะเปลี่ยนไปตามประเภทของสาร ส่วนมากสารคู่ควบจะใช้เป็นสารเติมแต่งในสารยึดติด ซึ่งตัวอย่างสารคู่ควบที่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรม เช่น ไซเลนอินทรีย์ (Organosilanes), เซอร์โคเรทอนอินทรีย์ (Organozirconates), เซอร์โค-อะลูมิเนียมอินทรีย์ (Organozircono-aluminates), สารเชิงซ้อนโครเมียม (Chorme Complexes)

สารคู่ควบไซเลนเป็นสารคู่ควบประเภทหนึ่งที่นิยมใช้เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการยึดติด โดยสารคู่ควบไซเลนนี้จะมีโมเลกุลที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาทางเคมีได้กับพื้นผิวของของแข็งและเข้าทำปฏิกิริยาได้ในเนื้อของพอลิเมอร์ สารคู่ควบไซเลนประกอบด้วยโมเลกุลของไซเลนเป็นส่วนใหญ่ [16] และมีโครงสร้างทั่วไปเป็น  $X_3Si-R-Y$  โดยที่ X คือ หมู่ไฮโดรไลซ์ ที่อยู่บนอะตอมของซิลิกอนซึ่งอยู่ในรูปของพันธะออกซิเจน (M-O-Si) R คือ โมเลกุลที่อยู่ระหว่างอะตอมของซิลิกอนกับหมู่ที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์และ Y คือหมู่ฟังก์ชันอินทรีย์ ที่สามารถสร้างพันธะกับพอลิเมอร์อินทรีย์ได้ขึ้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของโลหะแสดงดังรูป

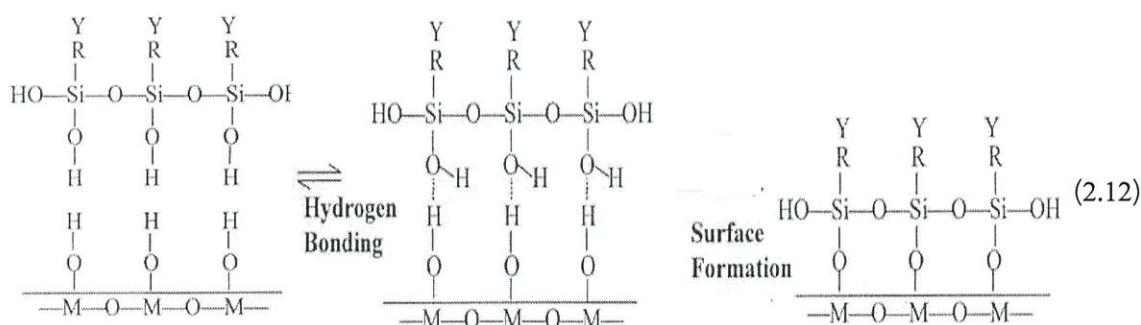
### 1. ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส



### 2. ปฏิกิริยาการควบแน่น

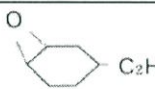


### 3. ปฏิกิริยาการเกิดพันธะไฮโดรเจนบนผิวโลหะ

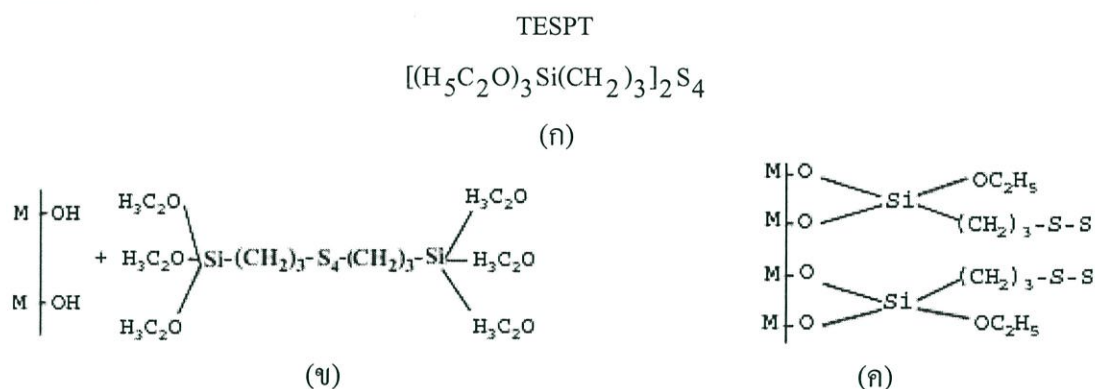


สารกลุ่มควาไซเลนมีการคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1948 และถึงแม้ว่าความสามารถในการยึดติดจะเป็นปัจจัยหนึ่งของสารกลุ่มควา แต่ปัจจัยอื่นๆ ก็มีความสำคัญเช่นกัน เช่นในทางปฏิบัติการเติมสารกลุ่มควานั้นจะต้องทำให้สารกลุ่มควานั้นสามารถซึมเข้าสู่พอลิเมอร์อย่างรวดเร็ว สำหรับตัวอย่างประเภทของสารกลุ่มควาไซเลนที่ใช้อย่างแพร่หลายแสดงไว้ดังตารางที่ 2.1

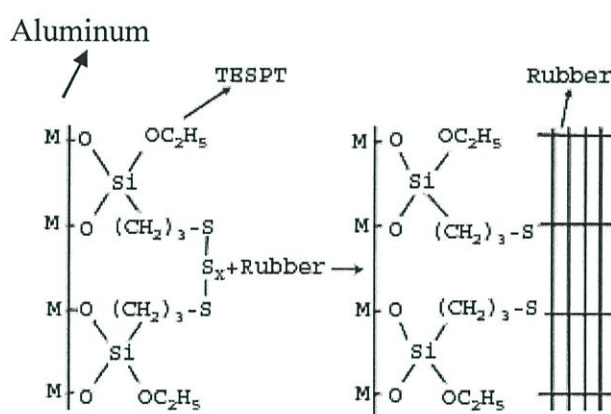
**ตารางที่ 2.1** ประเภทของสารกลุ่มควาไซเลน [17]

ประเภท	ชื่อทางเคมี	สูตรโครงสร้าง	เรซินหลัก
<b>Vinylsilane</b>	Vinyltrichlorosilane	$\text{CH}_2=\text{CHSiCl}_3$	Unsaturated polyester
	Vinyltris ( $\beta$ methoxyethoxy) silane	$\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_4\text{OCH}_3)_3$	
	Vinyltriethoxysilane	$\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$	Crosslinking polyethylene
	Vinyltrimethoxysilane	$\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OCH}_3)_3$	
<b>Acryloxy</b>	3-metacryloxypropyl-trimethoxysilane	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_2=\text{C}-\text{C}-\text{O}-\text{C}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3 \\    \\ \text{O} \end{array}$	Unsaturated polyester
<b>Epoxy silane</b>	$\beta$ -(3,4 epoxy cyclohexyl)-ethyltrimethoxysilane	 $\text{C}_2\text{H}_4\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$	Epoxy, phenolic and melamine
	<i>r</i> -glycidoxypropyl-trimethoxysilane	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2\text{OC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3 \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{O} \end{array}$	Epoxy, phenolic and melamine
	<i>r</i> -glycidoxypropyl-trimethoxysilane	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}_2\text{OC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_2 \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{O} \end{array}$	Epoxy, phenolic and melamine
<b>Aminosilane</b>	N- $\beta$ (aminoethyl)- <i>r</i> -aminopropyl-trimethoxysilane	$\text{H}_2\text{NC}_2\text{H}_4\text{NHC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$	Epoxy, phenolic and melamine
	N- $\beta$ (aminoethyl)- <i>r</i> -aminopropyl-methyl dimethoxysilane	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{H}_2\text{NC}_2\text{H}_4\text{NHC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_2 \end{array}$	Epoxy, phenolic, melamine and furan
	3-aminopropyl-triethoxysilane	$\text{H}_2\text{NC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$	Nylon, phenolic, epoxy and melamine
	N-phenyl- <i>r</i> -aminopropyl-trimethoxysilane	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NHC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$	Polymido, epoxy, phenolic and melamine
<b>อื่นๆ</b>	<i>r</i> -mercaptopropyl-trimethoxysilane	$\text{HSC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$	Rubber
	<i>r</i> -chloropropyl-trimethoxysilane	$\text{ClC}_3\text{H}_6\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$	Epoxy

สำหรับสารคู่ควบไซเลนที่ใช้ในการเพิ่มความสามารถในการยึดติดกันระหว่างยางพารา กับ อะลูมิเนียมในงานวิจัยนี้คือ สารคู่ควบไซเลนชนิด bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulphane (TESPT)



**รูปที่ 2.14** (ก) สูตรทางเคมีของ bis-(3-triethoxysilylpropyl)tetrasulphane (TESPT) (ข) ปฏิกิริยาของ TESPT กับ OH group บนผิวของโลหะ (ค) การเกิดพันธะทางเคมีของ TESPT กับ OH group บนผิวของโลหะ [18]



**รูปที่ 2.15** การเกิดปฏิกิริยาของ ethoxy group กับ OH group บนผิวของอะลูมิเนียม [18]

จากรูปที่ 2.14 และรูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นถึงกลไกการเข้าทำปฏิกิริยาของสารคู่ควบไซเลนชนิด TESPT บนผิวโลหะและในเนื้อของยางธรรมชาติ โดยสารคู่ควบไซเลน TESPT นั้นจะมีหมู่ฟังก์ชันที่เข้าทำปฏิกิริยาสองหมู่ฟังก์ชันคือหมู่ tetrasulphane และหมู่ ethoxy สำหรับหมู่ tetrasulphane นั้น ทำปฏิกิริยากับยาง ส่วนหมู่ ethoxy จะทำปฏิกิริยากับหมู่ OH ที่ผิวของอะลูมิเนียม จากกลไกที่เกิดขึ้นกล่าวจะทำให้ความสามารถในการยึดติดกันระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้น

## 2.8 การทดสอบโดยการลอก (Peel Test) [6]

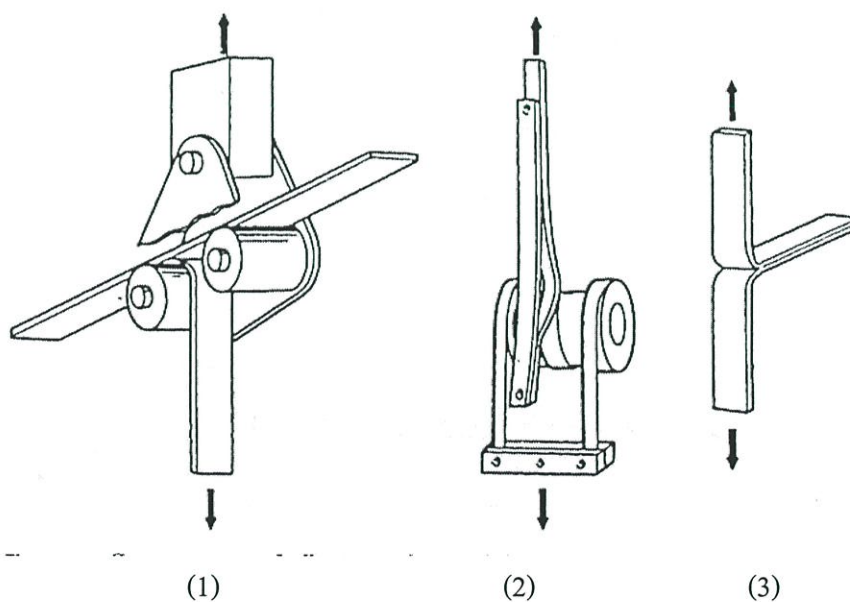
เป็นวิธีมาตรฐานในการทดสอบการยึดติดวิธีหนึ่งเพื่อหาค่าแรงยึดติดระหว่างสารยึดติดและสับสเตรท โดยใช้สารยึดติดที่สามารถยึดหยุ่นได้และสับสเตรทจะสามารถยึดหยุ่นหรือไม่ก็ได้ ผลที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับประเภทของสารยึดติดและสภาวะแวดล้อมขณะที่ทำการทดสอบ

ในการทดสอบโดยทั่วไปจะทำการลอกออกที่มุม 90 หรือ 180 องศา และสามารถแบ่งวิธีการทดสอบได้เป็น 3 วิธีได้แก่

1. การทดสอบการดึงลอกแบบตัวที เป็นวิธีการทดสอบที่นิยมที่สุด โดยสารยึดติดและสับสเตรทเป็นวัสดุที่สามารถยึดหยุ่นได้ เนื่องจากมุมในการลอกไม่สามารถควบคุมได้ ทำให้ค่าที่ได้จากการวัดนั้นมีความแน่นอนน้อยกว่าวิธีอื่น

2. การทดสอบการดึงลอกแบบลูกกลิ้ง เป็นวิธีการทดสอบ โดยใช้สารยึดติดที่สามารถยึดหยุ่นได้และใช้สับสเตรทเป็นของแข็งที่ไม่สามารถยึดหยุ่นได้ ทำให้สามารถกำหนดมุมในการลอกด้วยลูกกลิ้ง และค่าที่ได้จากการวัดจะมีความแน่นอนมากกว่าการลอกในลักษณะรูปตัวที (T-peel Test)

3. การทดสอบการดึงลอกแบบ Climbing-drum โดยทั่วไปจะถูกใช้ในการทดสอบการยึดติดระหว่างโลหะกับวัสดุที่มีรูพรุน แต่ก็สามารถนำมาทดสอบกับการยึดติดของสารยึดติดกับสับสเตรทอย่างใดอย่างหนึ่งที่สามารถยึดหยุ่นได้ หรือสามารถยึดหยุ่นได้ทั้งสองชนิด โดยจะได้ผลที่มีค่าค่อนข้างแน่นอนเนื่องจากมีลูกกลิ้งที่ควบคุมมุมที่ใช้ในการลอก



**รูปที่ 2.16** การทดสอบสภาพการยึดติดด้วยการลอกโดย (1) การทดสอบการดึงลอกแบบลูกกลิ้ง (2) การทดสอบการดึงลอกแบบ Climbing-drum (3) การทดสอบการดึงลอกแบบตัวที

ในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบการดึงลอคด้วยมุม 90 องศา โดยการนำค้อนน้ำหนักแขวนไว้ที่ปลายด้านหนึ่งของยางธรรมชาติแล้วปล่อยค้อนน้ำหนักให้ตกลงตามแรงโน้มถ่วงของโลก ค่าความแข็งแรงทางกลที่ผิวสัมผัสที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีการนี้สามารถหาได้โดยการวัดค่าพลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสออกจากกัน ซึ่งค่าพลังงานที่ใช้ในการแยกที่ผิวสัมผัสแสดงไว้ดังสมการที่ 2.13

$$G = \frac{P(1 - \cos\theta)}{b} \quad (2.13)$$

โดยที่  $G$  = พลังงานที่ใช้ในการลอคยาง (จุดต่อตารางเมตร)

$P$  = แรงที่ใช้ดึงลอค (นิวตัน)

$b$  = ความกว้างของชิ้นงาน (เมตร)

$\theta$  = มุมที่ใช้ดึงลอค

## 2.9 พลังงานของการแตกหักของพันธะ (Fracture Energies, $G$ )

การแตกหักของพันธะในเนื้อเยื่อเป็นการแยกออกจากกันระหว่างมอนอเมอร์ในสายโซ่หลักของยาง ค่าความแข็งแรงทางกลที่ผิวสัมผัสนี้สามารถหาได้ โดยการวัดค่าพลังงานที่ใช้ในการแยกที่ผิวสัมผัส (Fracture Energy,  $G$ ) ออกจากกัน จากทฤษฎีการเกิดพันธะเคมี ค่าพลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสออกจากกันจะแปรผันโดยตรงกับกำลังสองของทั้งจำนวนพันธะที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยพื้นที่ (Areal Density of Bonded Sites,  $\Sigma$ ) และแรงที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสออกจากกัน ( $f$ ) ดังสมการ 2.14

$$G \propto \Sigma^2 f^2 \frac{D}{S} \quad (2.14)$$

โดยที่  $D$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใยพอลิเมอร์ (นาโนเมตร)

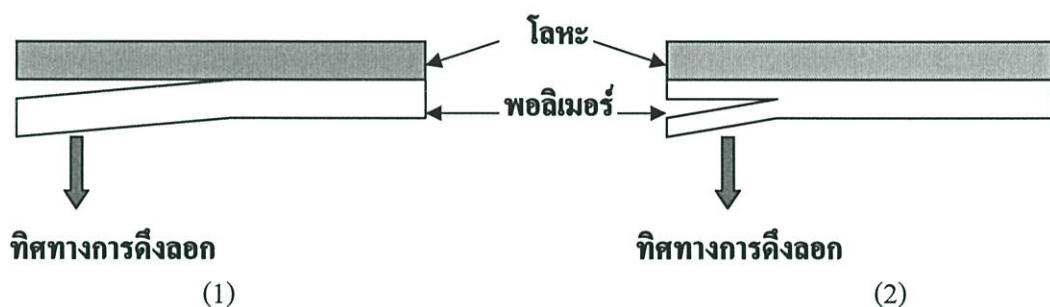
$S$  = ความเค้นที่ผิวสัมผัส (เมกะปาสคาล)

ความแข็งแรงเป็นข้อเสียของยางธรรมชาติ เพราะปกติแล้วยางธรรมชาติควรมีคุณสมบัติอ่อนนุ่ม มีความยืดหยุ่นสูง โดยความแข็งแรงนี้จะทำให้พลังงานการแตกหักของพันธะในเนื้อเยื่อไม่สัมพันธ์กับคุณสมบัติความเหนียวของยาง ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการแตกหักของพันธะประกอบด้วย พลังงานที่ใช้ในการทำลายพันธะ และพลังงานที่ทำให้เกิดการบิดรูปในยางซึ่งพลังงานที่ทำให้เกิดการบิดรูปจะมีค่าสูงกว่าพลังงานสำหรับการทำลายพันธะ ในส่วนของการเกิดการแยกกันระหว่างมอนอเมอร์

ของสายโซ่หลักในยาง จะเกิดการถ่ายเทพลังงานที่ใช้ในการแยกต่อเนื่องกันไประหว่างมอนอเมอร์ในสายโซ่หลักที่อยู่ติดกัน การแตกหักของพันธะจะเริ่มจากมอนอเมอร์ต้นกำเนิดที่ได้รับพลังงานดำเนินต่อไปจนถึงปลายสุดของมอนอเมอร์ที่เชื่อมโยงกัน สำหรับยางธรรมชาตินั้นจะมีค่าพลังงานในการแตกหักของพันธะในเนื้อยางซึ่งจัดเป็นคุณสมบัติเฉพาะอย่างหนึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง  $40 \text{ J/m}^2$  ถึง  $100 \text{ J/m}^2$

## 2.10 กลไกการแยกในเนื้อของวัสดุ

การเกิดการแยกกันของวัสดุนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีพลังงานที่มากเพียงพอที่จะใช้ในการทำลายพันธะที่ใช้ในการยึดติด ซึ่งการเกิดการแยกนั้นเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ เกิดการแยกที่ผิวสัมผัสและเกิดการแยกในเนื้อของพอลิเมอร์ สำหรับการเกิดการแยกที่ผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสอง เกิดขึ้นเมื่อความแข็งแรงของพันธะที่ผิวสัมผัสมีค่าน้อยกว่าความแข็งแรงของพันธะในเนื้อของพอลิเมอร์ การแตกสลายของพันธะจึงเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัส ส่วนการเกิดการแยกในเนื้อของพอลิเมอร์ เกิดขึ้นเนื่องจากความแข็งแรงของพันธะในเนื้อของพอลิเมอร์มีค่าน้อยกว่าความแข็งแรงของพันธะที่ผิวสัมผัสการแตกสลายพันธะจึงเกิดขึ้นในเนื้อของพอลิเมอร์ กลไกการแยกที่เกิดขึ้นทั้งสองกรณีแสดงดังรูปที่ 2.17



**รูปที่ 2.17** กลไกการเกิดการแยกของวัสดุโดย (1) เกิดการแยกที่ผิวสัมผัส (2) เกิดการแยกในเนื้อของพอลิเมอร์

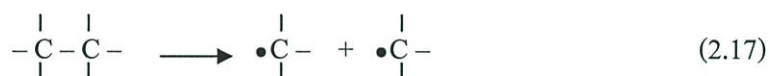
การเพิ่มความสามารถในการยึดติดกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะสามารถทำได้โดยการใช้สารคู่ควบไซเลน การเข้าทำปฏิกิริยาของสารคู่ควบไซเลนบนผิวของโลหะแสดงดังสมการที่ 2.12 ตัวอย่างในการศึกษากลไกการแยกในเนื้อของวัสดุระหว่างพอลิเมอร์และโลหะ โดยใช้สารคู่ควบไซเลนในการเพิ่มประสิทธิภาพการยึดติด เช่น กรณียของพอลิสไตรีนกับอะลูมิเนียม (PS/Al) ทำโดยการผสมสไตรีนมอนอเมอร์กับไซเลนเข้าด้วยกัน ไซเลนจะเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ หลังจากนั้นจึงนำไปหล่อด้วยแม่พิมพ์เพื่อทำการขึ้นรูป โดยไซเลนที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์จะเข้าทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมดังสมการที่ 2.15



จากสมการจะเห็นได้ว่า ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีไซเลนสร้างพันธะอยู่เท่านั้นที่จะทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียม ดังนั้นความเข้มข้นของไซเลนที่ผสมลงในสไตรีนมอนอเมอร์จึงมีผลต่อจำนวนพันธะระหว่างสไตรีนกับแผ่นอะลูมิเนียม ซึ่งหมายถึงความแข็งแรงของการยึดเกาะระหว่างสไตรีนกับอะลูมิเนียม ในการทดสอบการดึงลอกจะทำการเพิ่มขนาดค้อน้ำหนักเพื่อเพิ่มพลังงานที่ใช้ในการดึงลอก ดังนั้นความเร็วในการแยกจะแปรผันตรงกับขนาดค้อน้ำหนัก ในกรณีที่ทำทดสอบการดึงลอกโดยทำการดึงลอกในสภาวะปกติ (ในอากาศ) การเกิดการแยกอาจเกิดทั้งที่ผิวสัมผัสและในเนื้อของพอลิเมอร์ สำหรับการแตกสลายพันธะที่ผิวสัมผัสแสดงดังสมการที่ 2.16

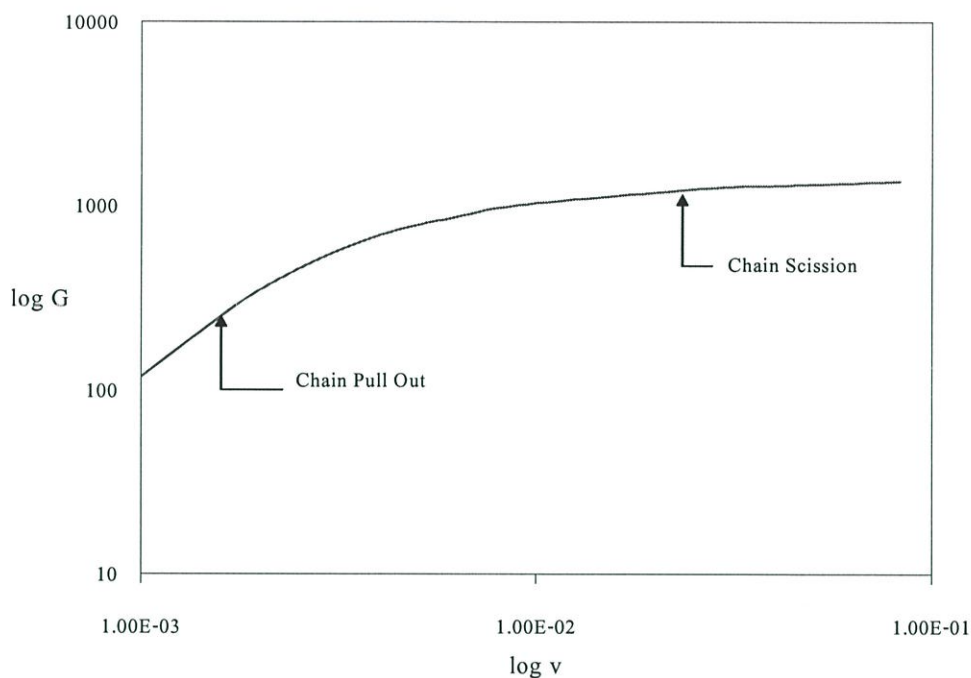


ส่วนการแตกสลายพันธะในเนื้อของพอลิเมอร์นั้นอาจเป็นการแตกสลายของพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมดังแสดงในสมการที่ 2.17



ถ้ากระบวนการทดสอบมีความชื้นสูง การสลายพันธะจะมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย โดยในการดึงลอกที่น้ำหนักลูกค้อน้ำหนักต่ำๆ พันธะซิล็อกเซน (Siloxane Bond) จะขาดออกจากกัน โดยมีน้ำเข้ามาทำปฏิกิริยาแทนที่ แต่เมื่อเพิ่มขนาดค้อน้ำหนัก ปฏิกิริยาไฮโดไลซิสจะเกิดขึ้นน้อย เมื่อการแยกผิวสัมผัสเกิดขึ้นด้วยความเร็วที่มากกว่าความเร็วในการแพร่ของน้ำเข้าสู่พันธะเคมีที่ผิวสัมผัสได้ทัน การแยกออกจากกันจะเป็นผลของการสลายพันธะแบบเชนซีสชัน (Chain Scission) เป็นส่วนใหญ่

จากการทดสอบโดยการลอกสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการแยกกับความเร็วที่ใช้ในการสลายพันธะได้ดังรูปที่ 2.18



**รูปที่ 2.18** ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการแยกกับความเร็วในการแตกสลายพันธะ [3]

จากรูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการแยกกับความเร็วในการแตกสลายพันธะ จะเห็นว่าเมื่อความเร็วในการแตกสลายพันธะสูงขึ้น พลังงานที่ใช้ในการแยกจะมีค่าสูงขึ้นด้วย และในช่วงที่ที่ความเร็วในการแตกสลายพันธะต่ำๆ การเพิ่มขึ้นของความเร็วจะมีผลต่อค่าของพลังงานที่ใช้ในการลอก ในช่วงนี้เรียกว่า Chain Pull Out โดยการฉีกขาดของชิ้นงานจะเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของพอลิเมอร์และโลหะ (Interfacial Failure Mode) สำหรับในช่วงความเร็วในการสลายพันธะสูงๆ การเพิ่มขึ้นของความเร็วจะมีผลต่อค่าของพลังงานที่ใช้ในการลอกน้อยมาก ถึงแม้ว่าจะใช้ความเร็วมากขึ้นแต่พลังงานที่ใช้ในการลอกจะยังคงมีค่าเท่าเดิม ดังนั้นการฉีกขาดของชิ้นงานจึงเกิดขึ้นในเนื้อของพอลิเมอร์ (Cohesive failure Mode) และเรียกช่วงนี้ว่า Chain Scission

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Brockmann และคณะ [3] และคณะผู้วิจัยกลุ่มอื่น [19] พบว่าโครงสร้างของออกไซด์ที่เหมาะสมต่อกันยึดติดกันจะต้องมีลักษณะความพรุนสูง มีโพรงอากาศเพื่อให้สายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถแพร่เข้าไปในโพรงขณะที่เป็นของเหลวและแข็งตัวลือกอยู่ในโพรงระหว่างที่เกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน กลไกนี้เรียกว่า Mechanical Interlocking ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของผิวสัมผัสโดยอาศัยการวิธีการทางกายภาพในการสร้างชั้นออกไซด์ที่มีรูปร่างเฉพาะ นอกจากนี้งานวิจัยโดย Namkanisorn และคณะ [4, 20, 21] พบว่าการปรับสภาพผิวด้วยวิธีการทางกายภาพที่เหมาะสมอาจทำ

ให้ผิวสัมผัสระหว่างพอลิस्टาไทรินและอะลูมิเนียมมีความแข็งแรงเทียบเท่ากับการใช้วิธีทางเคมีที่ใช้สารคู่ควบ (Coupling Agent) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของผิวสัมผัส

โดยปกติแล้วกลไกของการแยกจากกันของผิวสัมผัสในสถานะที่มีความชื้นจะขึ้นอยู่กับสองกลไกหลักคือการแยกที่ผิวสัมผัส (Interfacial fracture) และการแยกจากกันที่เกิดขึ้นในเนื้อของวัสดุ (cohesive fracture) โดยกลไกทั้งสองนี้มีความแตกต่างกันในแง่ของพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะของโมเลกุลที่เกี่ยวข้อง การเกิด cohesive fracture จะต้องใช้พลังงานสูงกว่า โดยอาจมีค่าสูงกว่าตั้งแต่สองสามเท่าจนถึงหลายสิบเท่าในบางกรณี หมายความว่าถ้าต้องการให้ผิวสัมผัสมีความแข็งแรง จะต้องทำให้กระบวนการแยกของผิวสัมผัสเกิดขึ้นในเนื้อ (bulk) ของยางธรรมชาติ ไม่ใช่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัส เราจึงต้องออกแบบการทดลองเพื่อวัดค่าของพลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสออกจากกัน แล้วเปรียบเทียบผลที่วัดได้กับแบบจำลองเพื่อให้ทราบว่าเมื่อใดที่ Interfacial fracture หรือ cohesive fracture เป็นกลไกที่ควบคุมการแยกของผิวสัมผัส ซึ่งผลที่ได้จะช่วยในการออกแบบผิวสัมผัสให้มีความแข็งแรงเชิงกลสูงขึ้น

Namkanisorn และคณะ [4] นำเสนอสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นในการแยกผิวสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมกับพอลิस्टาไทริน โดยพลังงานนี้จะเป็นผลรวมของพลังงานของการสลายพันธะด้วยการเกิดไฮโดรไลซิสที่ผิวสัมผัส และพลังงานที่ใช้สลายพันธะโดยการฉีกขาดของสายโซ่หลักในพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$E_a(t) = (E_{a1} - E_{a2}) \left( 1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \right) + E_{a2} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $E_{a1}$  คือค่าพลังงานก่อกัมมันต์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดไฮโดรไลซิสของพันธะ

$E_{a2}$  คือค่าพลังงานก่อกัมมันต์ที่ใช้ในการสลายพันธะในเนื้อยางธรรมชาติ (bond scission)

$\tau$  คือเวลาที่พันธะตอบสนองต่อแรงภายนอกเพื่อเปลี่ยนกลไกของการแยกที่ผิวจากไฮโดรไลซิสเป็น bond scission

พลังงานสุทธิตั้งใช้ในการแยกผิวสัมผัสออกจากกัน ( $G$ ) จะแปรผันตรงกับค่าความเค้นที่ผิวสัมผัส ( $\sigma_0$ ) ดังสมการ

$$G = \text{constant} \times \sigma_0^2 \quad (2.19)$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นในการทดลองสามารถวัดค่าของแรงที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสออกจากกัน ( $f$ ) โดยที่ค่านี้จะสัมพันธ์กับค่า  $\sigma_0$  และ  $\Sigma(t)$  ซึ่งแสดงถึงจำนวนของพันธะที่รับแรงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ตามสมการ

$$f = \sigma_0 / \Sigma(t) \quad (2.20)$$

เป็นที่น่าสังเกตว่าหากความเค้นที่ผิวสัมผัส  $\sigma_0$  มีค่าคงที่แล้ว แรงที่กระทำต่อพันธะจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อจำนวนของพันธะที่รับแรง  $\Sigma(t)$  ลดลง โดยแรงดังกล่าวจะเพิ่มสูงขึ้นจนมีค่าสูงเกินกว่าความแข็งแรงของพันธะ ซึ่งจะส่งผลให้ผิวสัมผัสแยกจากกัน ค่าของแรงที่กระทำต่อพันธะและจำนวนพันธะที่รับแรงจะเป็นฟังก์ชันของเวลา นั่นคือในช่วงแรกของการแยกที่ผิวจำนวนพันธะที่รับแรงจะมีจำนวนมากและลดลงตามลำดับเมื่อเวลาผ่านไป จนกระทั่งถึงจุดหนึ่งซึ่งจำนวนพันธะที่เหลืออยู่ไม่สามารถรับแรงได้อีกต่อไปอันนำไปสู่การแยกจากกันของผิวสัมผัส เราสามารถคำนวณค่า  $\Sigma(t)$  ได้จากความสัมพันธ์ตามสมการต่อไปนี้

$$-\frac{d\Sigma}{dt} = \frac{kT}{h} \Sigma \cdot \exp\left(-\frac{E_a(t) - \sigma_0 \lambda}{kT}\right) \quad (2.21)$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าคงที่โบลท์แมน

$T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

$h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดไฮดรอลิซิสของพันธะ

$\lambda$  คือ ระยะที่พันธะยึดออกก่อนที่จะขาดจากกัน

Ansarifar และคณะ [5] ได้ศึกษาการใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด bis[3-triethoxysilylpropyl] tetrasulphane (TESPT) เพื่อเพิ่มการยึดติดระหว่างยางธรรมชาติกับอนุภาคของซิลิกาที่ใช้เสริมแรง โดยพบว่าสมบัติเชิงกลเช่น ความแข็ง ความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความหนาแน่นที่จุดขาด และการเซ็ทตัวของเนื้อยางดีขึ้น ในทางกลับกันความแข็งแรงต่อแรงฉีก เปรอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด และการทนต่อความล้าลดลง

Cook และคณะ [22] ได้ศึกษาการยึดติดกันของยางธรรมชาติกับแผ่นเหล็ก โดยวัดค่าพลังงานที่ใช้ในการดึงลอก (peel energy) ที่มุมต่างๆ และใช้อัตราเร็วในการดึงลอกต่างๆ กัน ซึ่งจากการศึกษาพบว่า เมื่อมุมของการดึงลอกเพิ่มจาก 30 ถึง 90 องศา พลังงานที่ใช้ในการดึงลอกเพิ่มขึ้นประมาณ 5 เท่า แต่อัตราเร็วในการดึงลอกไม่มีผลต่อพลังงานที่ใช้ ในงานทดลองนี้จะกำหนดให้มุมของการดึงลอกมีค่าคงที่ที่ 90 องศา เพื่อความสะดวกในการออกแบบอุปกรณ์ทดลอง

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.1 วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 วัสดุ

1. น้ำยางพาราที่มีปริมาณเนื้อยาง 60 % ในสารละลายแอมโมเนีย
2. แผ่นอะลูมิเนียมความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร
3. แผ่นเทฟลอนความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร
4. แผ่นเหล็กความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร

##### 3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ชุดเครื่องให้ความร้อน (hot plate) ผู้ผลิต CTL รุ่น HS1
2. ถาดสแตนเลสสตีล ขนาด 18.5x28.5x4.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ผู้ผลิต LEO รุ่น LEO 1455VP
4. ชุดเครื่องมือทดสอบการลอกที่ผิว (Peel Test) พร้อมอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิที่พัฒนาขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ
5. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Power supply) ที่ใช้ทำอะโนไดซ์ ผู้ผลิต GW รุ่น GPS-3030DD

##### 3.1.3 สารเคมี

1. สารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 95-97% ผู้ผลิต Merck
2. สารละลายกรดฟอสฟอริก เข้มข้น 85% ผู้ผลิต Mallinckrodt
3. โซเดียมไดโครเมต (Sodiumdichromate) ผู้ผลิต Asia Pacific Specialty Chemical Limited.
4. โซเดียมโคเคกซิลซัลเฟต ผู้ผลิต Fisher Scientific UK Limited
6. กล้องวีดีโอ ผู้ผลิต SONY รุ่น SSC-DC398P

## 3.2 การเตรียมวัสดุ และสารเคมี

### 3.2.1 การเตรียมแผ่นอะลูมิเนียม

1. ตัดแผ่นอะลูมิเนียม ขนาดความกว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร
2. ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1000
3. ล้างด้วยน้ำสะอาด แล้วทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ

### 3.2.2 การเตรียมยางธรรมชาติ (ตามสูตรสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร)

1. เทน้ำยางธรรมชาติลงในบีกเกอร์ ใช้เท่งแก้วคนสารกวนน้ำยางประมาณ 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
6. เทสารเติมแต่งส่วนที่ 2 ผสมกับน้ำยางและคนให้เข้ากัน (ระวังอย่าให้เกิดฟองหากเกิดฟองให้ใช้ช้อนอะลูมิเนียมตักออก)
7. หากเป็นยางที่เติมสารคู่ควบประเภทไซเลน ต้องผสมไซเลนลงในน้ำสบู่มาก่อน โดยเติมไซเลนปริมาณ 4, 6, 10, 15, และ 20 phr ตามลำดับ และเติมน้ำสบู่ 15 phr กวนให้เข้ากันแล้วเติมลงในน้ำยางพารา

### 3.2.3 การเตรียมแม่พิมพ์เทฟลอน

1. ตัดแผ่นเทฟลอนขนาดความกว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร
2. นำแผ่นเทฟลอนที่ได้มาตัดช่องตรงกลางออกให้มีลักษณะคล้ายกรอบรูป โดยให้มีความหนา ของกรอบ 0.5 เซนติเมตร

### 3.2.4 การเตรียมสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก

1. ชั่งสารโซเดียมไดโครเมต จำนวน 20 กรัม
2. ตวงสารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 96% ปริมาตร 112 มิลลิลิตร
3. ตวงน้ำปริมาตร 600 มิลลิลิตร
4. เทสารละลายกรดซัลฟิวริก เข้มข้น 96% ลงในน้ำ แล้วจึงเทสารโซเดียมไดโครเมตลงไปผสมในบีกเกอร์

5. นำไปวางลงบนเครื่องให้ความร้อน โดยมีแม่เหล็กปั่นกวน เพื่อให้สารทั้งหมดละลายเข้าด้วยกัน

### 3.2.5 การเตรียมสารละลายกรดฟอสฟอริก

1. ตวงสารละลายกรดฟอสฟอริก เข้มข้น 85% โดยปริมาตร ปริมาตร 600 มิลลิลิตร
2. ตวงน้ำปริมาตร 4,500 มิลลิลิตร
3. สารละลายกรดฟอสฟอริก เข้มข้น 85% ลงในน้ำ แล้วคนให้เข้ากัน
4. ได้สารละลายกรดฟอสฟอริก เข้มข้น 10% โดยมวล ปริมาตร 5,100 มิลลิลิตร

## 3.3 การปรับสภาพผิวของแผ่นอะลูมิเนียม

### 3.3.1 การปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก

1. นำสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกเทใส่บีกเกอร์ ขนาด 1000 มิลลิลิตร แล้วนำไปให้ความร้อนบนเครื่องให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 58 องศาเซลเซียส
2. ใส่แผ่นอะลูมิเนียมลงในสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก ทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที
3. นำแผ่นอะลูมิเนียมออกจากสารละลาย นำไปล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized Water)
4. เป่าให้แห้งด้วยอากาศร้อน

### 3.3.2 การอะโนไดเซชัน

1. เตรียมอุปกรณ์โดยมี เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า 600 มิลลิแอมแปร์ อุปกรณ์ปรับความต้านทาน 1-35 โอห์ม แผ่นอะลูมิเนียม เป็นขั้วแอโนด (ขั้วบวก) ส่วนแผ่นเหล็ก เป็นขั้วแคโทด (ขั้วลบ)
2. เทสารละลายกรดฟอสฟอริกลงในภาชนะทดลอง
3. เปิดเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า (Power Supply) และควบคุมกระแสให้ผ่านชิ้นงานแต่ละชั้น 100 มิลลิแอมแปร์ โดยปรับที่อุปกรณ์ปรับความต้านทาน แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที
4. นำแผ่นอะลูมิเนียมออกจากที่จับ ล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized Water) แล้วเป่าให้แห้งด้วยอากาศร้อน

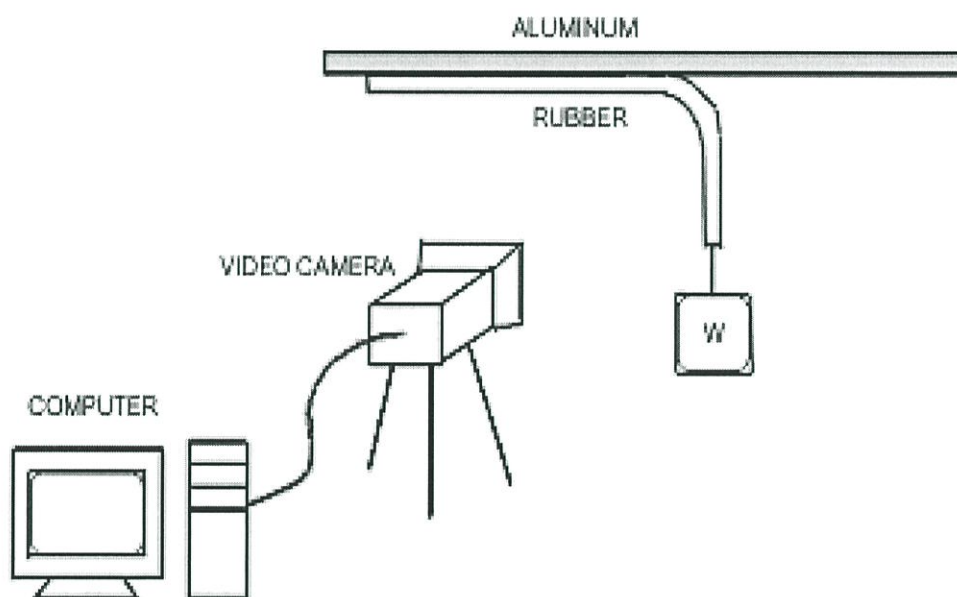
### 3.4 การขึ้นรูปชิ้นงานและการทดสอบความสามารถการยึดติด

#### 3.4.1 การขึ้นรูปชิ้นงาน

1. เทน้ำยางที่เตรียมไว้ลงในแผ่นอะลูมิเนียมให้เป็นแผ่นบาง แล้วนำไปเรียงในถาดสเตนเลส
2. นำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที
3. ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
4. ใช้ใบมีดกรีดแผ่นยางให้มีความกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร

#### 3.4.2 การทดสอบสภาพการยึดติดด้วยวิธีการดึงลอก

1. เตรียมอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.1



**รูปที่ 3.1** ชุดเครื่องมือสำหรับการทดสอบสภาพการยึดติดด้วยการลอก (Peel Test)

2. นำคลิปถ่วงด้วยค้อนน้ำหนักหีบบริเวณส่วนปลายของแผ่นยางธรรมชาติที่ยึดติดอยู่กับอะลูมิเนียม
3. นำชิ้นงานที่ถ่วงด้วยค้อนน้ำหนักแล้วไปพาดบนชุดทดสอบก่อนที่จะปล่อยค้อนน้ำหนัก โดยใช้กล้องวีดีโอบันทึกภาพการลอกออกของแผ่นยาง
4. นำภาพที่ได้มาวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

### 3.5 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิว

#### 3.5.1 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวโดย SEM

1. ตัดชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์พื้นผิวให้มีขนาด 0.5 -1 เซนติเมตร
2. นำชิ้นงานที่ได้ไปวิเคราะห์พื้นผิวด้วย SEM

#### 3.5.2 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวโดยการหามุมสัมผัส

1. หยดน้ำลงบนชิ้นงาน
2. ถ่ายรูปหยดน้ำด้วยกล้อง SONY รุ่น SSC-DC398P
3. นำรูปที่ได้ไปหามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิว

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การวิเคราะห์พื้นผิวอะลูมิเนียมหลังการปรับสภาพ ก่อนขึ้นรูปกับยางธรรมชาติ และผลการทดสอบความสามารถการยึดติดด้วยวิธีการดึงลอกและวิเคราะห์สภาพพื้นผิวหลังการทดสอบ

#### 4.1 การวิเคราะห์พื้นผิวอะลูมิเนียมหลังการปรับสภาพ

##### 4.1.1 การวิเคราะห์พื้นผิวอะลูมิเนียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวอะลูมิเนียมที่ผ่านการปรับสภาพโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก การอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริกและพื้นผิวที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพด้วย SEM และ TEM แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่า

ก. พื้นผิวไม่ได้ปรับสภาพ

จากการวิเคราะห์พื้นผิวโดย SEM พบว่าพื้นผิวไม่ราบเรียบและมีรอยขีดเกิดขึ้นบนพื้นผิว ซึ่งน่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากการรีดแผ่นอะลูมิเนียมในกระบวนการผลิต และไม่ปรากฏชั้นออกไซด์เกิดขึ้นที่พื้นผิว จากนั้นเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วย TEM พบว่าพื้นผิวอะลูมิเนียมมีความขรุขระอันเนื่องมาจากรอยขีดที่พื้นผิวและไม่ปรากฏชั้นออกไซด์เกิดขึ้น

ข. พื้นผิวที่ผ่านการปรับสภาพโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก

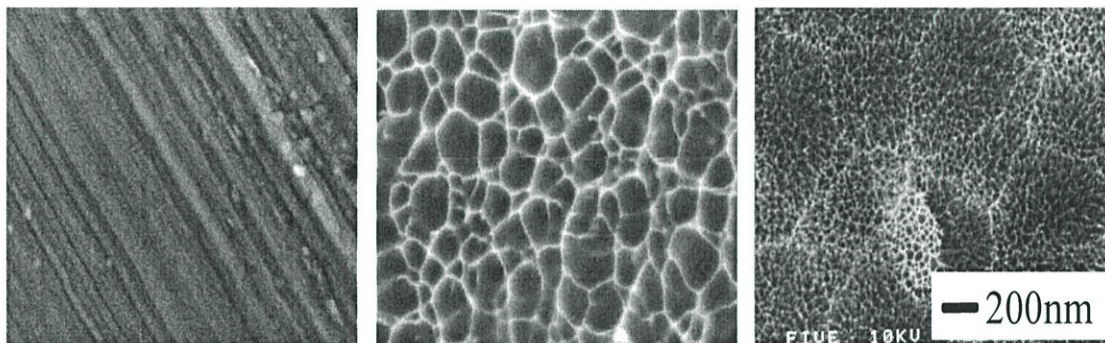
จากการวิเคราะห์พื้นผิวโดย SEM พบว่า พื้นผิวมีความขรุขระอันเนื่องมาจากชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้น โดยชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะเป็นรูปหกเหลี่ยมซ้อนทับกันอยู่ การเกิดขึ้นของชั้นออกไซด์นี้จะมีผลทำให้พื้นที่ผิวที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นด้วย และเมื่อนำพื้นผิวอะลูมิเนียมมาวิเคราะห์ด้วย TEM พบว่า ไม่ปรากฏเห็นชั้นออกไซด์ที่พื้นผิว ทั้งนี้เนื่องมาจากชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นมีความหนาน้อยมากจึงไม่สามารถระบุความหนาได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกนั้นมีความหนาประมาณ 5-10 นาโนเมตร [2, 3, 19]

ค. พื้นผิวที่ผ่านการปรับสภาพโดยการอะโนไดซ์ในสารละลายกรดฟอสฟอริก

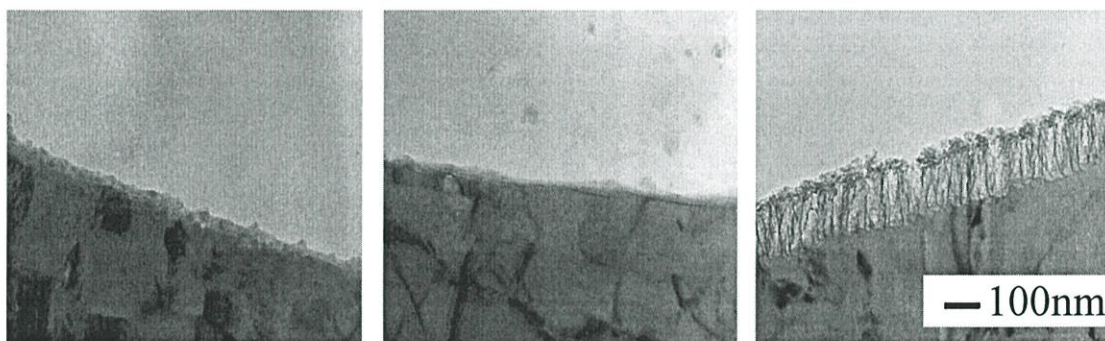
จากการวิเคราะห์พื้นผิวโดย SEM พบว่า พื้นผิวมีความขรุขระอันเนื่องมาจากชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นซ้อนทับกันอยู่ โดยชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นจะมีขนาดเล็กกว่าชั้นออกไซด์ที่เกิดจากการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก ซึ่งจะทำให้พื้นที่ผิวที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาของชั้นออกไซด์ที่

เกิดจากการอะโนไดซ์มีมากกว่าชั้นออกไซด์ที่เกิดจากการกัดด้วยกรด และเมื่อนำพื้นผิวอะลูมิเนียมมาวิเคราะห์ด้วย TEM พบว่าปรากฏเห็นชั้นออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งความหนาของชั้นออกไซด์นี้มีความหนาประมาณ 100 นาโนเมตรและมีโครงสร้างเป็นแท่งจัดเรียงอย่างมีระเบียบที่มองเห็นได้ชัดเจน

SEM (top view)



TEM (cross-sectional view)



ก.

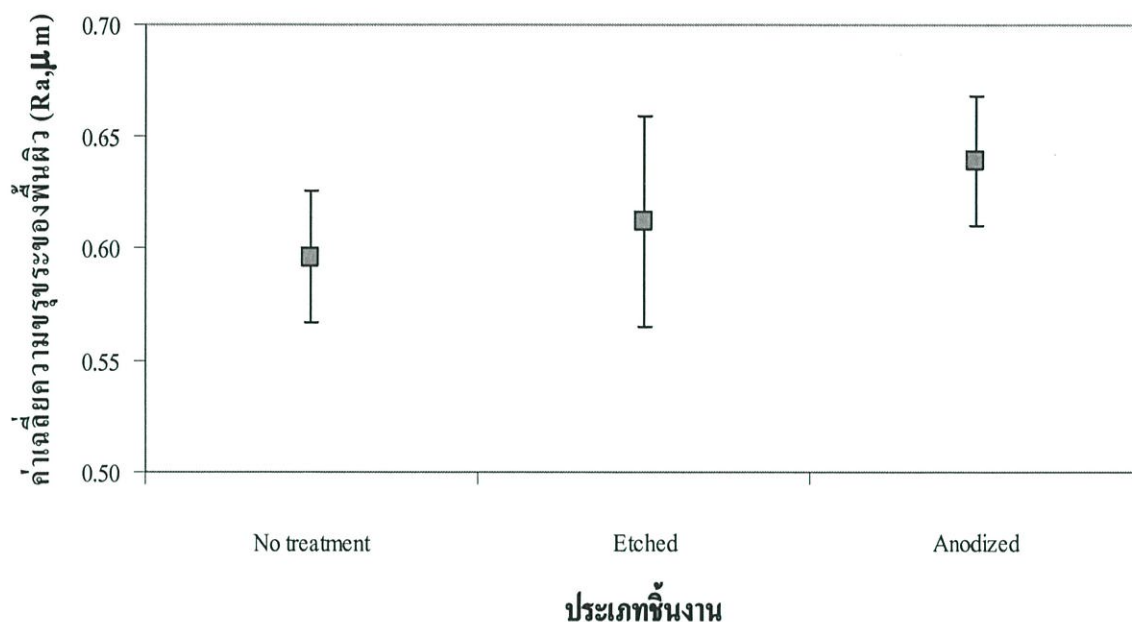
ข.

ค.

**รูปที่ 4.1** ภาพถ่าย SEM และ TEM แสดงลักษณะพื้นผิวของอะลูมิเนียมที่ผ่านการปรับสภาพผิวและไม่ได้ปรับสภาพผิวโดย ก. พื้นผิวที่ไม่ได้ปรับสภาพ ข. พื้นผิวที่ปรับสภาพโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก ค. พื้นผิวที่ปรับสภาพโดยการอะโนไดซ์ชั้นในสารละลายกรดฟอสฟอริก

#### 4.1.2 การวัดค่าความขรุขระของพื้นผิวอะลูมิเนียม

การวัดค่าความขรุขระของพื้นผิวโดยใช้เครื่อง Profilometer



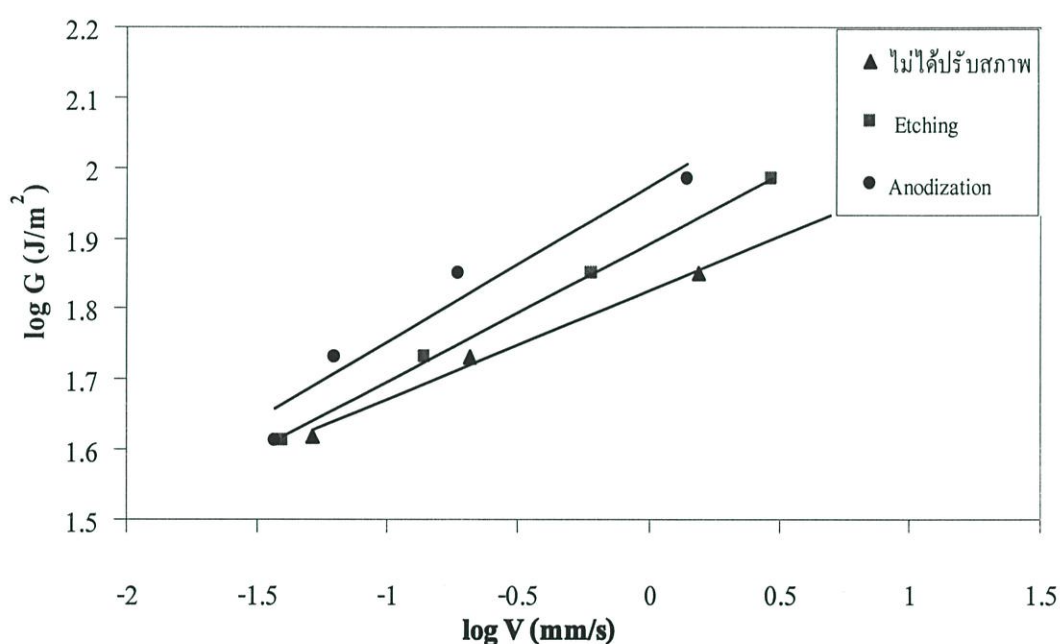
**รูปที่ 4.2** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขรุขระของพื้นผิวเฉลี่ยของอะลูมิเนียมแบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพพื้นผิว และที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกและการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริก มาทำการหาค่าความขรุขระของพื้นผิวพบว่า ค่าความขรุขระของพื้นผิวอะลูมิเนียมทั้ง 3 แบบนั้นมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน การวัดค่าความขรุขระโดยใช้ Profilometer นี้ไม่สามารถแยกความแตกต่างของความขรุขระของพื้นผิวทั้งสามประเภทได้ เนื่องจากเป็นการวัดระดับไมโครเมตร แต่ความขรุขระบนพื้นผิวของอะลูมิเนียมมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร อย่างไรก็ตามก็ตีผลจากการวัดความขรุขระของพื้นผิวด้วย Profilometer ทำให้ทราบว่าความขรุขระบนพื้นผิวของอะลูมิเนียมไม่แตกต่างกันในสเกลการวัดแบบมหัพรรณ (Macroscopic scale)

## 4.2 ผลการทดสอบความสามารถการยึดติดด้วยวิธีการดึงลอกและวิเคราะห์สภาพพื้นผิว หลังการทดสอบ

### 4.2.1 ผลของพื้นผิวที่มีต่อการยึดติด

การเปรียบเทียบความสามารถในการยึดติดของยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารคู่ควบไซเลน กับพื้นผิวอะลูมิเนียมที่ได้รับการปรับสภาพพื้นผิวโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก การอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริกและพื้นผิวที่ไม่ได้ปรับสภาพโดยทำการวัดความเร็วของการลอกยางออกจากแผ่นอะลูมิเนียมที่น้ำหนักต่างๆกันที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.3



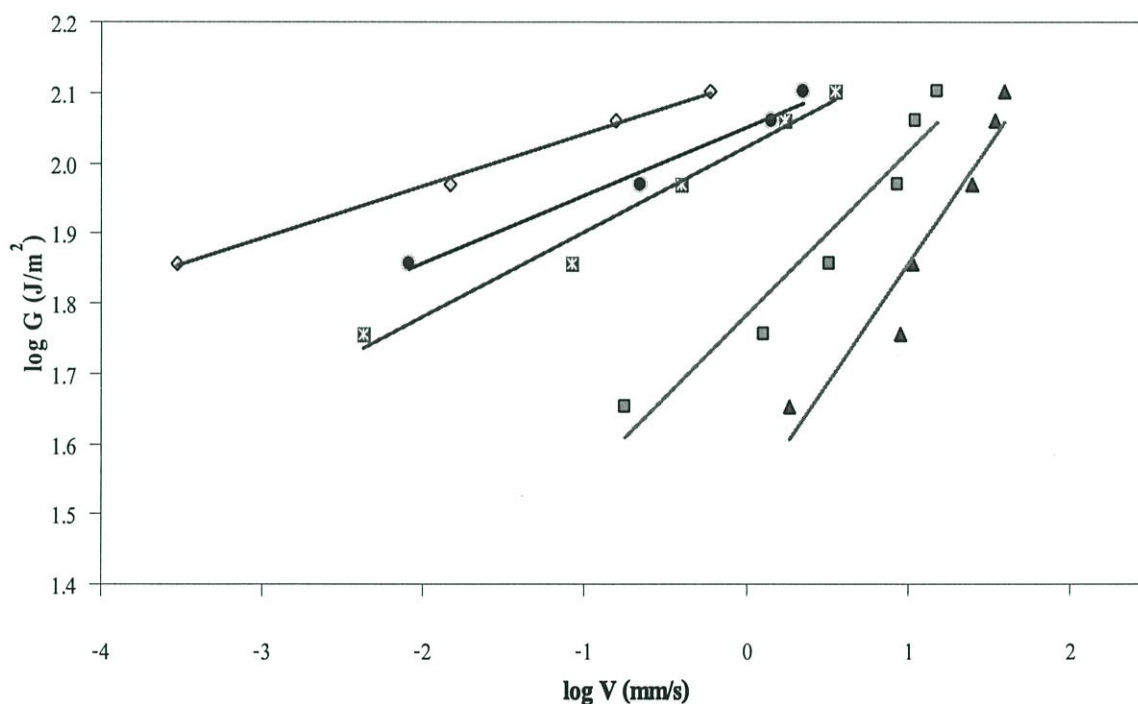
**รูปที่ 4.3** ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่าพลังงานที่ใช้ในการลอกยางธรรมชาติที่ไม่ได้เติมสารคู่ควบกับพื้นผิวอะลูมิเนียมที่ได้รับการปรับสภาพผิวโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก การอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริกและไม่ได้ปรับสภาพผิวโดยวิธีการลอกที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าที่ค่าพลังงานในการลอกเท่ากัน ค่าความเร็วในการลอกของแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ได้รับการปรับสภาพผิวมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือปรับสภาพโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกและปรับสภาพโดยการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริกจะมีค่าความเร็วในการลอกต่ำที่สุด แสดงว่าชิ้นงานที่ปรับสภาพผิวโดยการอะโนไดเซชันใน

สารละลายกรดฟอสฟอริกมีความแข็งแรงในการยึดเกาะกันสูงที่สุด เนื่องจากชั้นงานที่ผ่านการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริกนั้น จะเกิดชั้นออกไซด์ชั้นใหม่ด้วยโครงสร้างที่เป็น รูพรุน และพื้นที่ผิวของชั้นออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น เกิดจำนวนพันธะต่อพื้นที่ในการยึดติดมาก ทำให้การยึดติดระหว่างผิวสัมผัสมีความแข็งแรงสูง ความเร็วในการดึงลอกจึงน้อยที่สุด ส่วนชั้นงานที่ปรับสภาพผิวโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกจะมีพื้นที่ผิวของชั้นออกไซด์น้อยกว่า เกิดจำนวนพันธะต่อพื้นที่น้อยลง ทำให้ความแข็งแรงระหว่างผิวสัมผัสน้อยลงและให้ค่าความเร็วในการลอกสูงขึ้น ส่วนชั้นงานที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว จะมีพื้นที่ผิวของชั้นออกไซด์น้อยที่สุด ทำให้มีความแข็งแรงระหว่างผิวสัมผัสต่ำ และจะมีความเร็วในการลอกสูงที่สุด

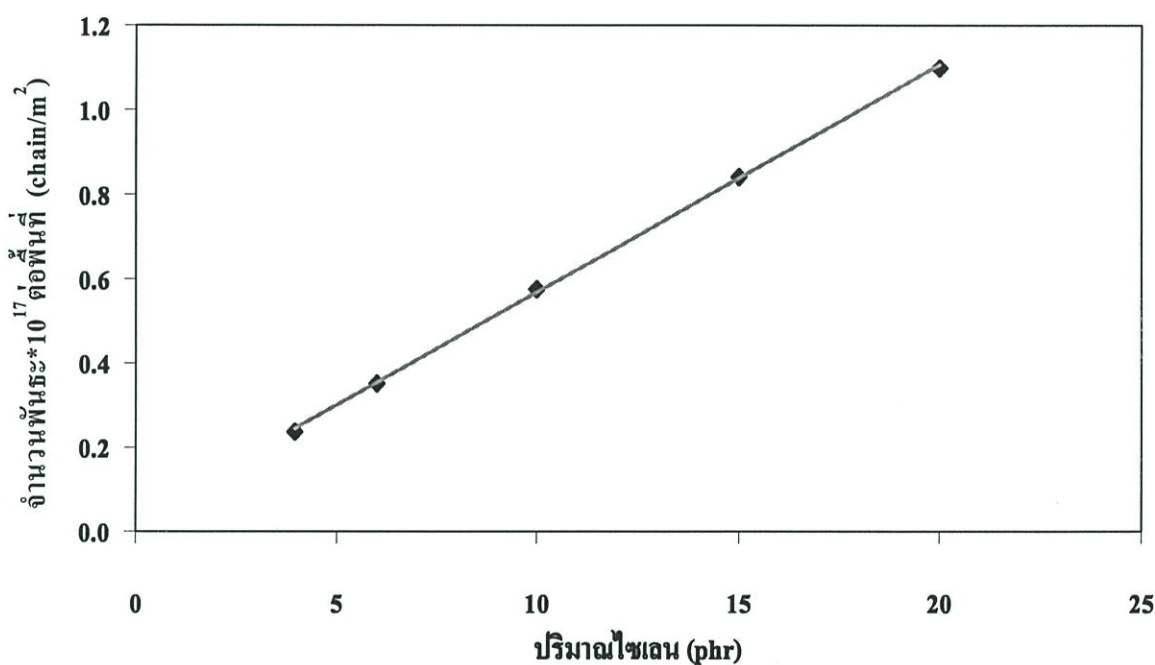
#### 4.2.2 ผลของปริมาณไซเลนที่มีต่อการยึดติด

การเปรียบเทียบความสามารถในการยึดติดของยางธรรมชาติที่เติมสารคู่ควบที่ความเข้มข้นต่างกับกับพื้นผิวอะลูมิเนียมที่ปรับสภาพพื้นผิวโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.4



**รูปที่ 4.4** ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและค่าพลังงานที่ใช้ในการลอกยางธรรมชาติที่เติมสารคู่ควบไซเลนชนิด bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulphane (TESPT) ที่ความเข้มข้น : (▲) 4 phr; (■) 6 phr, (⊠) 10 phr; (●) 15 phr และ (◇) 20 phr กับพื้นผิวอะลูมิเนียมที่ปรับสภาพโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก โดยวิธีการดึงลอกที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

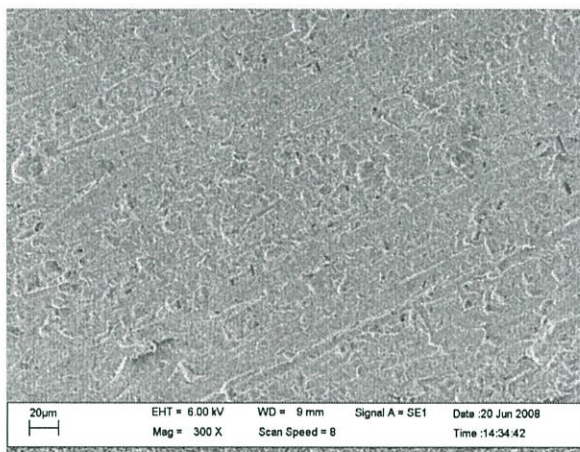
จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าที่ค่าพลังงานในการดึงลอกที่เท่ากัน ขางธรรมชาติที่เติมสารคู่ควบไซเลน 4 phr จะให้ค่าความเร็วในการดึงลอกมากที่สุด รองลงมาคือที่ 6, 10, 15 และ 20 phr ตามลำดับ นั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมสารคู่ควบไซเลนลงในยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงในการยึดติดระหว่างยางธรรมชาติกับพื้นผิวอะลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้น โดยสังเกตได้จากการที่ความเร็วในการดึงลอกที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งแรงของพื้นผิวแปรผันโดยตรงกับจำนวนพันธะที่รับแรง ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของสารคู่ควบไซเลนจึงเป็นการเพิ่มจำนวนพันธะที่รับแรงที่ผิวสัมผัสมีผลทำให้ผิวสัมผัสสามารถรับแรงได้สูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารคู่ควบไซเลนจนถึงปริมาณหนึ่งสารคู่ควบไซเลนจะมีผลต่อการยึดติดน้อยมาก เนื่องจากจำนวนพันธะต่อพื้นที่สูงกว่าจำนวนพันธะวิกฤต ทำให้มีจำนวนพันธะมากพอที่จะรับน้ำหนักที่เกิดจากการดึงลอกได้ ซึ่งได้อธิบายไว้โดย Ansarifar และคณะ [18] และจากการทดลองเมื่อทำการหาจำนวนพันธะต่อพื้นที่ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5



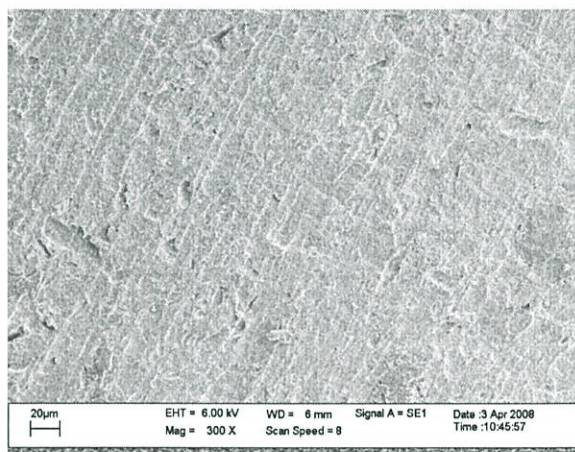
**รูปที่ 4.5** ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพันธะต่อพื้นที่กับปริมาณไซเลน

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของไซเลนที่เติมลงไปในยางธรรมชาติจะทำให้จำนวนพันธะต่อพื้นที่เพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณไซเลนที่เติมลงในยางจาก 4, 6, 10, 15 และ 20 phr ตามลำดับ ค่าจำนวนพันธะต่อพื้นที่ที่จะเพิ่มขึ้นเป็น  $2.365 \times 10^{16}$ ,  $3.513 \times 10^{16}$ ,  $5.764 \times 10^{16}$ ,  $8.423 \times 10^{16}$ ,  $1.098 \times 10^{17}$  chain/m<sup>2</sup> ซึ่งค่าจำนวนพันธะต่อพื้นที่ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความแข็งแรงของผิวสัมผัสเพิ่มตามไปด้วย

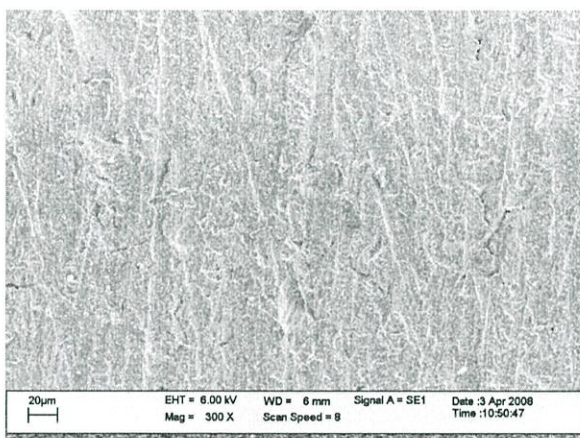
เมื่อนำพื้นผิวที่ผ่านการทดสอบโดยวิธีการดึงลอกมาวิเคราะห์สภาพพื้นผิวโดย SEM ผลการวิเคราะห์ได้แสดงดังรูปที่ 4.6



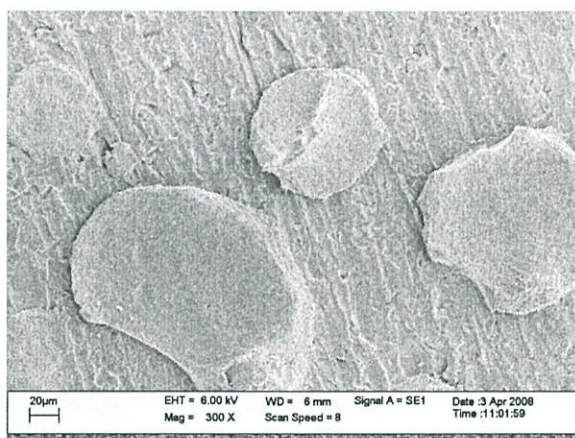
ก.



ข.



ค.

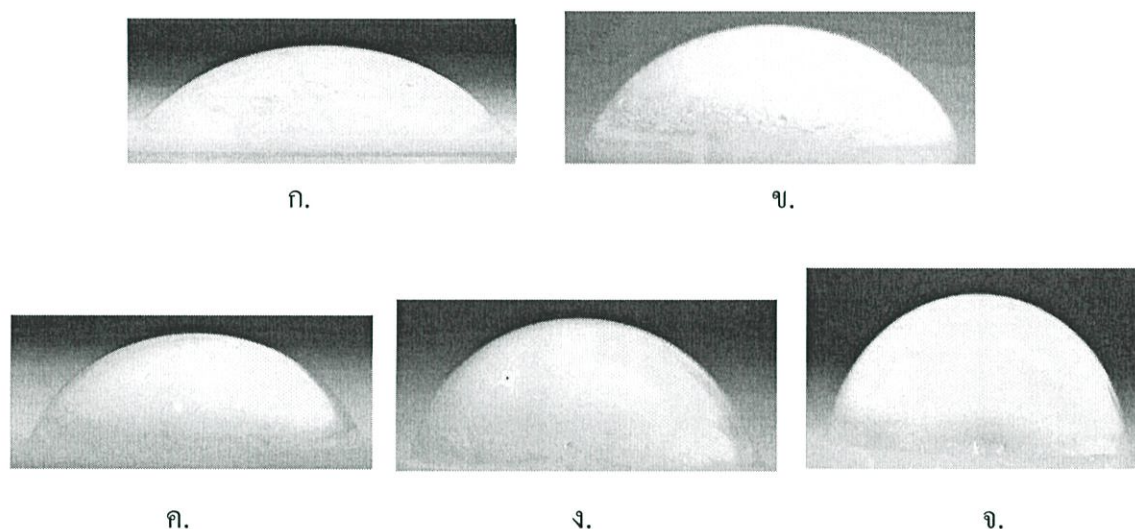


ง.

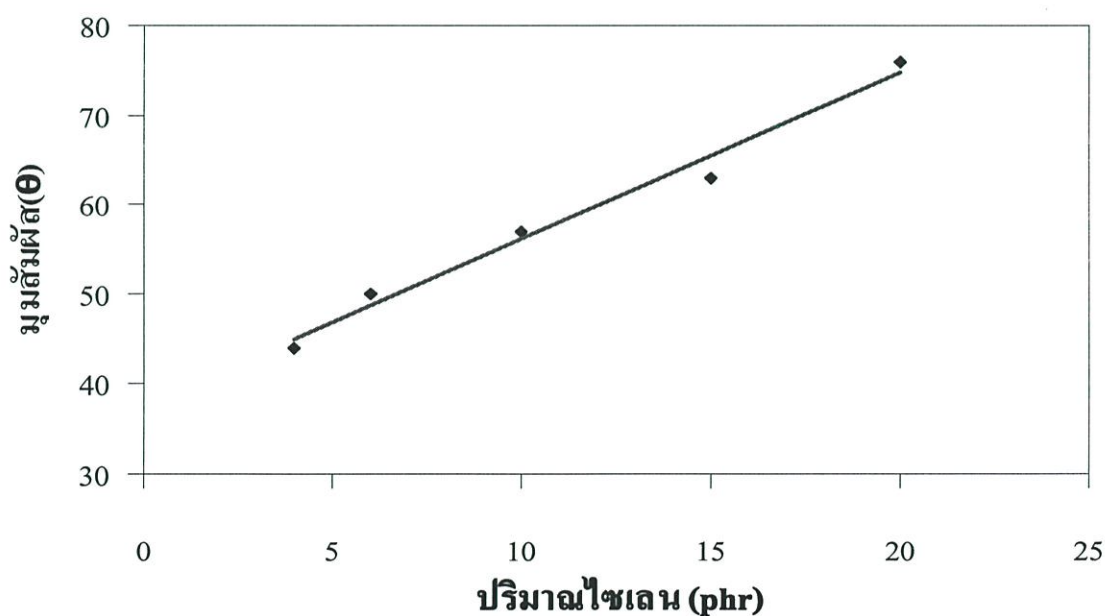
**รูปที่ 4.6** รูปถ่าย SEM ที่กำลังขยายระดับ 20 ไมโครเมตรของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการทดสอบโดยวิธีการดึงลอก โดย ก. พื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ยังไม่ทำการขึ้นรูปกับยาง ข., ค. และ ง. คือพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมหลังการดึงลอกจากแผ่นยางธรรมชาติที่เดิมสารคู่ควบไซเลน 4 phr, 10 phr และ 20 phr ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ยังไม่ทำการขึ้นรูปกับยางธรรมชาติมีลักษณะเหมือนกันกับพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการดึงลอกโดยขึ้นรูปกับยางที่เดิมไซเลน 4 phr และ 10 phr คือไม่ปรากฏว่ามีเนื้อยางธรรมชาติติดอยู่ที่พื้นผิวชิ้นงาน นั่นแสดงว่าในการดึงลอกในช่วงนี้เกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นงานด้วยกลไกที่เรียกว่า Chain Pull Out ส่วนพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการดึงลอกโดยขึ้นรูปกับยางที่เดิมไซเลน 20 phr พบว่ามีเนื้อของยางธรรมชาติติดอยู่ที่ผิวของชิ้นงานบ้างในบางส่วน นั่นแสดงว่าที่ 20 phr การฉีกขาดเกิดขึ้นทั้งในเนื้อ

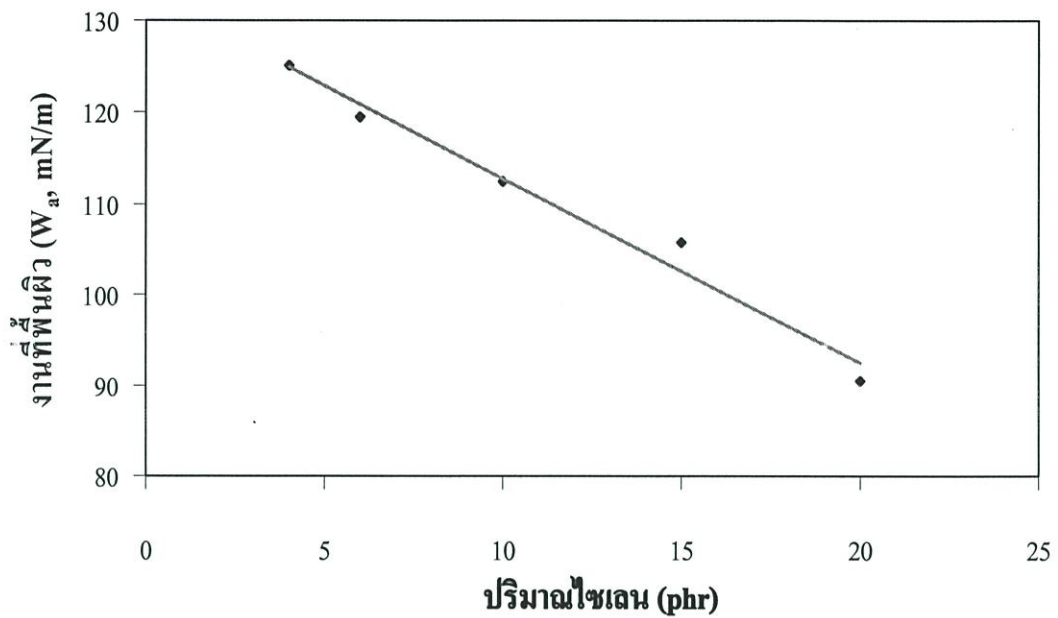
ของยางธรรมชาติและที่ผิวสัมผัส จึงเป็นการผสมผสานระหว่าง Chain Pull Out และ Chain Scission เพื่อยืนยันถึงผลการวิเคราะห์จาก SEM เกี่ยวกับตำแหน่งของการลอกของยางออกจาก อะลูมิเนียมที่ความเข้มข้นของไซเลนต่างกันผู้วิจัยจึงได้วัดค่างานจากการยึดติด โดยการหยดน้ำลง บนพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูปกับยางธรรมชาติที่เติมไซเลนที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ซึ่งรูปทรงของหยดน้ำที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.7 โดยเมื่อนำมาหาค่ามุมสัมผัส (Contract Angle,  $\theta$ ) และค่างานจากการยึดติด (Work of Adhesion,  $W_a$ ) ค่าที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9



**รูปที่ 4.7** รูปถ่ายของหยดน้ำบนผิวอะลูมิเนียมที่ผ่านการขึ้นรูปกับยางธรรมชาติที่เติมไซเลนความเข้มข้นต่างๆ กัน โดย ก. 4 phr ข. 6 phr ค. 10 phr ง. 15 phr จ. 20 phr

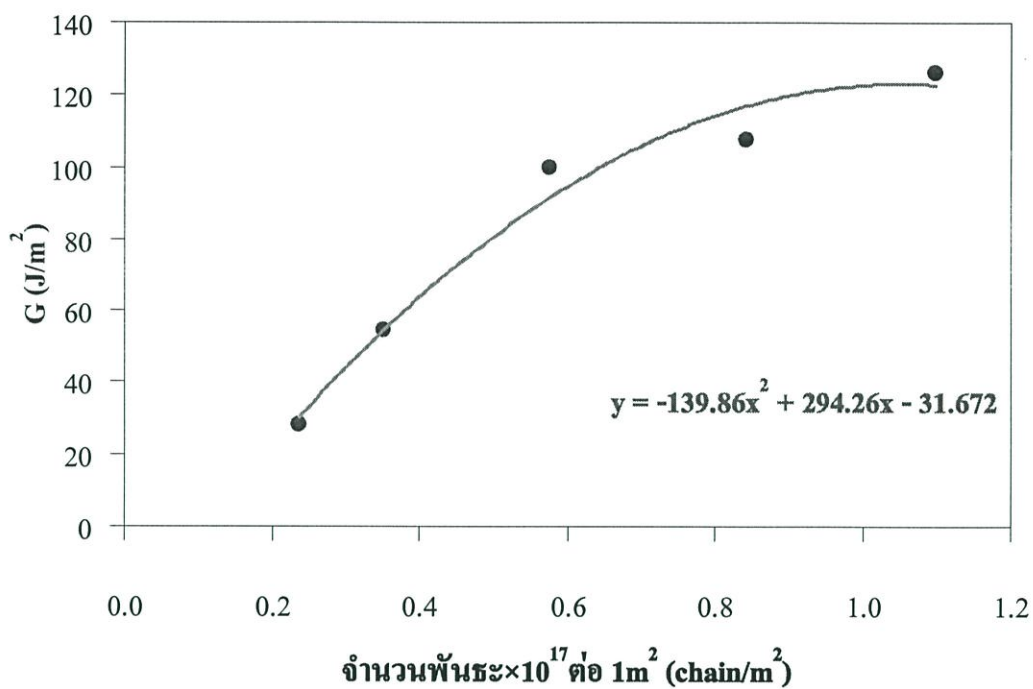


**รูปที่ 4.8** ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสกับปริมาณไซเลน



**รูปที่ 4.9** ความสัมพันธ์ระหว่างค่างานที่พื้นผิวกับปริมาณ ไซเลน

จากรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปกับยางที่เติม ไซเลนจาก 4, 6, 10 และ 20 phr ตามลำดับ เมื่อนำชิ้นงานดังกล่าวมาทำการดึงลอกแล้วนำพื้นผิวอะลูมิเนียมหาค่ามุมสัมผัสพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ ไซเลนจะทำให้ผิวของแผ่นอะลูมิเนียมมีมุมสัมผัสเพิ่มขึ้น นั่นคือของเหลวมีลักษณะเป็นรูปทรงกลมมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากที่พื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมเริ่มจะมีเนื้อขรุขระ ซึ่งเนื้อขรุขระจะทำให้พื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมมีความไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้รูปทรงของของเหลวมีลักษณะเป็นทรงกลมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อนำค่ามุมสัมผัสไปหาค่างานที่เกิดขึ้น (Work of Adhesion,  $W_a$ ) จะได้ค่างานที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.9 ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ ไซเลนเพิ่มขึ้นค่างานที่เกิดขึ้นที่ผิวจะมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ใช้แยกที่ผิวสัมผัสกับค่าความหนาแน่นของพันธะต่อพื้นที่ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.10

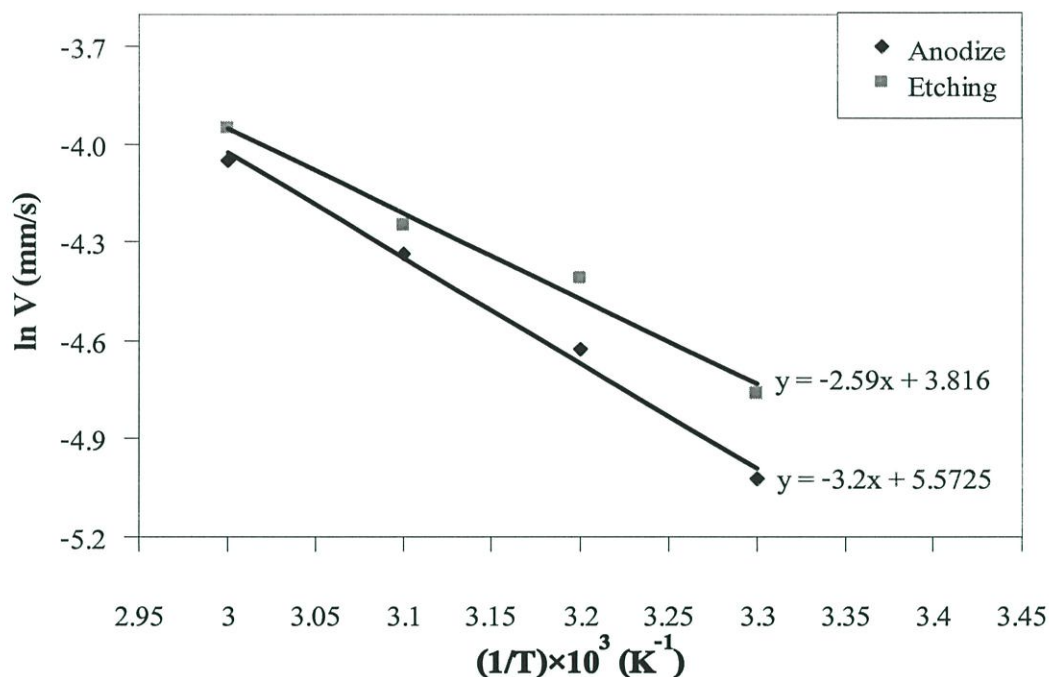


**รูปที่ 4.10** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานในการแยกที่ผิวสัมผัสกับค่าจำนวนพันธะต่อพื้นที่

จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าค่าพลังงานในการแยกที่ผิวสัมผัสจะขึ้นอยู่กับค่าจำนวนพันธะต่อพื้นที่ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับสมการที่ 2.14 คือค่าพลังงานที่ใช้แยกที่ผิวสัมผัสจะแปรผันโดยตรงกับค่าจำนวนพันธะต่อพื้นที่ยกกำลังสอง

### 4.2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการยึดติด

จากการทดลองเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่มีต่อการยึดติดระหว่างยางธรรมชาติที่เติมสารคู่ควบไซเลน 10 phr กับพื้นผิวอะลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวโดยการกัดด้วยสารละลายกรดและปรับสภาพโดยการอะโนไดซ์ในสารละลายกรดฟอสฟอริก ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.11



**รูปที่ 4.11** ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอุณหภูมิที่ใช้ในการลอกของยางธรรมชาติที่เติมสารคู่ควบไซเลนเข้มข้น 10 phr กับพื้นผิวอะลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกและปรับสภาพผิวโดยการอะโนไดซ์ในสารละลายกรดฟอสฟอริก โดยลอกด้วยน้ำหนัก 55 กรัม ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50 และ 60 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิเดียวกันพื้นผิวอะลูมิเนียมที่ได้รับการปรับสภาพผิวโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก จะให้ค่าความเร็วในการดึงลอกมากกว่าพื้นผิวที่ได้รับการปรับสภาพผิวโดยการอะโนไดซ์ด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก นั่นแสดงว่าพื้นผิวที่ได้รับการปรับสภาพผิวโดยการอะโนไดซ์ในสารละลายกรดฟอสฟอริกมีความแข็งแรงมากกว่าพื้นผิวที่ปรับสภาพผิวโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการดึงลอกเพิ่มขึ้น ค่าความเร็วในการดึงลอกจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยทั้งพื้นผิวที่กัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกและพื้นผิวที่อะโนไดซ์ในสารละลายกรดฟอสฟอริก และเมื่อนำค่าความชันของกราฟที่ได้ไปหาค่าพลังงานกระตุ้นของการยึดติดระหว่างยางธรรมชาติที่เติมสารคู่ควบไซเลน 10 phr กับพื้นผิวที่ปรับสภาพทั้งสองวิธีพบว่า ค่าพลังงานกระตุ้นของพื้นผิวที่ผ่านการปรับสภาพผิวโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกมีค่าเท่ากับ 5.15 kcal/mol และค่าพลังงานกระตุ้น

ของพื้นผิวที่ปรับสภาพโดยการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริกมีค่าเท่ากับ 6.36 kcal/mol ซึ่งต่ำกว่าพลังงานกระตุ้นของการสลายพันธะของ C-C พลังงานกระตุ้นที่วัดค่าจากการทดลองสำหรับพื้นผิวที่ผ่านการปรับสภาพทั้งการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกและการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริกนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการสลายพันธะระหว่าง C-C นั้นแสดงว่าการสลายพันธะที่เกิดขึ้นไม่ใช่การสลายพันธะระหว่าง C-C ในสายโซ่หลักของยางธรรมชาติแต่เป็นการสลายพันธะที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างระหว่างยางธรรมชาติกับอะลูมิเนียม ดังนั้นการแยกที่เกิดขึ้นของพื้นผิวที่ผ่านการปรับสภาพทั้งสองวิธีนั้นเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัส และค่าพลังงานกระตุ้นยังบอกถึงความแข็งแรงของผิวสัมผัสได้ โดยจากการทดลองจะค่าพลังงานกระตุ้นของพื้นผิวที่ผ่านการปรับสภาพโดยอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริกจะมีค่ามากกว่าค่าพลังงานกระตุ้นของพื้นผิวที่ผ่านการปรับสภาพโดยการกัดด้วยกรดโครมิกซัลฟิวริก นั้นแสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงที่ผิวสัมผัสของพื้นผิวที่ผ่านการอะโนไดเซชันจะมีค่ามากกว่าพื้นผิวที่ผ่านการกัดด้วยกรด

## บทที่ 5

# สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

### 5.1 การวิเคราะห์พื้นผิวอะลูมิเนียมหลังการปรับสภาพก่อนขึ้นรูปกับยางธรรมชาติ

จากการวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมโดยใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จะพบว่า พื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพจะไม่ปรากฏชั้นออกไซด์เกิดขึ้น ส่วนพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ทำการปรับสภาพโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก และอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริกจะปรากฏชั้นออกไซด์เกิดขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งจะเห็นเป็นชั้นๆซ้อนทับกันอยู่ แต่ขนาดของชั้นออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกจะมีขนาดใหญ่กว่าชั้นออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริก นั่นทำให้พื้นที่ผิวที่จะใช้ในการเกิดปฏิกิริยาของออกไซด์ที่ได้จากการกัดด้วยกรดมากกว่าชั้นออกไซด์ที่ได้จากการอะโนไดเซชัน และเมื่อนำพื้นผิวอะลูมิเนียมไปวิเคราะห์หาความหนาของชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้น โดยใช้กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) จะพบว่าพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพและพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ทำการปรับสภาพโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก จะมองไม่เห็นความหนาของชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นได้นั้นเป็นเพราะชั้นออกไซด์ที่เกิดจากการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกมีความหนาประมาณ 5-10 นาโนเมตร ส่วนพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการอะโนไดเซชันจะปรากฏชั้นออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งความหนาของชั้นออกไซด์นี้มีความหนาประมาณ 100 นาโนเมตรและมีโครงสร้างเป็นแท่งจัดเรียงอย่างมีระเบียบที่มองเห็นได้ชัดเจน

### 5.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงของพื้นผิวโดยวิธีการดึงลอก

#### 5.2.1 ผลของการปรับสภาพพื้นผิวอะลูมิเนียม

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการการปรับสภาพผิวแบบต่างๆกัน คือ การขัดด้วยกระดาษทราย การกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริก และการอะโนไดเซชันด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกพบว่า พื้นผิวที่ปรับสภาพด้วยการอะโนไดเซชันด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกจะให้ความแข็งแรงของการยึดติดที่สูงที่สุด เนื่องจากชั้นออกไซด์ที่สร้างขึ้นใหม่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวของชั้นออกไซด์เพิ่มมากขึ้น และมีจำนวนพันธะต่อพื้นที่ในการยึดติดที่มากที่สุด รองลงมาคือพื้นผิวที่ปรับสภาพด้วยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวของชั้นออกไซด์น้อย จำนวนพันธะต่อพื้นที่ในการยึดติดลดลง จึงทำให้ความแข็งแรงในการยึด

คิดที่ผิวลดลงด้วย ส่วนพื้นที่ผิวที่ปรับสภาพด้วยการขจัดด้วยกระดาษทรายจะมีความแข็งแรงในการยึดติดน้อยที่สุด เพราะมีชั้นออกไซด์น้อยที่สุด และจำนวนพันธะต่อพื้นที่ในการยึดติดน้อยที่สุด

### 5.2.2 ผลของการเติมสารคู่ควบไซเลน

จากการทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของไซเลนที่เติมลงในยางธรรมชาติจาก 4, 6, 10, 15 และ 20 phr ตามลำดับ จะพบว่าที่ปริมาณไซเลน 4, 6, และ 10 phr ค่าพลังงานของการแตกสลายพันธะจะแปรผันโดยตรงกับความเร็วในการลอกซึ่งบ่งบอกถึงกลไกการสลายพันธะแบบ Chain Pull Out และเมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการดึงลอกไปส่องด้วย SEM ไม่พบเนื้อยางติดอยู่บนผิวของอะลูมิเนียม ส่วนที่ปริมาณไซเลน 15 และ 20 phr เป็นกลไกผสมระหว่าง Chain Pull Out กับ Chain Scission และค่าพลังงานของการแตกสลายพันธะขึ้นกับความเร็วในการลอกน้อยลง ประกอบกับเมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านการดึงลอกแล้วมาส่องด้วย SEM ก็พบว่าเนื้อยางติดอยู่บนผิวของแผ่นอะลูมิเนียมบ้างบางส่วนแสดงให้เห็นว่าเกิดการลอกในเนื้อของยางธรรมชาติโดยกลไกการลอกเปลี่ยนจากช่วง Chain Pull Out เป็น Chain Scission และเมื่อนำแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการดึงลอกมาหาค่ามุมสัมผัสพบว่ามุมสัมผัสมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณไซเลนในเนื้อยาง เนื่องจากพื้นที่ผิวของแผ่นอะลูมิเนียมมีเนื้อของยางติดอยู่ที่ผิวจึงทำให้ค่ามุมสัมผัสมีค่าลดลงตามไปด้วย

### 5.2.3 ผลของอุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิในการลอกเพิ่มขึ้นค่าความเร็วในการลอกจะเพิ่มขึ้นทั้งพื้นผิวอะลูมิเนียมที่ได้รับการปรับสภาพผิวโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกและพื้นผิวอะลูมิเนียมที่ได้รับการปรับสภาพผิวโดยการอะโนไดเซชันด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก สำหรับค่าพลังงานกระตุ้นของการยึดติดกันระหว่างยางธรรมชาติที่เติมสารคู่ควบเข้มข้น 10 % กับพื้นผิวอะลูมิเนียม จะพบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของชิ้นงานที่ปรับสภาพผิวโดยการอะโนไดเซชันในสารละลายกรดฟอสฟอริกมีค่าเท่ากับ 6.36 kcal/mol ส่วนค่าพลังงานกระตุ้นของชิ้นงานที่ปรับสภาพพื้นผิวโดยการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟิวริกมีค่าเท่ากับ 5.15 kcal/mol

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากสารคู่ควบไม่สามารถผสมกับยางได้ดี ดังนั้นจะต้องเตรียมของผสมแขวนลอยของสารคู่ควบก่อนนำไปผสมกับน้ำยางเพื่อขึ้นรูปหรืออาจใช้น้ำสบู่เพื่อให้สารคู่ควบผสมกับยางดีขึ้น
2. ควรขึ้นรูปยางพาราทันทีหลังการปรับสภาพผิวอะลูมิเนียมเนื่องจากชั้นของออกไซด์บนอะลูมิเนียมไวต่อการเกิดปฏิกิริยาในอากาศ
3. ศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

1. K. B. Armstrong, 1997. "Long-term durability in water of aluminium alloy adhesive joints bonded with epoxy adhesives." **Int. J. Adhesion and Adhesive**, Vol. 17, pp. 89-105.
2. J. D. Venables, 1984. "Adhesion and durability of metal-polymer bonds." **J. Material Science**, Vol. 19, pp. 2431-2453.
3. W. Brockmann, O.-D. Hennemann, H. Kollek and C. Matz, 1986. "Adhesion in bonded aluminium joints for aircraft construction." **Int. J. Adhesion Adhesives**, Vol. 6, pp. 115-143.
4. A. Namkanisorn, A. Ghatak, M. K. Chaudhury, and D. H. Berry, 2001. "A kinetic approach to study the hydrolytic stability of polymer-metal adhesion." **J. Adhesion Sci. Technol.**, Vol. 15, pp. 1725-1745.
5. A. Ansarifar, S. F. Shiah, M. Bennett, 2006. "Optimising the chemical bonding between silanised silica nanofiller and natural rubber and assessing its effects on the properties of the rubber." **Int. J. Adhesion and Adhesives**, Vol. 26, pp. 454-463.
6. E. M. Petrie, 2000. **Handbook of adhesive and sealant.**, McGraw-Hill Companies.
7. 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.
8. H. M. Clearfield, D. K. McNamara and G. D. Davis, 1982. **Adhesive Bonding**, New York, Plenum Press.
9. J. W. McBain and D. G. Hopkins, 1925. "On Adhesives and Adhesive Action." **J. Phys. Chem.**, Vol. 29, pp. 294-300.
10. K. L. Mittal and A. Pizzi, 1999. **Adhesion Promotion Techniques**, New York, Marcel Dekker
11. Y. Bunsanong, 2001. **Effect of Fibre Surface Treatment on the Interfacial Adhesion between Aramid Fibre and Thermoplastic Elastomer**. M.D. Thesis Mahidol University.
12. "Adhesive and Sealants" [Online]. Available :  
<http://www.specialchem4adhesives.com/resources>.

13. "Surface and Interfacial Tension." [Online]. Available :  
[http://www.ksvinc.com/suaface\\_tension.htm](http://www.ksvinc.com/suaface_tension.htm). 2005
14. C. M. Marie, H. Joel, and J. V. Benilde, 1998. "On the Surface Free Energy of PVC/EVA Polymer Blends: Comparison of Different Calculation Methods.", **J. Colloid and Interface Science**, Vol. 208, pp. 319-328.
15. D. F. Rob, M. Taalman, 1996. "Isoprene : Background and Issues." **Toxicology**, Vol. 113, pp. 242-246.
16. E. P. Plueddemann, 1982. **Silane coupling agent**, Newyork, Plenum Publishing Corporation.
17. "Silane coupling agent" [Online]. Available :  
<http://micchem.com/products/SilaneCouplingAgents.htm>
18. A. Ansarifar, H. P. Lim, R. Nijhawan, 2004. "Assessment of the effect of a bifunctional organosilane on the bound rubber and properties of some natural rubber compounds." **Int. J. Adhesion and Adhesives**, Vol. 24, pp. 9-22.
19. K. Shimizu, G. M. Brown, K. Kobayashi, P. Skeldon, G. E. Thompson and G. C. Wood, 1998. "Ultramicrotomy-a route towards the enhanced understanding of the corrosion and filming behaviour of aluminium and its alloys." **Corrosion Science**, Vol. 40, pp. 1049-1072.
20. D. H. Berry, A. Namkanisorn, A. Ghatak, M. K. Chaudhury, 2001. "Interfacial fracture and bulk dissipative coupling in polymer-metal adhesion." **Int. SAMPE Tech. Conf.**, Vol. 33.
21. D. H. Berry, A. Namkanisorn, 2005. "Fracture toughness of a silane coupled polymer-metal interface: Silane concentration effects." **J. of Adhesion**, Vol. 81, pp. 347-370.
22. J. W. Cook, S. Edge and D. E. Packham, 1997. "The adhesion of natural rubber to steel and the use of the peel test to study its nature." **Int. J. Adhesion and Adhesives**, Vol. 17, pp. 333-337.

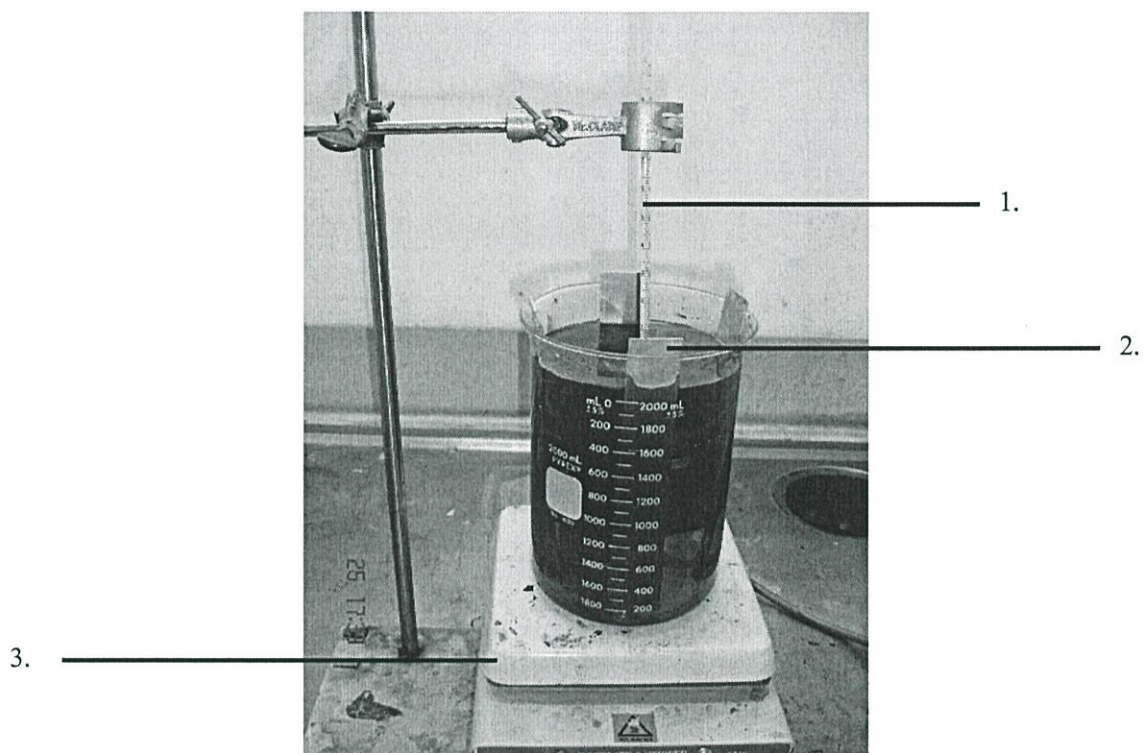
**ภาคผนวก**

**ภาคผนวก ก.**

**ชุดเครื่องมือที่ใช้ปรับสภาพผิวอะลูมิเนียมและทดสอบการดึงลอก**

### ก.1 ชุดเครื่องมือที่ใช้ปรับสภาพผิวอะลูมิเนียมโดยการกัดด้วยสารละลายกรด

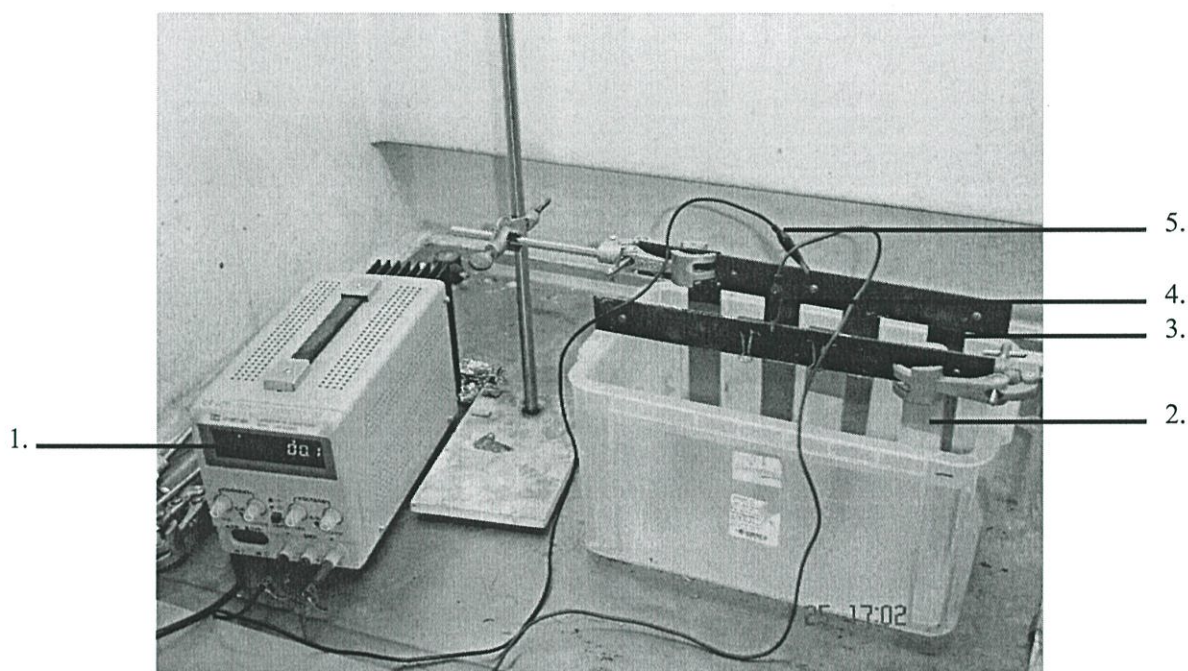
1. เทอร์โมมิเตอร์
2. แผ่นอะลูมิเนียม
3. เครื่องให้ความร้อน



รูปที่ ก.1 ชุดเครื่องมือในการกัดด้วยกรด

## ก.2 ชุดเครื่องมือที่ใช้ปรับสภาพผิวอะลูมิเนียมโดยการอะโนไดเซชัน

1. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
2. แผ่นอะลูมิเนียม
3. แผ่นเหล็ก
4. กระแสไฟฟ้าชั่ววอก
5. กระแสไฟฟ้าชั่วลบ

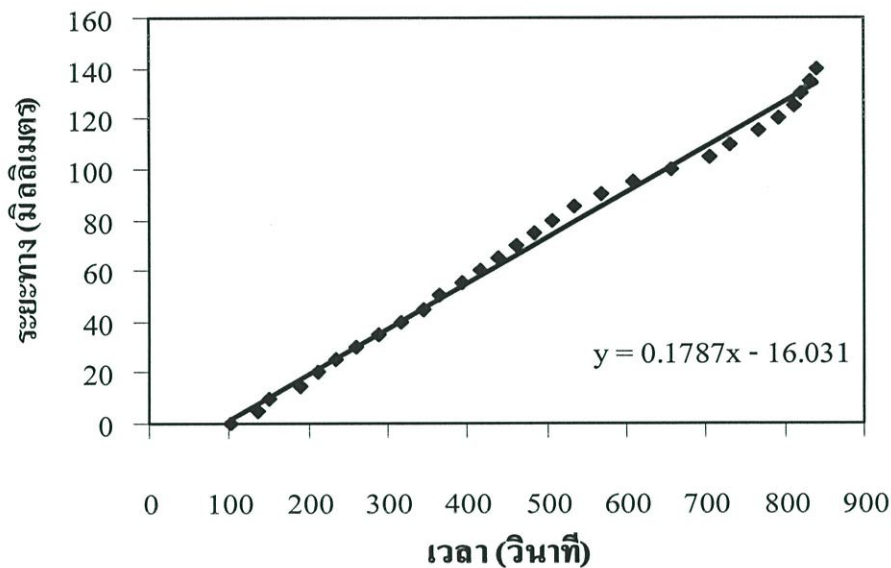


รูปที่ ก.2 ชุดเครื่องมือในการอะโนไดเซชัน

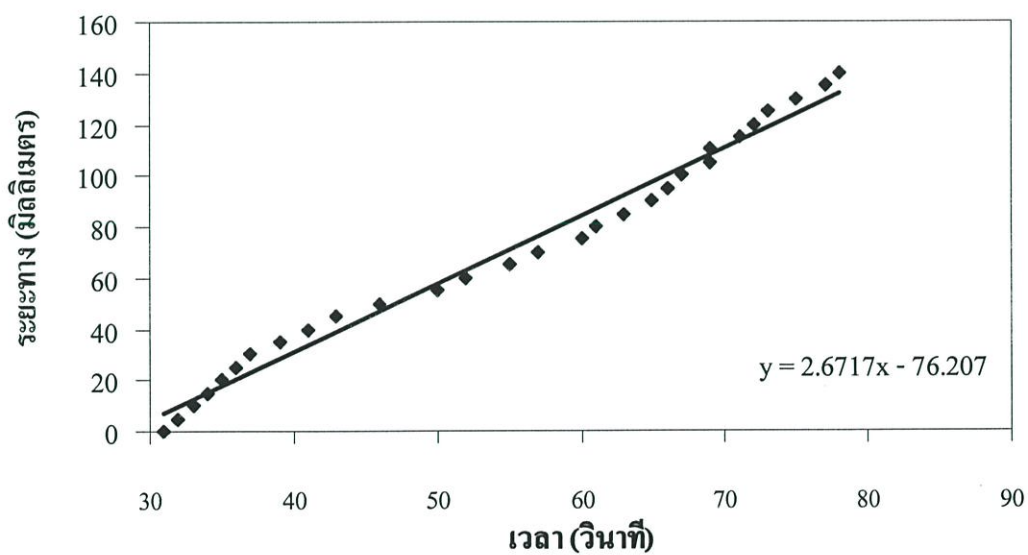
**ภาคผนวก ข.**

**กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะของการดอกกับเวลา**

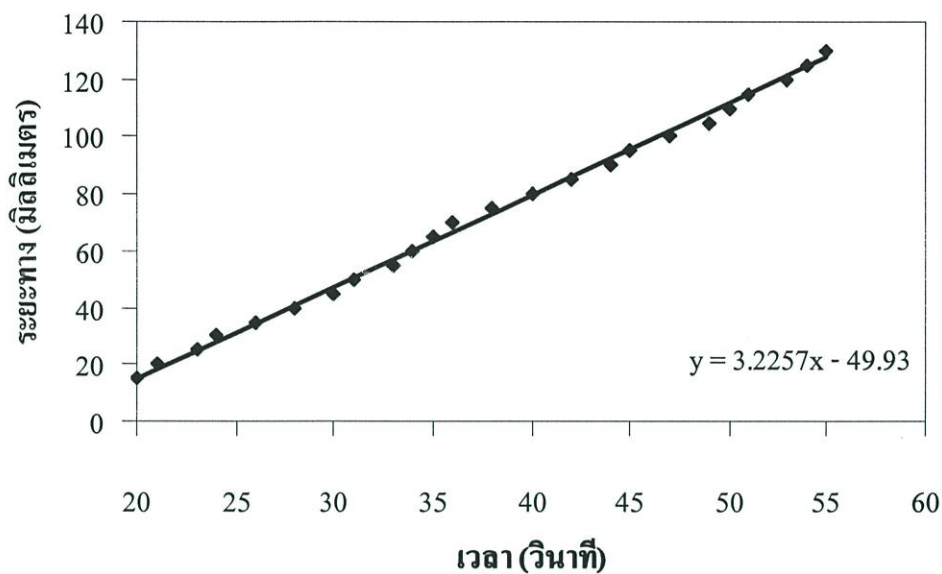
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาในการทดสอบการยึดติดด้วยการลอกยางที่เติมไซเลน 6 phr บนอะลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวโดยการกัดด้วยสารละลายกรด โดยใช้ตุ้มน้ำหนักต่างๆ



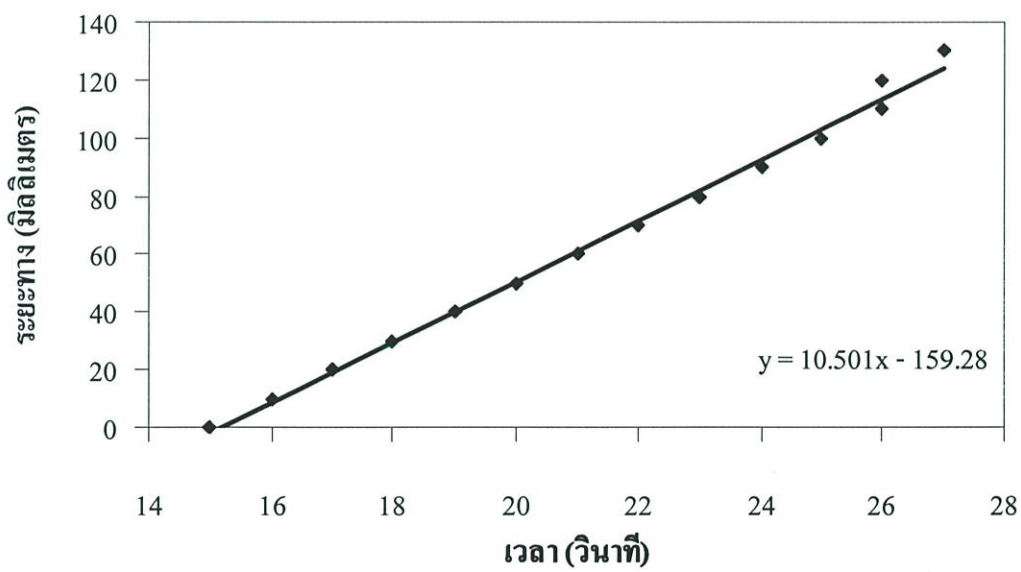
รูปที่ ข.1 อัตราเร็วในการลอกโดยใช้ตุ้มน้ำหนัก 43.1 กรัม



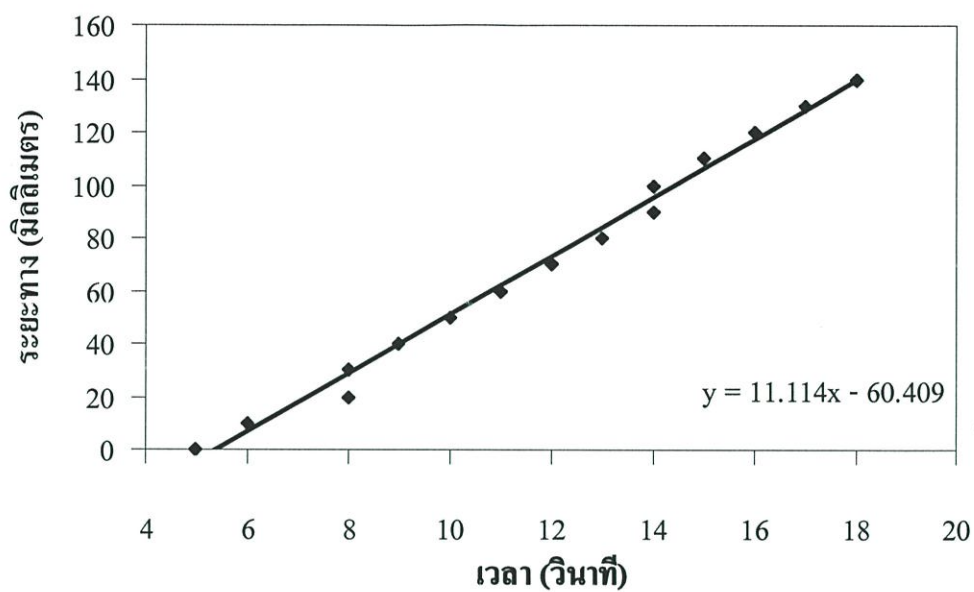
รูปที่ ข.2 อัตราเร็วในการลอกโดยใช้ตุ้มน้ำหนัก 58.2 กรัม



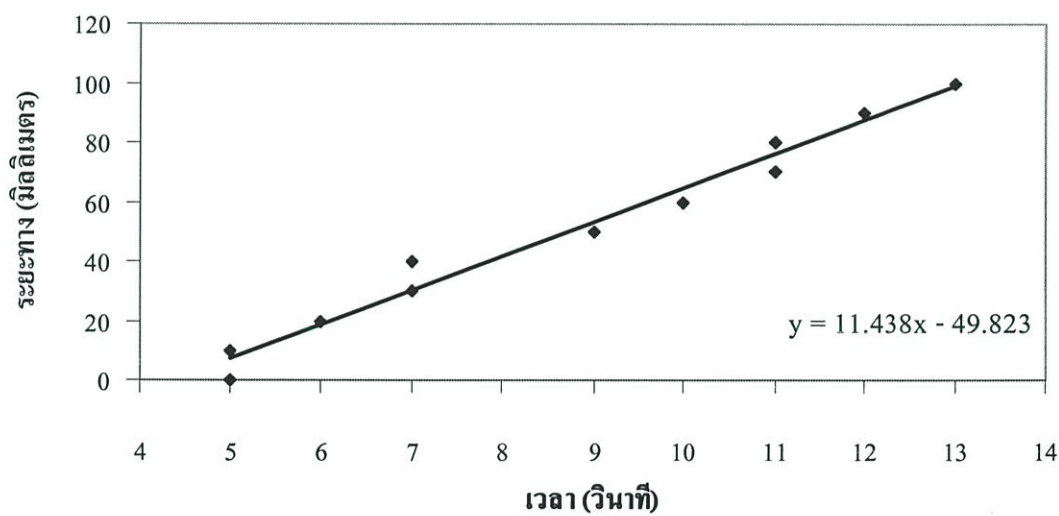
รูปที่ ข.3 อัตราเร็วในการลอกโดยใช้ค้อนน้ำหนัก 73.4 กรัม



รูปที่ ข.4 อัตราเร็วในการลอกโดยใช้ค้อนน้ำหนัก 95 กรัม



**รูปที่ ข.5** อัตราเร็วในการลอกโดยใช้ตุ้มน้ำหนัก 116.9 กรัม



**รูปที่ ข.6** อัตราเร็วในการลอกโดยใช้ตุ้มน้ำหนัก 128.8 กรัม

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายอนุพงศ์ สอรักษา
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 20 ธันวาคม 2524
ที่อยู่	74 หมู่ 13 ต. ลำโรง อ. นาเชือก จ. มหาสารคาม 44170 โทร. 0846436036
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2548
ผลงานทางวิชาการ	“การเพิ่มสมบัติการยึดติดระหว่างยางธรรมชาติกับ อะลูมิเนียมโดยใช้สารกลุ่มควบไซเลน” วารสารการ ประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์ ครั้งที่ 17, จ. เชียงใหม่ หน้าที่ PPO3_1-PPO3_2, ตุลาคม 2550