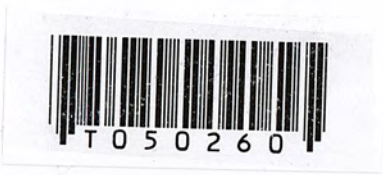


สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...50260
วัน,เดือน,ปี.2.8 เม.ย. 2547

.b.....
.i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**A STUDY OF FACTORS AFFECTING THE ADHESION BETWEEN
POLYMER AND METAL**



**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

2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ
โดย นายนพพล อุดมทวีทรัพย์
นายบัญชา ตาดชื่น
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.อภิรักษ์ นัมคณิศรณ

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ดร. อภิรักษ์ นัมคณิศรณ)

กรรมการ

(ดร. พรสวรรค์ กาญจนวณิชย์กุล)

กรรมการ

(อาจารย์ วลัยรัตน์ สุขสมัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ
 โดย นายนพพล อุดมทวีทรัพย์ รหัสประจำตัว 42010540
 นายบัญชา ดาดชื่น รหัสประจำตัว 42010545
 อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. อภินันท์ นัมมณีสรมณ์
 ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

โครงการนี้ แบ่งการศึกษาและการทดลองออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของการทดลองและส่วนของการจำลองแบบ โดยส่วนของการทดลองเป็นการศึกษากลไกการยึดเกาะและปัจจัยที่มีผลต่อการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ ซึ่งพอลิเมอร์และโลหะที่ใช้ในการทดลองคืออีพอกซี (Epoxy) และอลูมิเนียม (Aluminum) จากการทดลองพบว่า ทฤษฎีที่มีความสำคัญและสามารถนำมาใช้อธิบายการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ คือ ทฤษฎีการประสานทางกล (Mechanical Interlocking) และทฤษฎีการเกิดพันธะเคมี (Chemical Bonding) โดยทฤษฎีทั้งสองมีความสัมพันธ์กับขนาดของพื้นที่ผิวสัมผัส ดังนั้นการทดลองจึงมุ่งที่จะเปรียบเทียบผลของการปรับสภาพผิวต่อการยึดเกาะกันของอีพอกซีและอลูมิเนียม โดยได้ใช้สองวิธีในการปรับสภาพผิวของแผ่นอลูมิเนียม คือ วิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium Dodecyl Sulfate Solution) และวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก (Chromic Sulfuric Acid Solution) จากการวิเคราะห์สภาพพื้นผิว พบว่า แผ่นอลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 58 °C มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ส่วนการทดสอบคุณสมบัติทางกล พบว่า ชิ้นงานที่แผ่นอลูมิเนียมปรับสภาพผิวโดยวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 58 °C มีความแข็งแรงของการยึดเกาะกันสูงที่สุด เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากที่สุด

ส่วนของการจำลองแบบ เป็นการศึกษากลไกการแยกออกจากกันของพอลิเมอร์กับโลหะในสถานะที่มีน้ำหรือความชื้นกับในสถานะที่เป็นอากาศ โดยระบบที่นำมาเป็นกรณีศึกษาคือ พอลิสไตรีน (Polystyrene) กับอลูมิเนียม (Aluminum) ซึ่งในการนำวัสดุทั้งสองมายึดติดกัน มีการเติมสารช่วยในการยึดเกาะจำพวกไซเลน (Silane Coupling Agent) ผลของการจำลองแบบแสดงให้เห็นว่า เมื่อความเร็วของการแยกผิวสัมผัสมีค่าต่ำ การแยกออกจากกันจะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ เนื่องมาจากอิทธิพลของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และเมื่อความเร็วของการแยกผิวสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นจะเปลี่ยนจากการแยกที่ผิวสัมผัส เป็นที่สายโซ่ของพอลิเมอร์แทน เนื่องมาจากอิทธิพลของปฏิกิริยาเชนซิสชัน (Chain Scission)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title A Study of Factors Affecting the Adhesion between Polymer and Metal
 By Mr. Noppon Udomtaweesub
 Mr. Bancha Tadchuen
 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 research contains two main parts. The first part involves the experimental work to study factors affecting the adhesion in polymer-metal. Epoxy bonded onto aluminum surface was used as a model system. The experimental results can be explained within the scope of two adhesion theories: the mechanical interlocking and chemical bonding. These two theories are closely related to the actual interfacial area formed by polymer and metal surface. Thus, the experimental work was focused on comparing the effects of surface treatment on the adhesion. Two surface treatments were used: (1) cleaning the aluminum surface with solution of sodium dodecyl sulfate and (2) etching of the aluminum by solution of chromic sulfuric acid. From the mechanical tests, it was found that the adhesion strength of the epoxy-aluminum joints was higher for acid etched case. Further experiments were carried out to compare the effect of etching temperature where aluminum samples were treated at three different temperatures, 29°C, 58°C and 70°C. Best adhesion strength was obtained when the etching was done at 58°C. The SEM analysis of the surface implies that the shape and size of the oxide structure following the treatment play important roles in the adhesion.

The second part of this work focuses on developing a theoretical model to explain the fracture processes of polymer-metal joints. The hydrolysis of interfacial bonds and chain scission of the polymer chain are the two mechanisms responsible for the fracture of polymer-metal joints in both dry and under hydrothermal conditions. When crack propagates at low velocity, water can diffuse to the bond line and hydrolyzes interfacial bonds. Thus, fracture occurs as a result of hydrolysis process. On the other hand, when crack propagates at relatively fast speed, bonds fracture by chain scission of polymer main chain because the water molecules do not have enough time to cause hydrolysis.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ

1. ดร.อภิรักษ์ นัมคณิศรณั สำหรับคำเสนอแนะและแนวทางแก้ไขปรับปรุงโครงงาน
2. ดร.พรสวรรค์ กาญจนวณิชย์กุล และ อาจารย์ยวดีรัตน์ สุขสมัย สำหรับแนวทางแก้ไขปรับปรุงโครงงาน
2. อาจารย์ แหลมทอง เหล่าคงถาวร ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในโครงงาน
3. อาจารย์ ถาวร เบญจนราสุทธิ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำ การใช้โปรแกรมเมทแลบเบื้องต้น
4. อาจารย์ทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ หลายสิ่งที่ท่านมอบให้ได้นำมาใช้ในโครงงานนี้ และหลายสิ่งที่ท่านมอบให้เป็นพื้นฐานที่จะนำไปใช้ต่อไปในอนาคต
5. เพื่อนๆ และรุ่นพี่ๆ ทุกคน ที่ให้กำลังใจตลอดมา

นพพล อุดมทวีทรัพย์

บัญชา ตาดชื่น

1 เมษายน 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

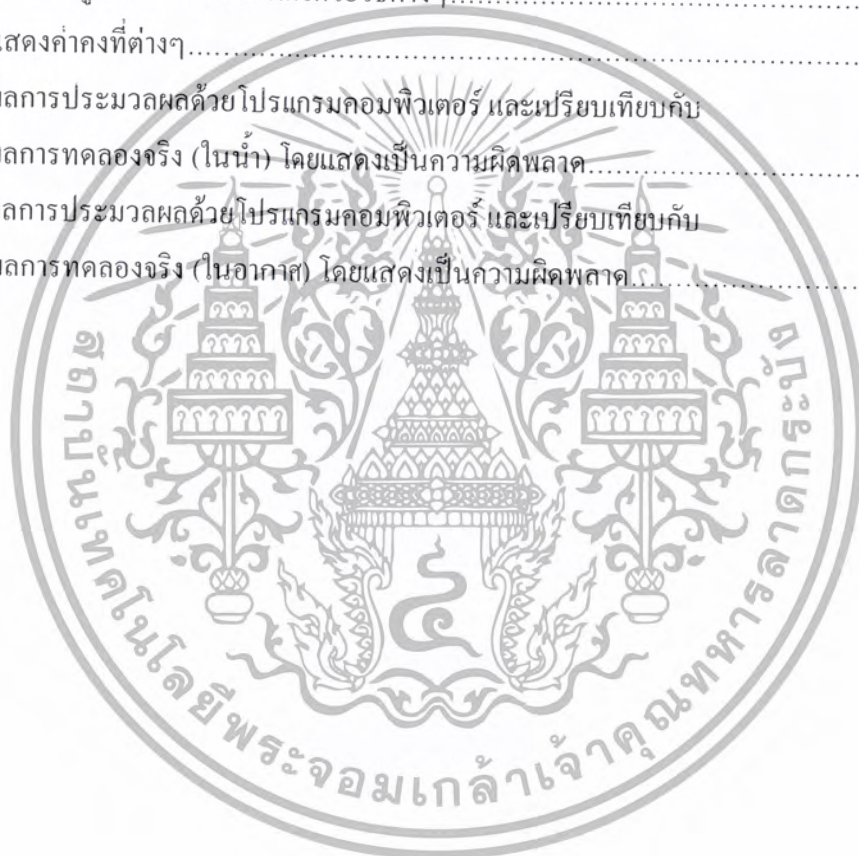
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	จ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกลไกการบิดเคาะ การแยกและการปรับสภาพผิว.....	3
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	11
บทที่ 4 ขั้นตอนการทดลอง.....	17
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	22
บทที่ 6 การจำลองแบบ.....	30
บทที่ 7 สรุปผลและวิเคราะห์.....	51
บทที่ 8 ข้อเสนอแนะ.....	55
เอกสารอ้างอิง.....	56
ภาคผนวก.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงไขเลนชนิดต่างๆ.....	15
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าพลังงาน (จุดต่อตารางเมตร) กับ เวลา (วินาที) ที่ใช้แยกชิ้นงาน ที่แผ่นอลูมิเนียมปรับสภาพผิวด้วยวิธีต่างๆ.....	28
ตารางที่ 6.1 แสดงค่าคงที่ต่างๆ.....	39
ตารางที่ 6.2 ผลการประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และเปรียบเทียบกับ ผลการทดลองจริง (ในน้ำ) โดยแสดงเป็นความผิดพลาด.....	43
ตารางที่ 6.3 ผลการประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และเปรียบเทียบกับ ผลการทดลองจริง (ในอากาศ) โดยแสดงเป็นความผิดพลาด.....	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงการยึดเกาะตามทฤษฎีในลักษณะต่างๆ.....	4
รูปที่ 2.2 แสดงชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก หรือสารละลายกรดไดโครเมตซัลฟูริก.....	5
รูปที่ 2.3 แสดงชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริก ทำปฏิกิริยาอะโนไดเซชันกับแผ่นอลูมิเนียม.....	6
รูปที่ 2.4 แสดงชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก ทำปฏิกิริยาอะโนไดเซชันกับแผ่นอลูมิเนียม.....	7
รูปที่ 2.5 แสดงชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยการสร้างชั้น เหนื่อผิวหน้าของอลูมิเนียม โดยใช้สารประกอบโครเมตฟอสเฟต.....	8
รูปที่ 3.1 รูปร่างรูพรุนของออกไซด์ที่มีผลต่อการซึมผ่านของพอลิเมอร์.....	11
รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมก่อนที่จะถูกกัดกร่อน ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	12
รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายสภาพพื้นผิวของพอลิไสตรีน หลังจากแผ่นอลูมิเนียม ถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จนหมด.....	12
รูปที่ 3.4 แสดงงานที่ใช้ในการยึดเกาะและการแยกออกที่ผิวสัมผัส ระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ.....	16
รูปที่ 5.1 แสดงสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวและไม่ได้ปรับสภาพผิว โดยที่ (1),(2) และ (3) ไม่ได้ปรับสภาพผิว (4),(5) และ (6)ปรับสภาพผิวด้วย สารละลายโซเดียมดิวเทคซิลซัลเฟตที่อุณหภูมิ 29 °C (7),(8) และ (9) ปรับสภาพผิวด้วย สารละลายกรดโครมิกกับซัลฟูริกที่อุณหภูมิ 58 °C.....	23
รูปที่ 5.2 แสดงสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวด้วย สารละลายกรดโครมิกกับซัลฟูริกโดยที่ (1),(2) และ (3) ที่อุณหภูมิ 29°C (4),(5) และ (6) ที่อุณหภูมิ 58°C (7),(8) และ (9) ที่อุณหภูมิ 70°C.....	25
รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง (นิวตัน) กับเวลา (วินาที).....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.1 แสดงแบบตัวอย่างของพันธะสปริงและแดชพ็อต ที่ขนานกันซึ่งติดกับผิวสัมผัส.....	30
รูปที่ 6.2 แสดงผลเฉลยที่ได้จากสมการที่ 6.13 โดยใช้การจำลองแบบ.....	36
รูปที่ 6.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการแยก กับความเร็วในการแตกสลายพันธะ.....	37
รูปที่ 6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพันธะและเวลา ที่ความเร็วในการแยก 8.28×10^7 เมตรต่อวินาที.....	45
รูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพันธะกับเวลาที่ความเร็วในการแยกต่างๆ กัน.....	46
รูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงานและความเร็วที่ใช้ในการแยก โดยเปรียบเทียบระหว่าง ค่าที่ได้จากโปรแกรมกับค่าจากการทดลอง.....	47
รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงานและความเร็วที่ใช้ในการแยก ที่ค่า T ต่างๆ กัน.....	48
รูปที่ 6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงานและความเร็วที่ใช้ในการแยก ที่ค่าคงที่ของสปริงต่างๆ กัน.....	49
รูปที่ 6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงานและความเร็วที่ใช้ในการแยก ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน.....	50
รูปที่ 7.1 ภาพถ่ายสภาพพื้นผิวของพอลิस्टาไทรนที่เสีรูปร่างถาวร หลังจากแยกออกจากแผ่นอลูมิเนียม.....	52
รูปที่ ก.1 แสดงเครื่องที่ใช้ทดสอบแรงดึง.....	58
รูปที่ ก.2 แสดงชิ้นงานขณะทดสอบแรงดึง.....	59
รูปที่ ข.1 แสดงรายละเอียดของ โปรแกรมคำนวณสำเร็จรูปพอลิเมท.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์

D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิเมอร์ (นาโนเมตร)
E_1	=	มอดุลัสแรงดึงในทิศทางตั้งฉากกับเส้นใยพอลิเมอร์ (เมกกะปาสกาล)
E_2	=	มอดุลัสแรงดึงในทิศทางขนานกับเส้นใยพอลิเมอร์ (เมกกะปาสกาล)
Ea_1	=	พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (จุดต่อโมล)
Ea_2	=	พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเซนซิซัน (จุดต่อโมล)
Ea^+	=	พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาไปข้างหน้า (จุดต่อโมล)
Ea^-	=	พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาย้อนกลับ (จุดต่อโมล)
f	=	แรงที่ถ่ายเทลงพื้นระที่ผิวสัมผัส (นิวตัน)
f_s	=	แรงที่ใช้ดึง (นิวตัน)
G	=	พลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัส (จุดต่อตารางเมตร)
h	=	ค่าคงที่ของแพลงก์ (จูลวินาที)
k	=	ค่าคงที่ของโบลซ์มาน (จูลต่อโมลเคลวิน)
k_s	=	ค่าคงที่ของสปริง (นิวตันต่อเมตร)
M	=	ค่าคงที่ของสปริง ของพื้นระที่สายใยพอลิเมอร์ (นิวตันต่อเมตร)
n	=	จำนวนโมเลกุลที่สายใยพอลิเมอร์ (เมอร์สต่อโมล)
R_+	=	อัตราการผลิตปฏิกิริยาไปข้างหน้า
R_-	=	อัตราการผลิตปฏิกิริยาย้อนกลับ
S	=	ความเค้นที่ผิวสัมผัส (เมกกะปาสกาล)
T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)
t	=	เวลา (วินาที)
\bar{t}	=	เวลาที่ใช้ในการแยก (วินาที)
v	=	ความเร็วที่ใช้ในการแยก (เมตรต่อวินาที)
W	=	พลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการยึดเกาะของพื้นระเมื่อถูกแรงดึง (จูล)
x	=	ระยะยึด (เมตร)
ϕ	=	อัตราส่วนของจำนวนพื้นระที่เวลาใดๆ ต่อจำนวนพื้นระที่เวลาเริ่มต้น
γ_1	=	พลังงานพื้นผิวอิสระของพอลิเมอร์ (จูล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

- γ_2 = พลังงานอิสระพื้นผิวของโลหะ (จูล)
- γ_{12} = พลังงานอิสระที่ผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ (จูล)
- η = ค่าความหนืดของของเหลวที่บรรจุอยู่ภายในแคปซูล (ปาสคาลวินาที)
- λ = ความยาวของพันธะที่ถูกกระตุ้น (นาโนเมตร)
- λ_{craze} = อัตราการยืดของสายพอลิเมอร์ เมื่อเกิดการเสีรูปร่างแบบถาวร (Crazing)
- τ = เวลาที่ใช้ในการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ที่ผิวสัมผัส (วินาที)
- Σ = จำนวนพันธะที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยพื้นที่ (พันธะต่อตารางเมตร)
- Σ_0 = จำนวนพันธะที่เวลาเริ่มต้น (พันธะต่อตารางเมตร)
- Σ_w = จำนวนโมเลกุลของน้ำที่ผิวสัมผัส (โมเลกุล)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ ๕

บทนำ

ความเป็นมาของโครงการ

ในปัจจุบันได้มีความพยายามที่จะนำพอลิเมอร์ (Polymer) มาใช้ร่วมกับโลหะ ในอุตสาหกรรมหลายๆ ประเภท เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ เครื่องบิน หรืออิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ซึ่งข้อดีของการนำพอลิเมอร์มาใช้แทนโลหะ หรือใช้ร่วมกับโลหะ มีหลายประการ เช่น ช่วยลดน้ำหนักของชิ้นงานหรือไม่ทำให้เกิดความเค้นบริเวณรู เนื่องจากการยึดด้วยหมุด หรือสลัก แต่ข้อจำกัดของการนำพอลิเมอร์มาใช้ร่วมกับโลหะ คือไม่สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมที่มีน้ำ ความชื้น หรือมีอุณหภูมิสูงได้ เนื่องจากน้ำจะซึมเข้าไปในผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงที่ผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุให้อายุการใช้งานสั้นลง

ดังนั้นข้อจำกัดที่สำคัญของการนำพอลิเมอร์มาใช้ร่วมกับโลหะ คือบริเวณผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ มักเป็นจุดที่เกิดการแยกออกจากกันเมื่อนำไปใช้งานจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานภายใต้สภาพความชื้นและความร้อนสูง

ด้วยเหตุนี้ จึงมีความสนใจที่จะศึกษาวิธีการ ที่จะทำให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะเพิ่มขึ้น รวมถึงลักษณะ กลไกและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของการแยกออกจากกันของพอลิเมอร์และโลหะ เพื่อนำไปปรับปรุงและใช้ในโอกาสต่อไป

วัตถุประสงค์

1. ศึกษากลไกการยึดเกาะระหว่างอีพอกซีกับแผ่นอลูมิเนียมในสภาวะที่เป็นอากาศ
2. ศึกษาและเปรียบเทียบผลจากการปรับสภาพผิวของแผ่นอลูมิเนียม โดยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมดิวทิลซัลเฟต (Sodium Dodecyl Sulfate) และการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก (Chromic Sulfuric Acid)
3. พัฒนาแบบจำลองเพื่อศึกษากลไก และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของการแยกออกจากกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษากลไกการยึดเกาะระหว่างอีพอกซี (Epoxy) กับอลูมิเนียม (Aluminum)
2. ศึกษาวิธีการปรับสภาพผิวและทำการปรับสภาพผิวของอลูมิเนียม โดยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก
3. ถ่ายภาพตัวอย่างของแผ่นอลูมิเนียมที่ปรับและไม่ได้ปรับสภาพผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope , SEM)
4. ขึ้นรูปชิ้นงานและนำไปทดสอบคุณสมบัติทางกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง
5. พัฒนาแบบจำลองแสดงกลไกและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของการแยกออกจากกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ เพื่อเพิ่มความเข้าใจในกระบวนการดังกล่าว อันจะนำไปสู่การพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ ให้มีความแข็งแรงทางกลเพิ่มขึ้น
6. สรุปและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการศึกษา การทดลองและการจำลองแบบ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ในสวนของการทดลอง

1. มีความรู้ ความเข้าใจ ในกลไกการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ
2. ทราบว่าการปรับสภาพผิวของโลหะมีผลอย่างไรต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ
3. สามารถนำความรู้ที่ได้จากโครงการ ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้พอลิเมอร์ร่วมกับโลหะได้

ในส่วนของการจำลองแบบ

1. ทราบกลไกและปฏิกิริยาการแยกออกจากกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ
2. สามารถนำไปปรับปรุงประสิทธิภาพการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะให้สูงขึ้นได้
3. สามารถเลือกใช้พอลิเมอร์ร่วมกับโลหะให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกลไกการยึดเกาะ การแยกและการปรับสภาพผิว

กลไกการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ

การศึกษากลไกการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ เป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงของการยึดเกาะกัน หากเข้าใจกลไกก็จะทำให้ทราบว่าสาเหตุใดบ้างที่มีผลต่อความแข็งแรงของการยึดเกาะ และสามารถที่จะปรับปรุงแก้ไขเพื่อให้การยึดเกาะมีความแข็งแรงและมีประสิทธิภาพสูงสุด ทฤษฎีที่ใช้อธิบายกลไกการยึดเกาะกันมีดังนี้

1. ทฤษฎีการประสานทางกล (Mechanical Interlocking)

การยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์แอดฮีซีฟ (Adhesive) กับ โลหะสับสเตรท (Substrate) เกิดจากการซึมผ่านของพอลิเมอร์แอดฮีซีฟ ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวเข้าไปในรูพรุนของออกไซด์ (Oxide) ที่อยู่บนผิวหน้าของโลหะสับสเตรท ที่มีความขรุขระ ดังรูปที่ 2.1(1) [1] และเมื่อ พอลิเมอร์แอดฮีซีฟแข็งตัว จึงทำให้เกิดการยึดเกาะกันขึ้น โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการซึมผ่านของพอลิเมอร์แอดฮีซีฟ เช่น รูปร่างของรูพรุนของออกไซด์ และความหนืดของพอลิเมอร์แอดฮีซีฟ เป็นต้น

2. ทฤษฎีการเกิดพันธะเคมี (Chemical Bonding Theory)

การยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์แอดฮีซีฟกับโลหะสับสเตรท เป็นผลมาจากมีพันธะเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัส โดยที่ปลายด้านหนึ่งจะเกิดพันธะกับพอลิเมอร์แอดฮีซีฟ ส่วนที่ปลายอีกด้านหนึ่งจะเกิดพันธะกับโลหะสับสเตรท ดังรูปที่ 2.1(2) [1] ซึ่งพันธะเคมีที่กล่าวถึงอาจเป็นพันธะแบบปฐมภูมิ (Primary Bonding) เช่น พันธะไอออนิก (Ionic Bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) หรืออาจเป็นพันธะแบบทุติยภูมิ (Secondary bonding) เช่น พันธะวานเดอร์วาลส์ (Van Der Waals)

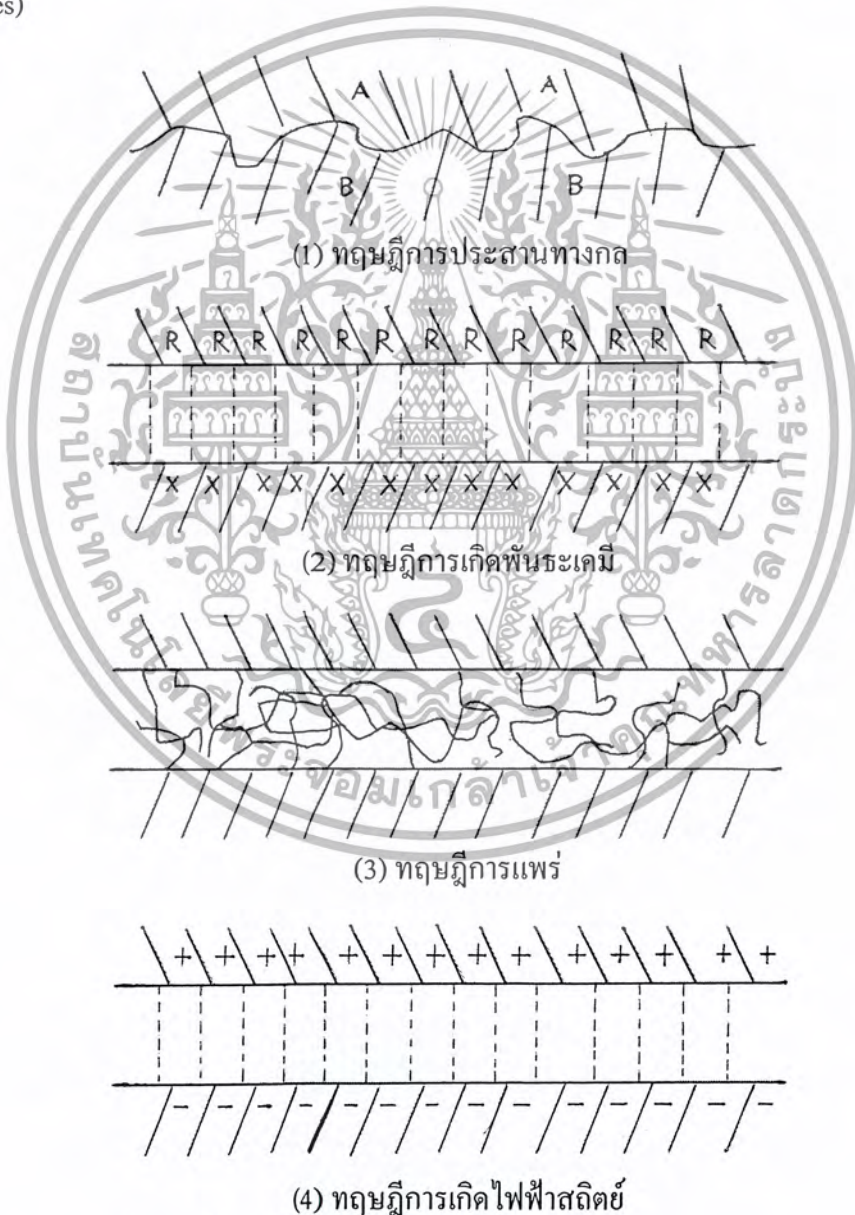
3. ทฤษฎีการแพร่ (Diffusion Theory)

การยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์แอดฮีซีฟกับโลหะสับสเตรท เกิดจากการแพร่ของโมเลกุลที่ผิวสัมผัสของพอลิเมอร์แอดฮีซีฟกับโลหะสับสเตรท ดังรูปที่ 2.1(3) [1] ความแข็งแรงของผิวสัมผัสขึ้นอยู่กับความสามารถในการแพร่ของพอลิเมอร์แอดฮีซีฟเข้าไปยังโลหะสับสเตรท นอกจากนี้ ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลคือ เวลาที่ผิวหน้าของพอลิเมอร์แอดฮีซีฟกับโลหะสับสเตรทสัมผัสกัน อุณหภูมิ และน้ำหนักของโมเลกุล เป็นต้น ซึ่งทฤษฎีการแพร่นี้ โดยปกติแล้วจะมีความสำคัญในกรณีที่ผิวสัมผัสที่เกิดจากการนำพอลิเมอร์ต่างชนิดกันมายึดเกาะกัน

4. ทฤษฎีการเกิดไฟฟ้าสถิตย์ (Electronic Theory)

กล่าวว่า การยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์แอดฮีซีฟกับโลหะสับสเตรท เป็นผลมาจากมีไฟฟ้าสถิตย์เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสของพอลิเมอร์แอดฮีซีฟกับโลหะสับสเตรท เนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งทำให้ที่ผิวหน้าด้านหนึ่ง มีประจุเป็นบวก ส่วนอีกด้านหนึ่งมีประจุเป็นลบ ดังรูปที่ 2.1(4) [1]

นอกจากนี้ ยังมีทฤษฎีอื่นๆ อีกที่เกี่ยวข้องกับกลไกการยึดเกาะ ได้แก่ ทฤษฎีการดูดซับ (Adsorption Theory) และทฤษฎีบาวคาร์เลเยอร์กับอินเตอร์เฟส (Theory of Boundary Layers and Interphases)



รูปที่ 2.1 แสดงการยึดเกาะตามทฤษฎีในลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับสภาพผิวของโลหะ

นอกจากการศึกษากลไกการยึดเกาะและการแยกออกจากกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ ที่เป็นสิ่งสำคัญสำหรับความต้องการที่จะเพิ่มความแข็งแรงของการยึดเกาะกันแล้ว การปรับสภาพพื้นผิวของโลหะก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะทำให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะกันเพิ่มขึ้น โดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้มากขึ้น จะทำให้การยึดเกาะกันดีขึ้น ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กันมีอยู่ 3 วิธีดังนี้

1. การกัดด้วยสารละลายกรด

แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1.1 Cr(VI)-Based Etchants

ใช้สารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก หรือ สารละลายกรดไดโครเมตซัลฟูริก (Dichromate Sulfuric Acid) ในการปรับสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียม สารละลายจะปรับโครงสร้างของชั้นออกไซด์ที่อยู่บนผิวอลูมิเนียมดังรูปที่ 2.2 [2]



รูปที่ 2.2 แสดงชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก หรือสารละลายกรดไดโครเมตซัลฟูริก

1.2 Non-Cr(VI) Etchants

การปรับสภาพผิววิธีนี้ใช้สารละลายกรดซึ่งไม่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ เช่น สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกไนตริก (Hydrofluoric Nitric Acid) โครงสร้างของออกไซด์หลังจากการปรับสภาพผิวจะมีลักษณะที่คล้ายกับในแบบแรก

2. Anodizing

แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.1 Phosphoric Acid Anodizing (PAA)

ปฏิกิริยาอะโนไดเซชัน (Anodization) ของอลูมิเนียมในสารละลายกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid) จะทำให้เกิดโพรงหรือรูพรุนบนชั้นของออกไซด์ โดยลักษณะของออกไซด์ที่ได้นั้น จะมีลักษณะเป็นร่างแหรูปหกเหลี่ยมและมีความลึกไปจนถึงผิวของโลหะดังรูปที่ 2.3 [2] ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนจะขึ้นอยู่กับค่าของศักย์ไฟฟ้าที่ให้และชนิดของสารละลายที่ใช้ ส่วนความหนาของชั้นออกไซด์จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแสและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา



รูปที่ 2.3 แสดงชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกทำปฏิกิริยาอะโนไดเซชันกับแผ่นอลูมิเนียม

2.2 Chromic Acid Anodizing (CAA)

วิธีนี้จะใช้สารละลายกรดโครมิกซัลฟูริกในการปรับโครงสร้างของออกไซด์ก่อน แล้วจึงใช้สารละลายกรดโครมิกในการทำปฏิกิริยาอะโนไดเซชัน ผลที่ได้คือชั้นของออกไซด์จะเกิดเป็นรูลึกลงไปจนถึงผิวของโลหะ แต่โครงสร้างของออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีความเป็นระเบียบน้อยกว่าใช้วิธี PAA ดังรูปที่ 2.4 [2]



รูปที่ 2.4 แสดงชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก ทำปฏิกิริยาอะโนไดเซชันกับแผ่นอลูมิเนียม

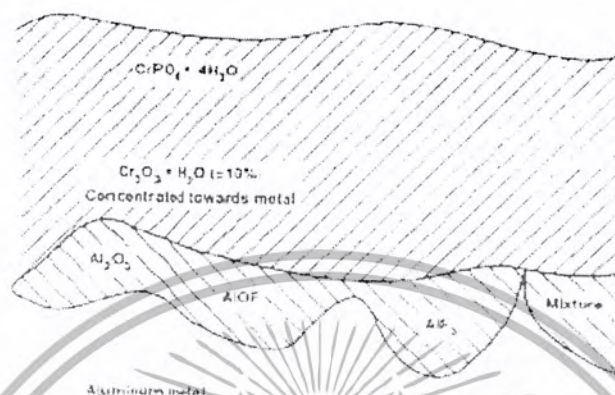
3. Chemical Conversion Coating

แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

3.1 Cr(VI)-Based Conversion Coatings

เป็นการสร้างชั้นเหนือผิวหน้าของอลูมิเนียม โดยใช้สารละลายโครเมตฟอสเฟต (Chromate Phosphate Solution) ดังรูปที่ 2.5 [2] ข้อดีของวิธีนี้คือใช้เวลาก่อนข้างสั้นคือประมาณ 10 วินาที เสียค่าใช้จ่ายน้อย แต่ก็มีข้อเสียคือ จะเกิด Cr(VI) และ ฟลูออรีนไอออน (Fluorene Ion) ซึ่งเป็นของเสียที่ยากแก่การกำจัดทิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงชั้นของออกไซด์ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยการสร้างชั้นเนื้อผิวหน้าของอลูมิเนียม โดยใช้สารประกอบโครเมตฟอสเฟต

3.2 Non-Cr(VI) Conversion Coatings

ใช้สารตัวอื่นแทน โครเมียม ที่นิยมใช้สารที่มีเซอร์โคเนียม (Zirconium) หรือไทเทเนียม (Titanium) เป็นองค์ประกอบ

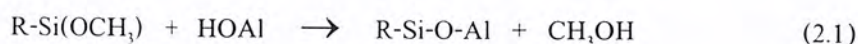
นอกจากนี้แล้วยังมีวิธีการปรับสภาพพื้นผิวของอลูมิเนียมอีกหลายวิธี เช่น Boehmite Coatings . Organosilanes . Nitrilotris(methylene)triphosphonic Acid (NTMP) . Inorganic Primers . Treatment of Surfaces with Polymer เป็นต้น

กลไกการแยกออกจากกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ

ในการศึกษากลไกการแยกพอลิเมอร์และโลหะออกจากกัน ระบบตัวอย่างของพอลิสไตรีนกับอลูมิเนียมได้ถูกนำมาใช้ศึกษา ด้วยเหตุผลที่ว่าสามารถควบคุมความบริสุทธิ์ของพอลิเมอร์ในขั้นตอนการสังเคราะห์ได้ อีกทั้งยังสามารถหาคุณสมบัติ หรือค่าคงที่ที่ต้องการใช้ในการคำนวณได้ง่าย

โดยปกติแล้ว พอลิสไตรีนกับอลูมิเนียมจะไม่ทำปฏิกิริยา หรือสร้างพันธะต่อกัน จึงต้องใช้สารบางชนิดช่วยในการสร้างพันธะ ซึ่งสารที่นิยมใช้กันก็คือไซเลน โดยการผสมสไตรีนมอนอเมอร์ (Styrene Monomer) กับไซเลนเข้าด้วยกัน ไซเลนจะเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ปลายของสายโซ่พอลิเมอร์

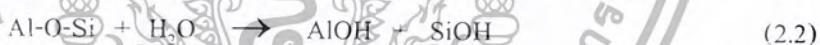
หลังจากนั้นจึงนำไปหล่อด้วยแม่พิมพ์เพื่อทำการขึ้นรูป โดยไซเลนที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์จะเข้าทำปฏิกิริยากับอลูมิเนียมดังสมการ



จากสมการที่ 2.1 จะเห็นว่า ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีไซเลนสร้างพันธะอยู่เท่านั้นที่จะทำปฏิกิริยากับอลูมิเนียม ดังนั้นความเข้มข้นของไซเลนที่ผสมลงในสไตรีนมอนอเมอร์ จึงมีผลต่อจำนวนพันธะระหว่างพอลิสไตรีนกับอลูมิเนียม ซึ่งหมายถึงความแข็งแรงของการยึดเกาะกันระหว่างพอลิสไตรีนกับแผ่นอลูมิเนียม

หลังจากนั้น จึงนำชิ้นงานไปทำการทดสอบการแยก โดยมีเทอร์มัลแจกเกต (Thermal Jacket) ซึ่งภายในบรรจุน้ำไว้และรักษาอุณหภูมิให้คงที่ โดยที่ปลายด้านหนึ่งของแผ่นอลูมิเนียม จะผูกติดกับค้อนน้ำหนักเพื่อเป็นการให้แรงดึงที่คงที่ ในการแยกอลูมิเนียมออกจากพอลิสไตรีน ซึ่งเวลาที่ใช้ในการแยกพอลิสไตรีนและอลูมิเนียมจนหลุดออกจากกันจะอยู่ระหว่าง 2 ถึง 24 ชั่วโมง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของค้อนน้ำหนักที่ใช้

เมื่อใช้ค้อนน้ำหนักที่ให้ความเร็วในการแยกที่น้อย การแยกออกจากกันของผิวสัมผัสจะเป็นผลของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นส่วนใหญ่ดังสมการ



จะเห็นว่า พันธะซิล็อกเซน (Siloxane Bond) จะขาดออกจากกัน โดยมีน้ำเข้ามาทำปฏิกิริยาแทนที่ แต่เมื่อเพิ่มขนาดค้อนน้ำหนัก ความเร็วในการแยกจะแปรผันตรงกับขนาดของค้อนน้ำหนัก ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อการแยกผิวสัมผัสเกิดขึ้นด้วยความเร็วที่มากกว่าความเร็วในการแพร่ของน้ำเข้าสู่พันธะเคมีที่ผิวสัมผัสได้ทัน การแยกออกจากกันจะเป็นผลของปฏิกิริยาเชนซิสชัน (Chain Scission) เป็นส่วนใหญ่ ดังสมการ



จากสมการที่ 2.3 สายโซ่พอลิเมอร์จะขาดออกจากกัน โดยไม่มีน้ำเข้ามาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งหากทำการทดลองในสภาพแวดล้อมปกติ (ในอากาศ) ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นน้อยมากเช่นกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎี

ทฤษฎีกลไกการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ

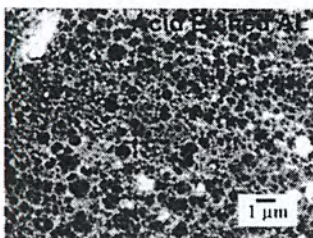
1. ทฤษฎีการประสานทางกล

ทฤษฎีการประสานทางกล ถูกเสนอโดย McBain และ Hopkins [3] เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกลไกของการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ โดยอธิบายว่าพอลิเมอร์กับโลหะสามารถยึดเกาะกันได้ เนื่องจากพอลิเมอร์ซึมผ่านเข้าไปในโพรง หรือรูพรุนของออกไซด์ที่อยู่บนผิวหน้าของโลหะที่มีความขรุขระ ซึ่งการซึมผ่านนี้สามารถเข้าไปได้ที่ความลึกระดับหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากเกิดความดันย้อนกลับที่อยู่ภายในรูพรุนของออกไซด์ ทำให้เกิดการต้านการซึมผ่านของพอลิเมอร์และยังพบว่า ความขรุขระที่ผิวหน้าของโลหะเป็นปัจจัยสำคัญของการยึดเกาะกัน ระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ เนื่องจาก ความขรุขระทำให้ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น จึงทำให้พอลิเมอร์กับโลหะยึดเกาะกันได้ดีขึ้น ซึ่งนอกจากความขรุขระแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีความสำคัญต่อการยึดเกาะกันของพอลิเมอร์กับโลหะ เช่น ความเหนียวของพอลิเมอร์ ค่าเวทอะบิลิตี (Wet Ability) ของโลหะ หรือรูปร่างรูพรุนของออกไซด์ เช่น ทรงกระบอก หรือทรงกรวย เป็นต้น แสดงได้ดังรูปที่ 3.1 [4]

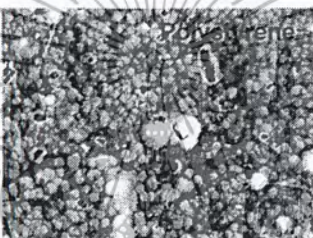


รูปที่ 3.1 รูปร่างรูพรุนของออกไซด์ที่มีผลต่อการซึมผ่านของพอลิเมอร์

การทดลองที่สนับสนุนทฤษฎีการประสานทางกล คือนำชิ้นงานของการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเอสไทรินกับแผ่นอลูมิเนียม แช่ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) เข้มข้น ซึ่งจะทำให้แผ่นอลูมิเนียมถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จนหมด คงเหลือแต่พอลิเอสไทริน ที่มีผิวหน้าขรุขระดังรูปที่ 3.2 [5] และสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมก่อนที่จะถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 [5]



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายสภาพพื้นผิวของแผ่นอูมิเนียมก่อนที่จะถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายสภาพพื้นผิวของพอลิไทรีน หลังจากแผ่นอูมิเนียมถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จนหมด

2. ทฤษฎีการเกิดพันธะเคมี

ทฤษฎีการเกิดพันธะเคมีเป็นอีกทฤษฎีหนึ่ง ที่มีความเกี่ยวข้องกับกลไกการยึดเกาะกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ กล่าวว่าจะมีพันธะเคมีเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์กับโลหะ โดยที่ปลายด้านหนึ่งจะเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ ส่วนอีกด้านจะเกิดพันธะกับโลหะ ทำให้พอลิเมอร์กับโลหะสามารถยึดเกาะกันได้ พันธะที่กล่าวถึงนี้เป็นพันธะแบบปฐมภูมิ เช่น พันธะไอออนิก หรือพันธะโควาเลนต์ เป็นต้น โดยมีค่าความแข็งแรงของพันธะมีค่าตั้งแต่ 100 ถึง 1,000 กิโลจูลต่อโมล ส่วนพันธะอีกแบบหนึ่ง คือ พันธะแบบทุติยภูมิ เช่น แรงวานเดอร์วาลส์ มีค่าความแข็งแรงของพันธะไม่เกิน 50 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งพันธะที่ผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะจะต้องเป็นพันธะปฐมภูมิ จึงจะมีค่าความแข็งแรงเพียงพอในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

ค่าความแข็งแรงทางกลที่ผิวสัมผัสสามารถหาได้ โดยการวัดค่าพลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัส (Fracture Energy, G) ออกจากกัน จากทฤษฎีการเกิดพันธะเคมี ค่าพลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสออกจากกัน จะแปรผันโดยตรงกับกำลังสองของทั้งจำนวนพันธะที่ผิวสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

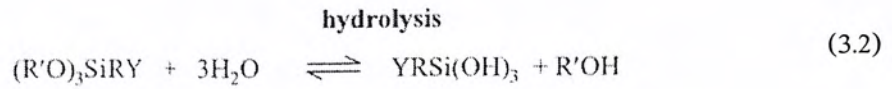
ต่อหน่วยพื้นที่ (Areal Density of Bonded Sites, Σ) และแรงที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสออกจากกัน (f) ดังสมการที่ 3.1

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

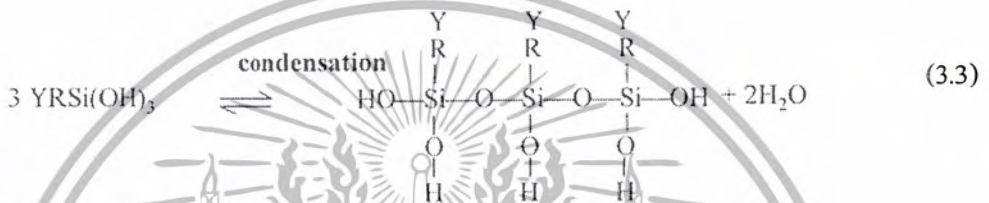
โดยที่ D = เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิเมอร์ (นาโนเมตร)
S = ความดันที่ผิวสัมผัส (เมกะปาสกาล)

นอกจากพันธะเคมี ที่ทำให้โลหะกับพอลิเมอร์สามารถยึดเกาะกันได้แล้ว ยังมีสารอีกประเภทหนึ่ง ที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะกันของโลหะกับพอลิเมอร์ได้ โดยเฉพาะเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีน้ำหรือความชื้น สารชนิดนี้คือไซเลนคัปปลิงเอเจนต์ (Silane Coupling Agent) ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของไซเลนเป็นส่วนใหญ่ [6,7] และมีโครงสร้างทั่วไปเป็น $X_3Si-R-Y$ โดยที่ X คือ หมู่ไฮโดรไลซ์ (Hydrolyzable Group) ที่อยู่บนอะตอมของซิลิกอน ซึ่งอยู่ในรูปของพันธะออกซิเจน (M-O-Si) R คือ โมเลกุลที่อยู่ระหว่างอะตอมของซิลิกอนกับหมู่พอลิเมอร์รีแอกทีฟ (Polymer Reactive Group) และ Y คือ หมู่ออร์กาโนฟังก์ชัน (Organofunctional Group) ที่สามารถสร้างพันธะกับออร์แกนิกพอลิเมอร์ (Organic Polymer) ได้และมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวของโลหะ ดังนี้

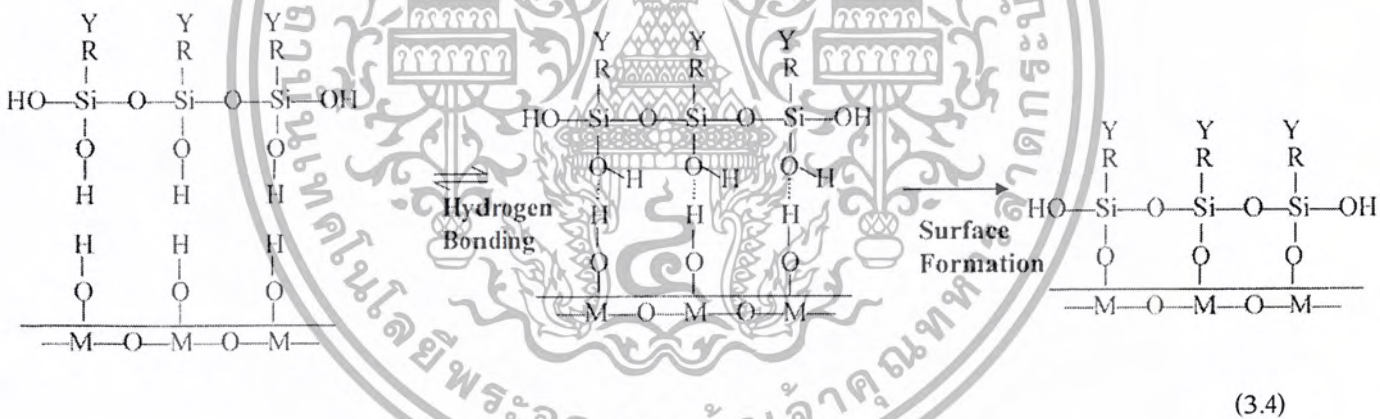
1. ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส



2. ปฏิกิริยาcondensation



3. ปฏิกิริยาไฮโดรเจนบอนด์ (Hydrogen Bonding)



ในการเลือกใช้ไซเลนให้เหมาะสมกับชนิดของพอลิเมอร์ จะพิจารณาจากหมู่ฟังก์ชันของไซเลน ว่าสามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ชนิดนั้นได้หรือไม่ ซึ่งชนิดของไซเลนที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป แสดงได้ดังตาราง 3.1 [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงไอโซเลนชนิดต่างๆ

Organofunctional group	Chemical structure
A. Vinyl	$\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OCH}_3)_3$
B. Chloropropyl	$\text{ClCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$
C. Epoxy	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{CH}_2\text{CHCH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$
D. Methacrylate	$\text{CH}_2=\text{C}(\text{COOCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3)$
E. Primary amine	$\text{H}_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$
F. Diamine	$\text{H}_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$
G. Mercapto	$\text{HSCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$
H. Cationic styryl	$\text{CH}_2=\text{CHC}_6\text{H}_4\text{CH}_2\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{NH}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OCH}_3)_3\cdot\text{HCl}$

3. พลังงานเทอร์โมไดนามิกของการยึดเกาะ (Thermodynamic Work of Adhesion)

เมื่อต้องแยกผิวสัมผัสออกจากกันเพื่อทำให้เกิดพื้นผิวอิสระสองพื้นผิว จะต้องใช้พลังงานจำนวนหนึ่งและในทางตรงกันข้าม ถ้าต้องการนำพื้นผิวอิสระสองพื้นผิวมารวมกันเพื่อให้เกิดผิวสัมผัส จะต้องใช้พลังงานจำนวนหนึ่งเช่นกัน โดยพลังงานที่กล่าวถึงในทั้งสองกรณี คือ พลังงานเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งจะมีค่าเท่ากันแต่มีทิศทางตรงกันข้ามและความสัมพันธ์ของพลังงานพื้นผิวอิสระ พลังงานผิวสัมผัสอิสระกับพลังงานเทอร์โมไดนามิกส์ของการยึดเกาะ แสดงได้ดังสมการที่ 3.5

$$W = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (3.5)$$

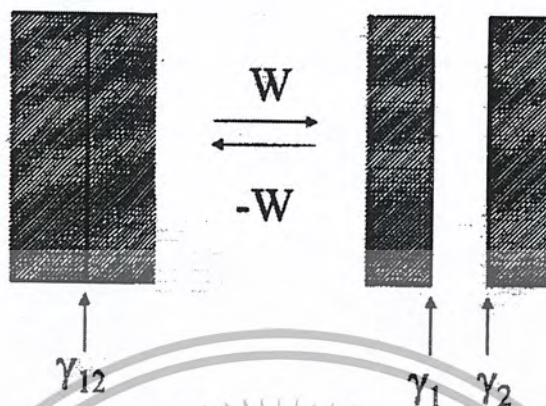
โดยที่ γ_1 = พลังงานพื้นผิวอิสระของพอลิเมอร์ (จูล)

γ_2 = พลังงานพื้นผิวอิสระของโลหะ (จูล)

γ_{12} = พลังงานผิวสัมผัสอิสระระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ (จูล)

โดยที่ พันธะแต่ละชนิดจะมีค่าของพลังงานเทอร์โมไดนามิกส์ไม่เท่ากัน เช่น พันธะไฮโดรเจน หรือ พันธะระหว่างกรดกับเบส มีค่าตั้งแต่ 40 ถึง 200 มิลลิจูลต่อตารางเมตร พันธะโควาเลนต์ มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 2 จูลต่อตารางเมตร ซึ่งพลังงานที่กล่าวถึงนี้ไม่รวมพลังงานที่ทำให้พอลิเมอร์เสียรูป (Deformation Energy) อย่างถาวร แสดงได้ดังรูปที่ 3.4 [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงพลังงานเทอร์โมไดนามิกส์ที่ใช้ในการยึดเกาะและการแยกออกที่ผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ

ทฤษฎีการปรับสภาพผิวของโลหะ

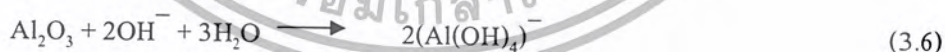
1. วิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียม ไดโกลด์ซิลซัลเฟต

การปรับสภาพผิวด้วยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียม ไดโกลด์ซิลซัลเฟต เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวกที่สุดวิธีหนึ่ง ในการใช้เพื่อเตรียมผิวของโลหะอลูมิเนียม สำหรับนำไปยึดเกาะกับพอลิเมอร์ โดยมีปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญเกิดขึ้น 2 ปฏิกิริยา [7] ด้วยกัน คือ

- 1) ปฏิกิริยาการกำจัดชั้นของออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ
- 2) ปฏิกิริยาการสร้างชั้นของออกไซด์ขึ้นมาใหม่

สามารถแสดงในรูปของสมการเคมีได้ ดังนี้

- สมการการกำจัดชั้นของออกไซด์

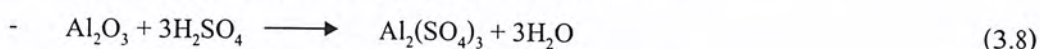


- สมการการสร้างชั้นของออกไซด์

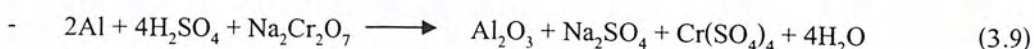


2. วิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก

การปรับสภาพผิวด้วยวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก จะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น 2 ปฏิกิริยา [8] เช่นกันและสามารถแสดงในรูปของสมการเคมีได้ ดังนี้



และ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 การทดลองเพื่อวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมทั้งที่ปรับและไม่ได้ปรับสภาพผิว ด้วยภาพถ่าย ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยใช้วิธีการปรับสภาพผิว 2 วิธี คือ

1. การล้างด้วยสารละลายโซเดียมโคเดคซิลซัลเฟต
2. การกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 29°C 58°C และ 70°C

ส่วนที่ 2 การทดลองเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน ที่แผ่นอลูมิเนียมปรับและไม่ได้ปรับสภาพผิว ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง

1. วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1.1 วัสดุ

1.1.1 แผ่นเทฟลอน (Teflon) ความหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร

1.1.2 แผ่นอลูมิเนียม ความหนาประมาณ 0.2 มิลลิเมตร

1.2 อุปกรณ์

1.2.1 บีกเกอร์ปริมาตร 50 และ 1000 มิลลิลิตร

1.2.2 กระบอกตวงปริมาตร 250 มิลลิลิตร

1.2.3 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

1.2.4 เครื่องให้ความร้อนและแม่เหล็ก สำหรับขึ้นความ

1.2.5 ซ้อนตักสาร

1.2.6 แท่งแก้วคน

1.2.7 ดินสอ

1.2.8 กรรไกร

1.2.9 คัตเตอร์ (Cutter)

1.2.10 ไม้บรรทัด

1.2.11 ตัวยึด

1.3 สารเคมี

1.3.1 โซเดียมโคเดคซิลซัลเฟต ผู้ผลิต Fisher Scientific UK Limited

1.3.2 โซเดียมไดโครเมต ผู้ผลิต Asia Pacific Specialty Chemicals Limited

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3 กรดซัลฟูริกเข้มข้น 96% ผู้ผลิต Labscan Asia

1.3.4 อีพอกซี

1.4 เครื่องมือ

1.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ผู้ผลิต LEO รุ่น LEO 1455VP

1.4.2 เครื่องทดสอบแรงดึง ผู้ผลิต INSTRON รุ่น 5566

โดยแสดงรูปเครื่องทดสอบแรงดึงไว้ในภาคผนวก ก.

2. ขั้นตอนการทดลอง

2.1 การเตรียมแผ่นอลูมิเนียม อีพอกซีและแม่พิมพ์

2.1.1 การเตรียมแผ่นอลูมิเนียม

- 1) ตัดแผ่นอลูมิเนียม ขนาดความกว้าง 3.5 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร
- 2) ล้างด้วยน้ำ เพื่อทำความสะอาดและทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ

2.1.2 การเตรียมอีพอกซี

- 1) ชั่งอีพอกซีชนิด A และชนิด B ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1
- 2) ผสมให้เข้ากัน เป็นเวลาประมาณ 5 นาที

2.1.3 การเตรียมแม่พิมพ์

- 1) ตัดแผ่นเทฟลอน ขนาดความกว้าง 3.5 เซนติเมตร ยาว 8 เซนติเมตร
- 2) นำแผ่นเทฟลอน ที่ได้จากขั้นตอนแรกมาตัดให้มีลักษณะเหมือนกรอบรูปโดยมีความหนาของกรอบ 5 มิลลิเมตร

2.2 การเตรียมสารละลายโซเดียมโครเมตซัลเฟตและสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก

2.2.1 การเตรียมสารละลายโซเดียมโครเมตซัลเฟต

- 1) ชั่งสารโซเดียมโครเมตซัลเฟต จำนวน 18 กรัม
- 2) ตวงน้ำปริมาตร 582 มิลลิลิตร
- 3) เทผสมกันในบีกเกอร์ โดยมีแม่เหล็กปั่นกวนเพื่อให้ละลายเข้าด้วยกัน

2.2.2 การเตรียมสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก

- 1) ชั่งสารโซเดียมไดโครเมต ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จำนวน 20 กรัม
- 2) ตวงสารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เข้มข้น 96% ปริมาตร 108.70 มิลลิลิตร
- 3) ตวงน้ำปริมาตร 600 มิลลิลิตร
- 4) เทสารละลายกรดซัลฟูริก เข้มข้น 96% ลงในน้ำ แล้วจึงเทสาร โซเดียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโครเมตลงไปผสมกันในบีกเกอร์

5) นำไปวางไว้บนเครื่องให้ความร้อน โดยมีแม่เหล็กปั่นกวน เพื่อให้สารทั้งหมดละลายเข้าด้วยกัน

2.3 การปรับสภาพผิวของแผ่นอลูมิเนียม

2.3.1 การปรับสภาพผิวด้วยสารละลายโซเดียมโคเดคซิลซัลเฟต

1) ใส่แผ่นอลูมิเนียมลงในสารละลายโซเดียมโคเดคซิลซัลเฟต ที่อุณหภูมิ 29°C เป็นเวลา 30 นาที

2) นำแผ่นอลูมิเนียมออกจากสารละลาย แล้วนำไปล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized Water) แล้วทิ้งให้แห้งไว้ในอากาศ

2.3.2 การปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก

1) ใส่แผ่นอลูมิเนียมลงในสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 12 นาที

2) นำแผ่นอลูมิเนียมออกจากสารละลาย แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นและทิ้งให้แห้งไว้ในอากาศ

3) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 2 โดยเปลี่ยนแผ่นอลูมิเนียมและอุณหภูมิเป็น 58°C และ 29°C ตามลำดับ

2.4 การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียม ทั้งที่ปรับและไม่ได้ปรับสภาพผิว

1) ตัดแผ่นอลูมิเนียมที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวและปรับสภาพผิวด้วยการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโคเดคซิลซัลเฟตและการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 58°C ขนาด 1×1 เซนติเมตร มาอย่างละหนึ่งแผ่น

2) นำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่กำลังขยาย 1000 5000 และ 10000 เท่า

3) วิเคราะห์สภาพผิวของแผ่นอลูมิเนียม ที่ได้จากภาพถ่าย

2.5 การขึ้นรูปชิ้นงาน

1) นำแผ่นอลูมิเนียมที่ปรับและไม่ได้ปรับสภาพผิวทั้งหมด วางประกบติดกับแม่พิมพ์และใช้ตัวหนีบหนีบไว้

2) เทอีพอกซีที่เตรียมไว้ ลงในแม่พิมพ์แต่ละอันและทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 30 นาที

3) ถอดแม่พิมพ์ออกจากชิ้นงานและตัดแผ่นอลูมิเนียมออก โดยให้ส่วนที่ยึดเกาะกับอีพอกซีมีขนาดความกว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร

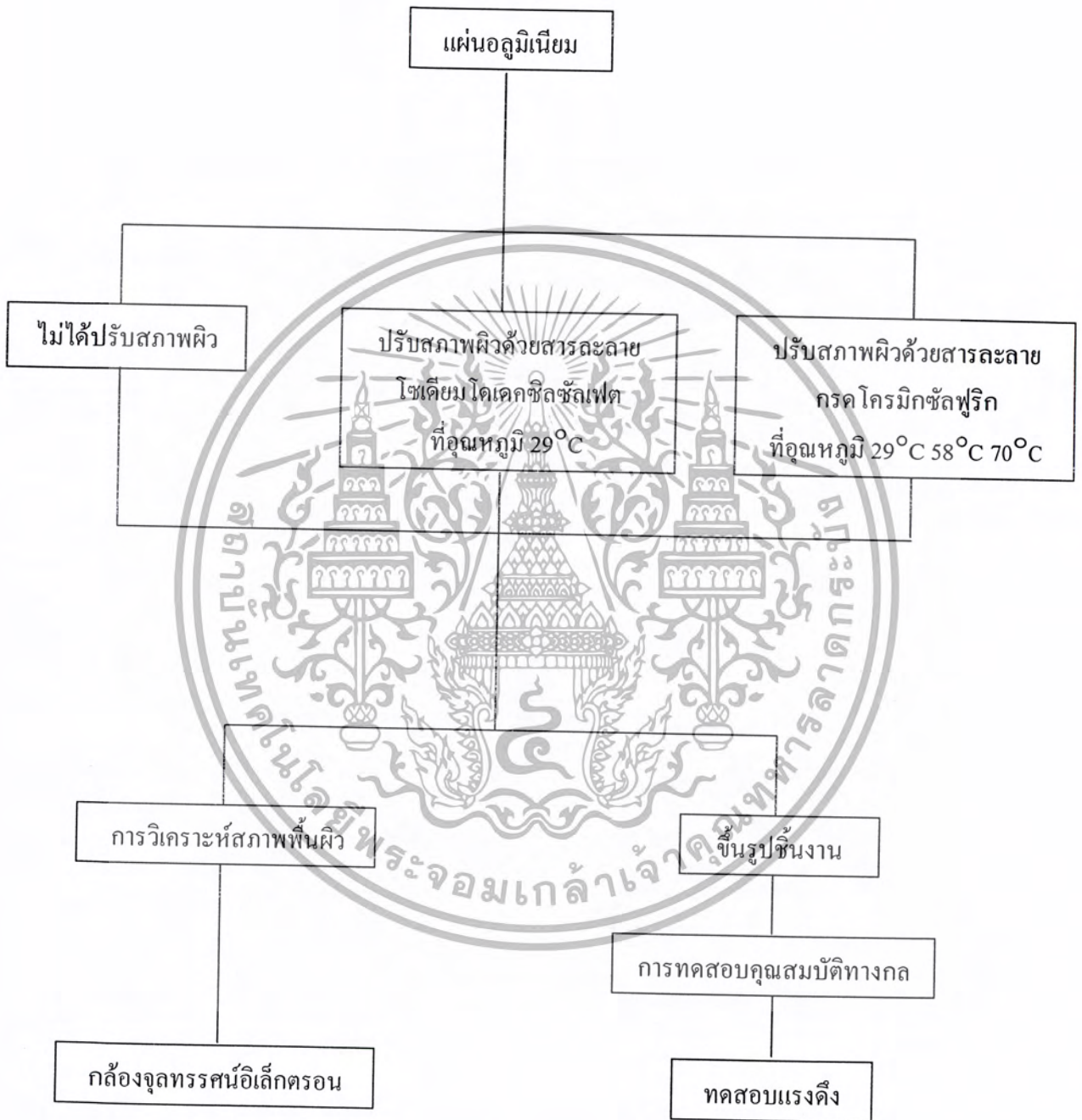
2.6 การทดสอบคุณสมบัติทางกล

1) นำชิ้นงานที่ได้ ไปทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยความเร็วในการดึงแผ่นอลูมิเนียมให้แยกออกจากอีพอกซี คือ 1×10^{-5} เมตรต่อวินาที โดยแสดงรูปขณะทำการทดสอบไว้ในภาคผนวก ก.

2) วิเคราะห์ความแข็งแรงของการยึดเกาะกันของอีพอกซีกับแผ่นอลูมิเนียม ที่ได้จากการปรับสภาพผิวด้วยวิธีต่างๆ และที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว ซึ่งข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดึง (นิวตัน) กับเวลา (วินาที)



แผนผังการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
ผลการทดลอง

แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

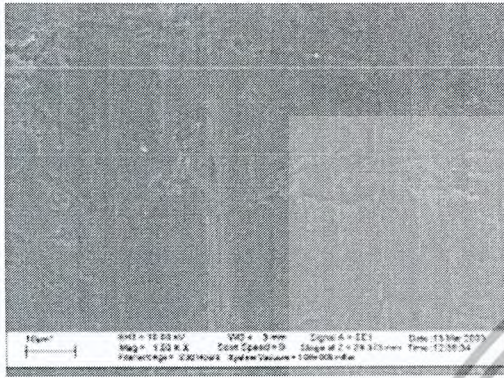
ส่วนที่ 1 ผลการทดลองในส่วนของกราฟวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียม

ภาพถ่ายสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว ปรับสภาพผิวโดยใช้สารละลายโซเดียมโคเดคซิลซัลเฟตที่อุณหภูมิ 29°C และปรับสภาพผิวสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริกที่อุณหภูมิ 58°C ดังรูปที่ 5.1

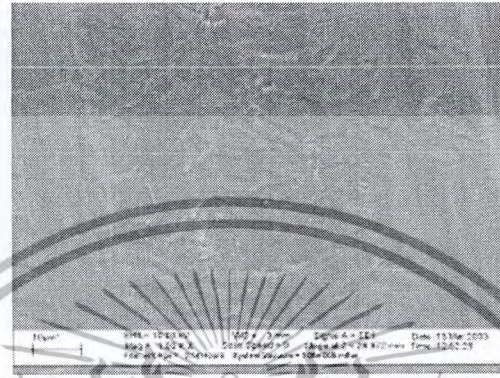


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

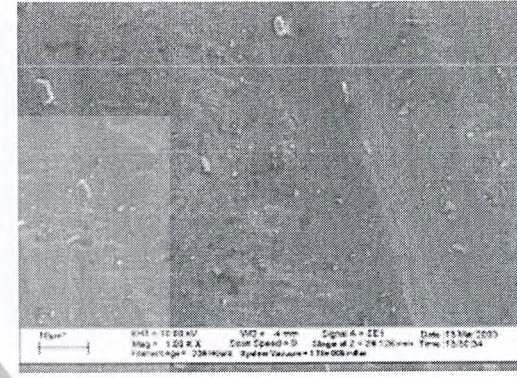
1000X



(1)

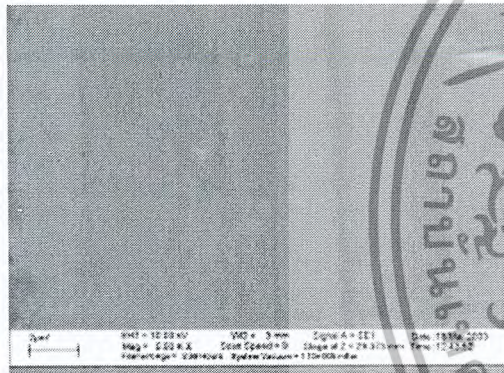


(4)



(7)

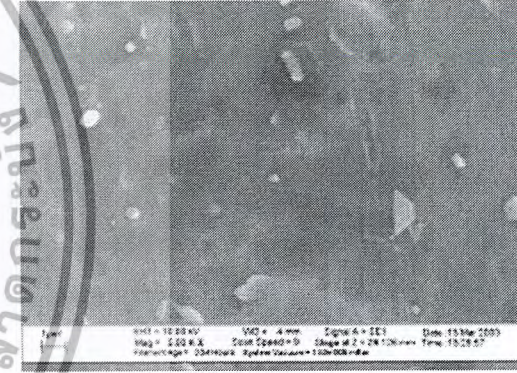
5000X



(2)

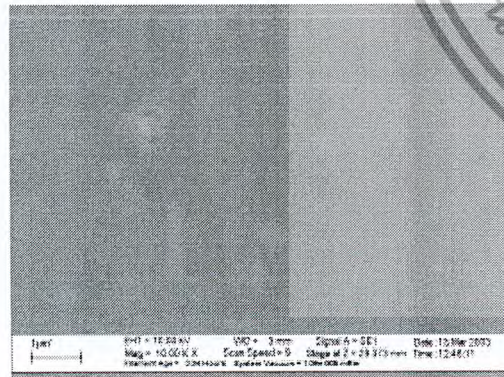


(5)

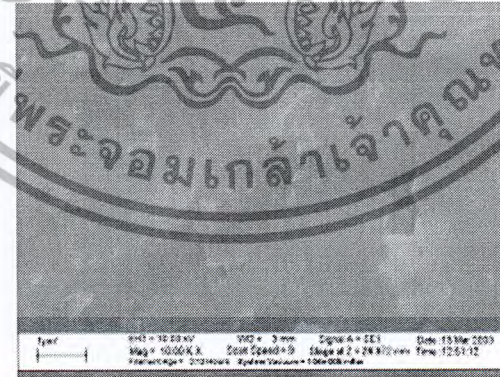


(8)

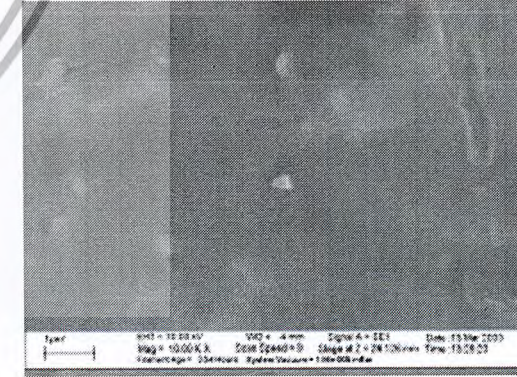
10000X



(3)



(6)



(9)

รูปที่ 5.1 แสดงสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวและไม่ได้ปรับสภาพผิว โดยที่ (1),(2) และ (3) ไม่ได้ปรับสภาพผิว (4),(5) และ (6) ปรับสภาพผิวด้วยสารละลายโซเดียมดิวเทคซิลซัลเฟตที่อุณหภูมิ 29 °C (7),(8) และ (9) ปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกกับซัลฟูริกที่อุณหภูมิ 58 °C

จากรูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่า

1. พื้นผิวที่ไม่ได้ปรับสภาพ

พบว่า พื้นผิวมีลักษณะราบเรียบและไม่สังเกตเห็นความขรุขระ บนผิวหน้าของแผ่นอลูมิเนียม ถึงแม้ว่าจะใช้กำลังขยายสูงขึ้นก็ตาม

2. พื้นผิวที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ที่อุณหภูมิ 29°C

พบว่า พื้นผิวมีความขรุขระปรากฏให้เห็น เนื่องจากเกิดโครงสร้างของออกไซด์ขึ้น บนผิวหน้าของแผ่นอลูมิเนียม โดยความลึกของชั้นออกไซด์มีค่า ตั้งแต่ 50 ถึง 200 หรือ 300 นาโนเมตร [9] และที่กำลังขยายสูงขึ้น สามารถมองเห็นโครงสร้างของออกไซด์ได้ชัดเจนขึ้น

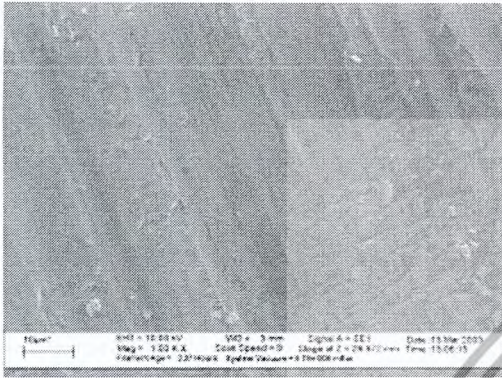
3. พื้นผิวที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโครมิกซัลฟูริกที่อุณหภูมิ 58°C

พบว่า พื้นผิวมีลักษณะคล้ายกับพื้นที่ผิวที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ที่อุณหภูมิ 29°C

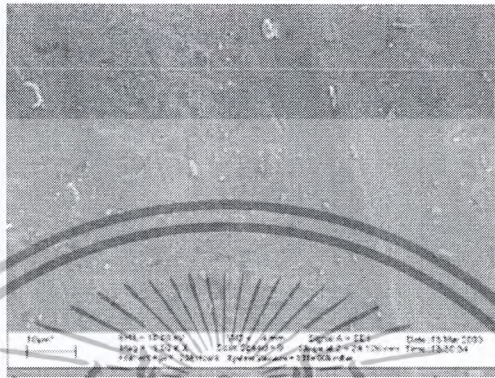
ภาพถ่ายสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 29°C , 58°C และ 70°C ดังรูปที่ 5.2



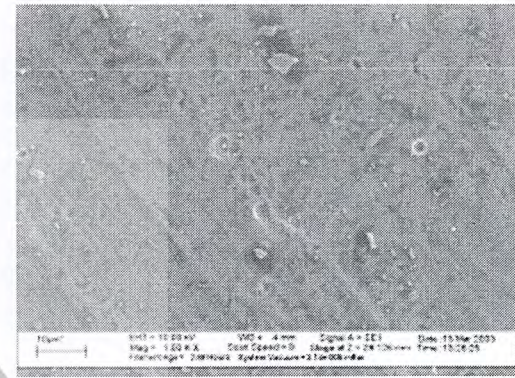
1000X



(1)

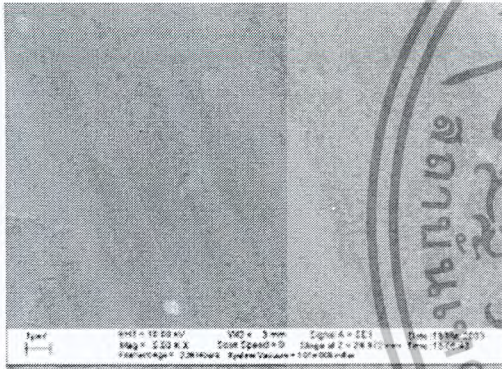


(4)

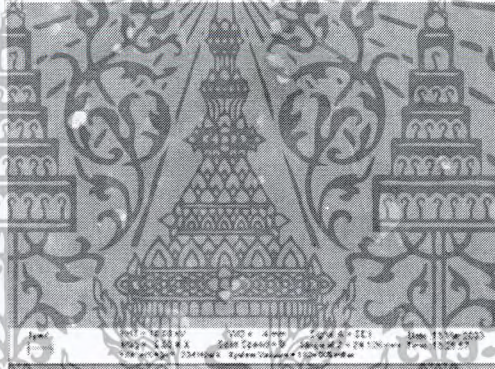


(7)

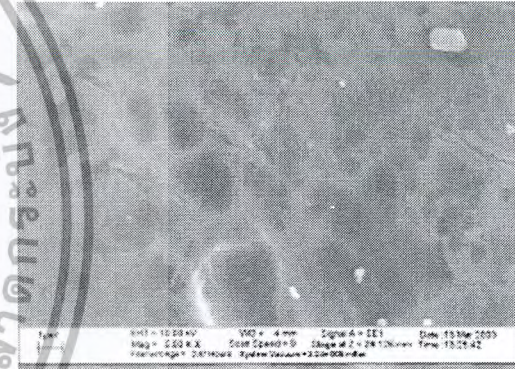
5000X



(2)

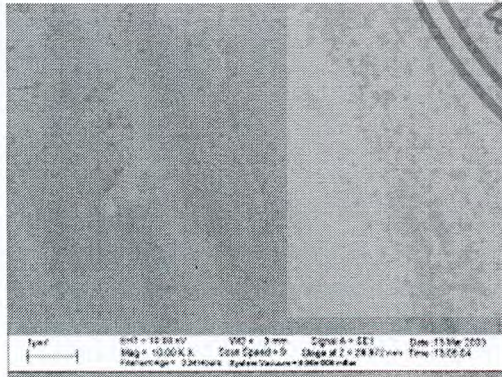


(5)

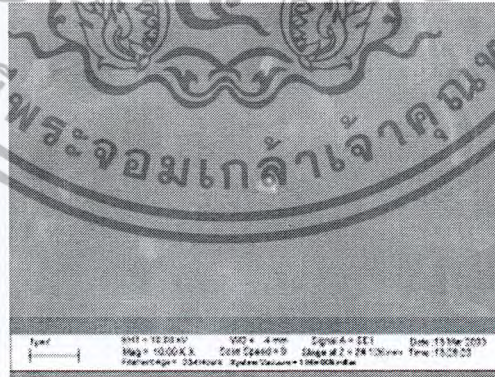


(8)

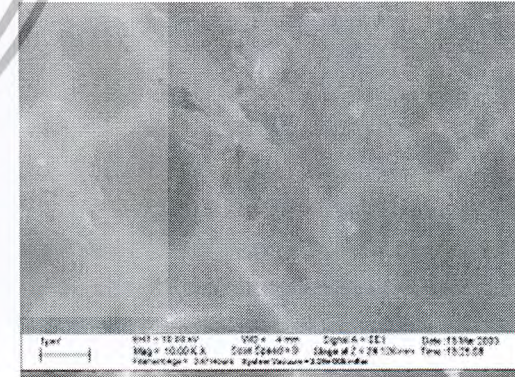
10000X



(3)



(6)



(9)

รูปที่ 5.2 แสดงสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกกับซัลฟูริกโดยที่ (1),(2) และ (3) ที่อุณหภูมิ 29°C (4),(5) และ (6) ที่อุณหภูมิ 59°C (7),(8) และ (9) ที่อุณหภูมิ 70°C

จากรูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่า

1. พื้นผิวที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโครมิกซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 29°C

พบว่า พื้นผิวมีลักษณะที่ราบเรียบและไม่สังเกตเห็นความขรุขระ บนผิวหน้าของแผ่นอลูมิเนียม ถึงแม้ว่าจะใช้กำลังขยายสูงขึ้นก็ตาม

2. พื้นผิวที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโครมิกซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 58°C

พบว่า พื้นผิวมีความขรุขระปรากฏให้เห็น เนื่องจากเกิดโครงสร้างของออกไซด์ชั้น บนผิวหน้าของแผ่นอลูมิเนียมและที่กำลังขยายสูงขึ้นสามารถมองเห็น โครงสร้างของออกไซด์ได้ชัดเจนขึ้น

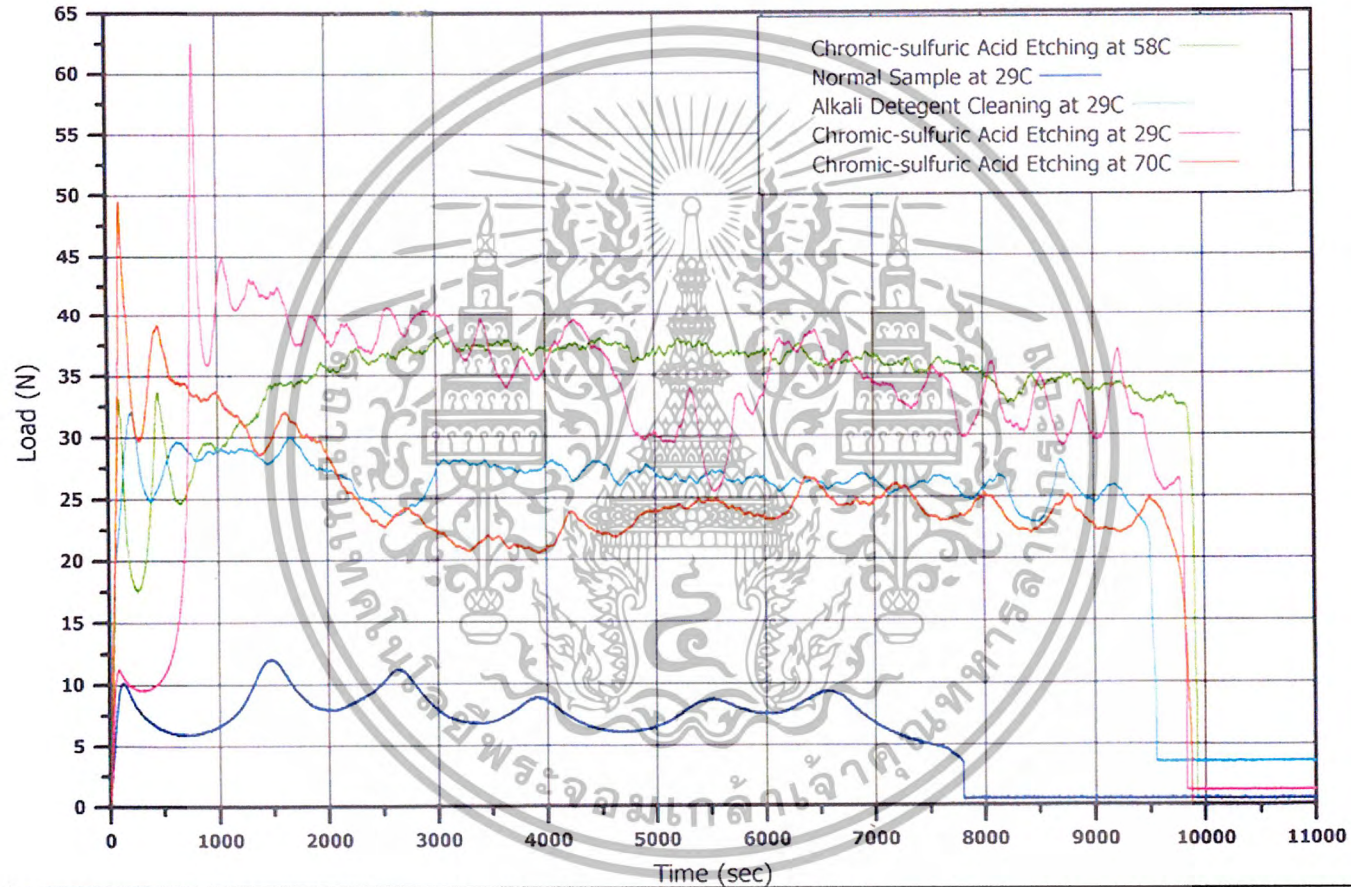
3. พื้นผิวที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโครมิกซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 70°C

พบว่า พื้นผิวมีโครงสร้างของออกไซด์เกิดขึ้น บนผิวหน้าของแผ่นอลูมิเนียม แต่ยังไม่ชัดเจนนัก

ส่วนที่ 2 ผลการทดลองจากการทดสอบคุณสมบัติทางกล

แสดงเป็นกราฟระหว่างแรงดึงกับเวลา ในการดึงแผ่นอลูมิเนียมออกจากอีพ็อกซีของชิ้นงานที่แผ่นอลูมิเนียมไม่ได้ปรับสภาพผิว ปรับสภาพผิวด้วยสารละลายโซเดียมไดโครเมตซัลเฟต ที่อุณหภูมิ 29°C และปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริกที่อุณหภูมิ 29°C , 58°C และ 70°C ดังรูปที่ 5.3

Polymer Metal Peel Test



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง (นิวตัน) กับเวลา (วินาที)

การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลทำได้โดยการวัดค่าแรง ที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสออกจากกัน ซึ่งค่าที่ได้จากผลการทดลอง สามารถแสดงได้ในรูปของพลังงานกับเวลาของชิ้นงาน ที่แผ่นอลูมิเนียม ไม่ได้ปรับสภาพผิว ปรับสภาพผิวโดยใช้สารละลายโซเดียมโคเดคซิลซัลเฟต ที่อุณหภูมิ 29°C และปรับสภาพผิวโดยใช้สารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 29°C , 58°C และ 70°C ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าพลังงาน (จุดต่อตารางเมตร) กับ เวลา (วินาที) ที่ใช้แยกชิ้นงานที่แผ่นอลูมิเนียม ไม่ได้ปรับสภาพผิวและปรับสภาพผิวด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการปรับสภาพผิวของแผ่นอลูมิเนียม	แรงดึง (นิวตัน)	เวลา (วินาที)	พลังงาน (จุดต่อตารางเมตร)
ไม่ได้ปรับสภาพผิว	8	7800	533
ปรับสภาพผิวด้วยสารละลาย โซเดียมโคเดคซิลซัลเฟต ที่อุณหภูมิ 29°C	26	9500	1733
ปรับสภาพผิวด้วยสารละลาย กรดโครมิกซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 29°C	34	9800	2267
ปรับสภาพผิวด้วยสารละลาย กรดโครมิกซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 58°C	36	9900	2400
ปรับสภาพผิวด้วยสารละลาย กรดโครมิกซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 70°C	24	9800	1600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 5.1 พบว่า

1. ชิ้นงานที่แผ่นอลูมิเนียมไม่ได้ปรับสภาพพื้นผิว

พบว่า ใช้พลังงานและเวลาน้อยที่สุด ในการแยกแผ่นอลูมิเนียมออกจากอีพอกซี เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสมีค่าน้อยที่สุด ทำให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะมีค่าน้อยที่สุดด้วย

2. ชิ้นงานที่แผ่นอลูมิเนียมปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกกับซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 58°C

พบว่า ใช้พลังงานและเวลามากที่สุด ในการแยกแผ่นอลูมิเนียมออกจากอีพอกซี เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสมีค่ามากที่สุด ทำให้ความแข็งแรงของการยึดเกาะมีค่ามากที่สุดด้วย

3. ชิ้นงานที่แผ่นอลูมิเนียมปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกกับซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 70°C

พบว่า ใช้พลังงานและเวลาใกล้เคียง กับชิ้นงานที่แผ่นอลูมิเนียมปรับสภาพผิวด้วยสารละลายโซเดียมไดโครเมตซัลเฟต เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสอาจมีค่าใกล้เคียงกัน

4. ชิ้นงานที่แผ่นอลูมิเนียมปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกกับซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 29°C

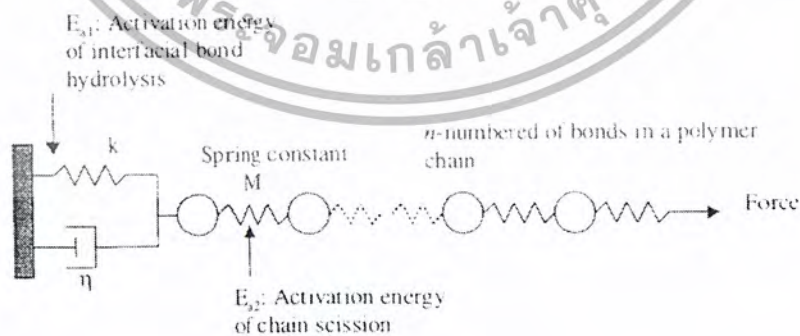
พบว่า ใช้พลังงานและเวลาใกล้เคียง กับชิ้นงานที่แผ่นอลูมิเนียมปรับสภาพผิวด้วยสารละลายกรดโครมิกกับซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 58°C เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสอาจมีค่าใกล้เคียงกัน

บทที่ 6

การจำลองแบบ

ทฤษฎีกลไกการแยกออกระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ

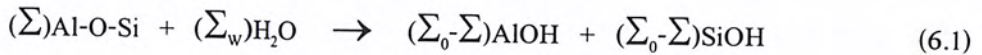
พันธะของสายโซ่พอลิเมอร์ ที่เชื่อมต่อกับพื้นผิวของโลหะสามารถจำลองได้โดยใช้แบบจำลองซึ่งประกอบด้วยสปริง (Spring) และแดชพอต (Dashpot) ซึ่งแดชพอต คืออุปกรณ์ที่มีลักษณะคล้ายกระบอกสูบ ภายในบรรจุด้วยของเหลวแบบนิวโตเนียน (Newtonian Liquid) เมื่อมีแรงมากระทำต่ออุปกรณ์ ส่วนสปริงจะมีการตอบสนองต่อแรงแบบเส้นตรง (Linear Response) ในขณะที่แดชพอตจะมีความหน่วงในการตอบสนองต่อแรง ที่มากระทำต่ออุปกรณ์ (Viscoelastic Response) แบบจำลองของพันธะ ที่ผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์กับพื้นผิวโลหะ ประกอบด้วยสปริงและแดชพอตต่อขนาน (Parallel) กัน ซึ่งรู้จักกันในชื่อแบบจำลองของเคลวิน (Kelvin Model) ในที่นี้สปริงจะมีค่าคงที่ของสปริงเท่ากับ k_s ในขณะที่แดชพอตจะมีค่าความหนืดของของเหลว ที่บรรจุอยู่ภายในเท่ากับ η (รูปที่ 6.1) ส่วนพันธะในสายโซ่พอลิเมอร์จะถูกจำลองด้วยทรงกลม ที่เชื่อมต่อกันด้วยสปริงโดยมีค่าคงที่ของสปริงเท่ากับ M จำนวนของทรงกลม ที่มาประกอบกันเป็นสายโซ่พอลิเมอร์สามารถคำนวณหาได้จากอัตราส่วนของมวลโมเลกุล ที่พันกันของพอลิเมอร์ (Entanglement Molecular weight, M_e) ต่อมวลโมเลกุลของแต่ละเมอร์ ตัวอย่าง เช่น ในกรณีของพอลิสไตรีน ซึ่งมีค่า M_e เท่ากับ 31,200 กรัมต่อโมล และมวลโมเลกุลของเมอร์เท่ากับ 104 กรัมต่อ โมล จำนวนทรงกลม ที่มาเชื่อมต่อกันในแต่ละสายโซ่จะมีค่าเท่ากับ $31,200/104 = 300$ ทรงกลม



รูปที่ 6.1 แสดงแบบตัวอย่างของพันธะสปริงและแดชพอตที่ขนานกันซึ่งติดกับผิวสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาการแยกกันของพื้นผิวพอลิเมอร์และโลหะ เราสามารถเขียนสมการในเชิงจลนพลศาสตร์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงอัตราการลดลงของจำนวนพันธะต่อเวลา ดังสมการ



โดยที่ Σ = จำนวนพันธะที่เวลาใดๆ
 Σ_0 = จำนวนพันธะที่เวลาเริ่มต้น
 Σ_w = จำนวนโมเลกุลของน้ำที่ผิวสัมผัส

กรณี ที่การแยกของผิวสัมผัสเกิดขึ้นในน้ำ จำนวนโมเลกุลของน้ำถือว่ามากเกินพอ และอยู่ในสถานะสมดุล (Equilibrium) กับจำนวนโมเลกุลของน้ำที่ผิวสัมผัส ดังนั้น อันดับของปฏิกิริยาจึงมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อเทียบกับจำนวน โมเลกุลของน้ำ แต่ปฏิกิริยาจะเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First Order) เมื่อเทียบกับจำนวนพันธะเริ่มต้น ดังสมการ

$$-\frac{d\Sigma}{dt} = R_+ \Sigma - R_- (\Sigma_0 - \Sigma) \quad (6.2)$$

โดยที่ R_+ = อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า
 R_- = อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ

ซึ่งค่าทั้งสองนั้นหาได้จาก

$$R_+ = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{Ea^+}{kT}\right) \exp\left(\frac{f\lambda}{kT}\right) \quad (6.3)$$

$$R_- = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{Ea^-}{kT}\right) \exp\left(-\frac{f\lambda}{kT}\right) \quad (6.4)$$

โดยที่ k = ค่าคงที่ของโบลซ์มาน (จุดต่อ โมลเคลวิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- h = ค่าคงที่ของพลังค์ (จูลวินาที)
 T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)
 E_a^+ = พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาไปข้างหน้า (จูลต่อ โมล)
 E_a^- = พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาย้อนกลับ (จูลต่อ โมล)
 f = แรงที่ใช้ดึง (นิวตัน)
 λ = ความยาวของพันธะที่ถูกกระตุ้นโดยแรงที่มากระทำต่อพันธะ (นาโนเมตร)

การศึกษาการแยกของพอลิเมอร์กับโลหะ สามารถละเว้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ (R_-) ได้ ดังนั้น เมื่อนำสมการที่ 6.3 ไปแทนในสมการที่ 6.2 จะได้

$$\frac{d\Sigma}{dt} = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{E_a^+}{kT}\right) \exp\left(\frac{f\lambda}{kT}\right) \Sigma \quad (6.5)$$

สมการที่ 6.5 แสดงถึงการอัตราการลดลงของพันธะต่อเวลา เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อพันธะ จะเห็นว่าค่าพลังงานก่อกัมมันต์สุทธิ (Total Activation Energy) ของการเกิดปฏิกิริยา จะมีค่าลดลง โดยขนาดของพลังงานก่อกัมมันต์ที่ลดลงจะแปรผันตรงกับขนาดของแรง ที่มากระทำต่อพันธะ

จากทฤษฎีวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) เมื่อมีแรง ($f = Mvt$) มากระทำต่อสปริง และแดชพ็อตที่ต่อขนานกัน ระยะเวลาชดออกของอุปกรณ์ทั้งสองมีความสัมพันธ์ ดังสมการอนุพันธ์ต่อไปนี้

$$Mvt = k_s x + \eta \frac{dx}{dt} \quad (6.6)$$

โดยที่ x = ระยะยืด (เมตร)

v = ความเร็วในการแยก (เมตรต่อวินาที)

t = เวลา (วินาที)

หาอนุพันธ์ของสมการที่ 6.6 เทียบกับเวลา ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k_s}{\eta} \frac{dx}{dt} + \frac{Mv}{\eta} = 0 \quad (6.7)$$

หาผลเฉลยของสมการที่ 6.7 ด้วยเงื่อนไขตั้งต้น $x(0) = 0$ และ เงื่อนไขขอบเขต

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = v \quad \text{จะได้}$$

$$x(t) = \frac{Mvt}{k_s} + \left(\frac{\eta v}{k_s} - \frac{\eta Mv}{k_s^2} \right) \left[1 - \exp\left(-\frac{k_s t}{\eta}\right) \right] \quad (6.8)$$

แรงที่ใช้ในการสลายพันธะที่ผิวสัมผัส สามารถคำนวณได้จาก $f = k_s x(t)$ และให้

$$\tau = \frac{\eta}{k_s} \quad \text{ดังนั้นสมการที่ 6.8 จึงลดรูปเป็น}$$

$$f = Mvt + \left(\eta v - Mv\tau \right) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (6.9)$$

ให้ $\eta v + f = Mv\tau$ แล้วแทนค่าลงในสมการที่ 6.9 จะได้

$$f = \frac{Mvt + Mv\left(t - \tau\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]}{2 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)} \quad (6.10)$$

เมื่อ แทนค่า f จากสมการ 6.10 ลงในสมการ 6.5 และให้ Ea^+ เป็นพลังงานก่อกัมมันต์ในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (จุดต่อโมล) เราสามารถแสดงอัตราการสลายของพันธะ ที่ผิวสัมผัส เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ดังสมการที่ 6.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$-\frac{d\Sigma}{dt} = \frac{kT}{h} \exp \left(-\frac{Ea_1 - \frac{Mvt + Mv(t-\tau) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \lambda}{2 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)}}{kT} \right) \Sigma \quad (6.11)$$

เมื่อ พิจารณาการแตกสลายของพันธะในสายโซ่พอลิเมอร์ เราสามารถใช้สมการที่ 6.5 เพื่อแสดงอัตราการลดลงของจำนวนพันธะต่อเวลาได้ เช่นเดียวกัน สิ่งที่แตกต่างกัน คือการแตกสลายของพันธะในสายโซ่พอลิเมอร์จะเป็นผลมาจากปฏิกิริยาเซนซิซัน โดย ไม่มีปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งค่าพลังงานก่อกัมมันต์เท่ากับ Ea_2 (จุดต่อโมล) และแรงที่ใช้ในการสลายพันธะมีค่าเท่ากับ $f = Mvt$ ดังนั้นสมการแสดงอัตราการลดลงของพันธะ อันเนื่องมาจากเซนซิซัน จึงแสดงได้ในสมการต่อไปนี้

$$\frac{d\Sigma}{dt} = \frac{nkT}{h} \exp \left(-\frac{Ea_2 - Mvt\lambda}{kT} \right) \Sigma \quad (6.12)$$

ค่า n คือจำนวนทรงกลมที่มาเชื่อมต่อกันในแต่ละสายโซ่พอลิเมอร์ ในสมการที่ 6.12 แสดงถึงความน่าจะเป็น ที่พันธะใดๆ ในสายโซ่สามารถแตกสลายไปได้เมื่อมีแรงมากระทำ

เมื่อรวมสมการที่ 6.11 และ 6.12 เข้าด้วยกัน แล้วทำอยู่ในรูปตัวแปรไร้หน่วย $\left(\phi = \frac{\Sigma}{\Sigma_0} \right)$

จะได้สมการ ที่แสดงถึงอัตราการลดลงของพันธะต่อเวลา อันเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และเซนซิซัน ซึ่งขนาดความสำคัญของกลไกทั้งสองที่มีต่อการแตกสลายของพันธะ ขึ้นอยู่กับความเร็วในการแยกผิวสัมผัส หรือขึ้นอยู่กับขนาดของแรง ที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสนั่นเอง

$$-\frac{d\phi}{dt} = \frac{kT}{h} \exp \left[\frac{Ea_1 - \frac{Mvt + Mv(t-\tau) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \lambda}{2 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)}}{kT} \right] \phi + \frac{nkT}{h} \exp \left(-\frac{Ea_2 - Mvt\lambda}{kT} \right) \phi \quad (6.13)$$

ที่ความเร็วของการแยกผิวสัมผัสมีค่าต่ำ พจน์แรกของสมการ 6.13 จะมีความสำคัญ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมีโอกาสที่จะเกิดได้มาก ในขณะที่ พจน์ที่สองจะมีความสำคัญ เมื่อความเร็วของการแยกผิวสัมผัสมีค่าสูง เพราะน้ำไม่สามารถแพร่เข้ามาในรอยต่อของผิวสัมผัสเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ การขาดของพันธะในกรณีนี้ จึงเกิดมาจากปฏิกิริยาเซนซิซชัน เป็นส่วนใหญ่ เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ 6.13 จะได้ ค่าของ ϕ เป็นฟังก์ชันของเวลา ซึ่งจะนำมาใช้คำนวณหาเวลาที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสได้จาก

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} \phi(t) dt \quad (6.14)$$

และพลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสคำนวณหาได้จาก

$$G = \frac{\Sigma_0^2 f_s^2 2\pi D}{S} \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^2 \left(1 - \frac{1}{\lambda_{craze}} \right) \quad (6.15)$$

โดยที่ $f_s = Mv\bar{t}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- G = พลังงานที่ใช้ในการแยก (จุดต่อตารางเมตร)
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยพอลิเมอร์ (นาโนเมตร)
 S = ความเค้นที่ผิวสัมผัส (เมกะปาสคาล)
 E_1 = โมดูลัสแรงดึงในทิศทางตั้งฉากกับเส้นใยพอลิเมอร์ (เมกะปาสคาล)
 E_2 = โมดูลัสแรงดึงในทิศทางขนานกับเส้นใยพอลิเมอร์ (เมกะปาสคาล)
 λ_{craze} = อัตราการยืดของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อเกิดการเสียรูปแบบถาวร (Crazing)

จากทฤษฎีทั้งหมดข้างต้นสามารถสร้างการจำลองแบบ โดยใช้สมการที่ 6.13 เพื่อหาค่า ϕ ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลา ทำให้หาค่าเวลาที่ใช้ในการแยกอลูมิเนียมออกจากพอลิस्टาไดรีนได้ ส่วนผลของการจำลองแบบที่ได้ แสดงไว้ดังรูปที่ 6.2

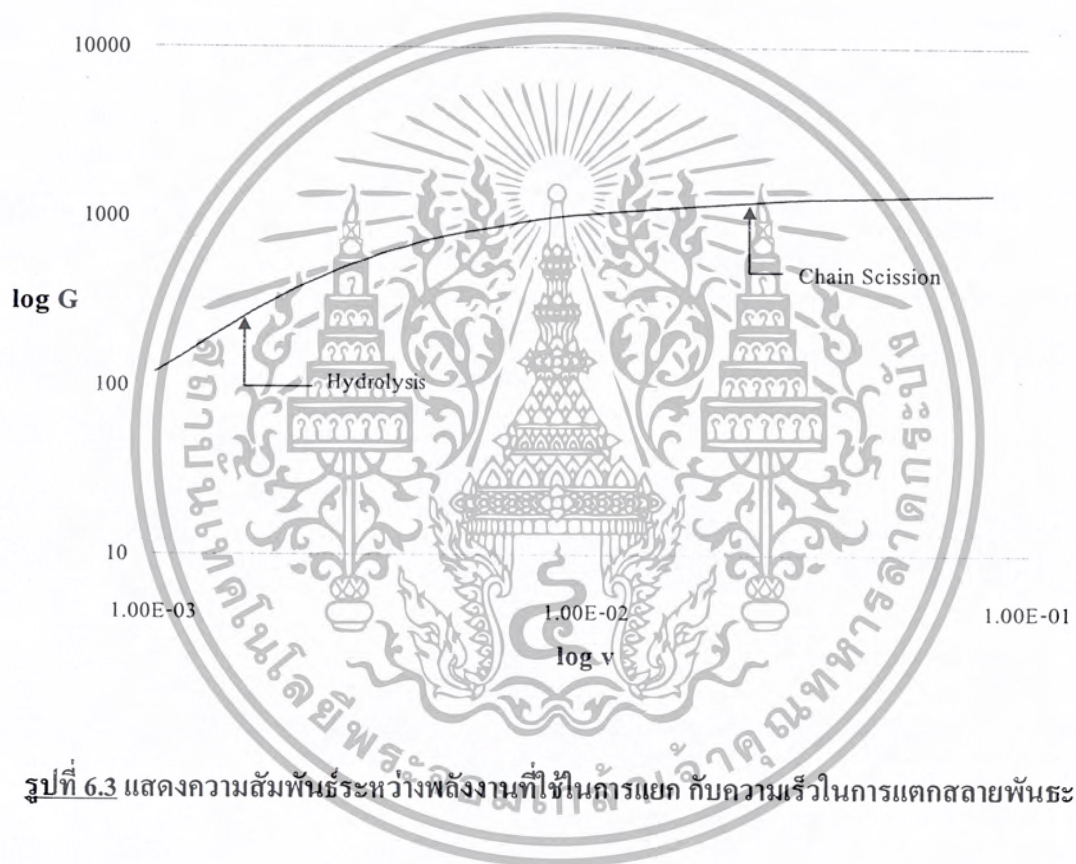


รูปที่ 6.2 แสดงผลเฉลยที่ได้จากสมการที่ 6.13 โดยใช้การจำลองแบบ

จากรูปที่ 6.2 เมื่อเวลาผ่านไปในช่วงแรกๆ ค่าของ ϕ จะยังคงมีค่าคงที่อยู่ที่ 1.0 แต่หลังจากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วจนเข้าใกล้ศูนย์แล้วจึงนำค่า τ ซึ่งได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟไปแทนในสมการที่ 6.15 ก็จะได้พลังงานที่ใช้ในการแยก

ความเร็วในการแตกสลายพันธะ มีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการแยกแสดงไว้ดังรูปที่ 6.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ใช้ในการแยก กับความเร็วในการแตกสลายพันธะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการคำนวณ

ในขั้นตอนการคำนวณสมการหลัก ที่ใช้ในการคำนวณมีสองสมการ คือ

1. สมการอัตราการลดลงของจำนวนพันธะ

$$-\frac{d\phi}{dt} = \frac{kT}{h} \exp \left[\frac{Ea_1 - \frac{Mvt + Mv(t-\tau) \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \lambda}{2 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)}}{kT} \right] \phi + \frac{nkT}{h} \exp \left(-\frac{Ea_2 - Mvt\lambda}{kT} \right) \phi \quad (6.13)$$

2. สมการพลังงาน

$$G = \frac{\sum_0^2 f_s^2 2\pi D \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^2 \left(1 - \frac{1}{\lambda_{craze}} \right)}{S} \quad (6.15)$$

ในโครงการนี้ เป็นการศึกษาผลที่ได้จากการจำลองการแยกออกจากกัน ระหว่างพอลิस्टาไร์น และออลูมิเนียม โดยแบ่งเป็นสองส่วน คือ

ส่วนที่ 1 เปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมกับผลการทดลองจริง

มีลำดับการคำนวณดังนี้

- นำค่าคงที่ แทนในสมการอัตราการลดลงของจำนวนพันธะและสมการพลังงาน ซึ่งค่าคงที่บางตัว เป็นคุณสมบัติจำเพาะของพอลิस्टาไร์น ค่าคงที่ต่างๆ มีดังนี้ [10]

ตารางที่ 6.1 แสดงค่าคงที่ต่างๆ

ตัวแปร	ค่า
k	1.38×10^{-23} J/mol.K
h	6.63×10^{-34} J.s
T	298 K
Ea ₁	50,000 J/mol
Ea ₂	33,7000 J/mol
D	90×10^{-10} m
$\frac{E_1}{E_2}$	0.0576
M	20 N/m
λ	1×10^{-10} m
τ	15 ms
n	300 mers/mol
Σ_0	1.45×10^{17} m ⁻²
S	55 Mpa
λ_{craze}	3

- ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แก้สมการอนุพันธ์ในข้อ 1 โดยป้อนค่า v ให้โปรแกรม
- หาเวลาที่ใช้ในการแยก โดยเวลาที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัส สามารถหาได้จากการแทนค่าต่างๆลงในสมการอัตราการลดลงของจำนวนพันธะ เวลาที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัส (\bar{t}) จะมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง ϕ กับ t
- คำนวณหาพลังงาน ที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัส โดยนำค่า v ป้อนให้กับโปรแกรมและนำค่า \bar{t} ที่ได้จากข้อ 3 มาคำนวณ
- เปลี่ยนค่า v แล้วทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 2-4
- นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log G$ และ $\log v$ และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

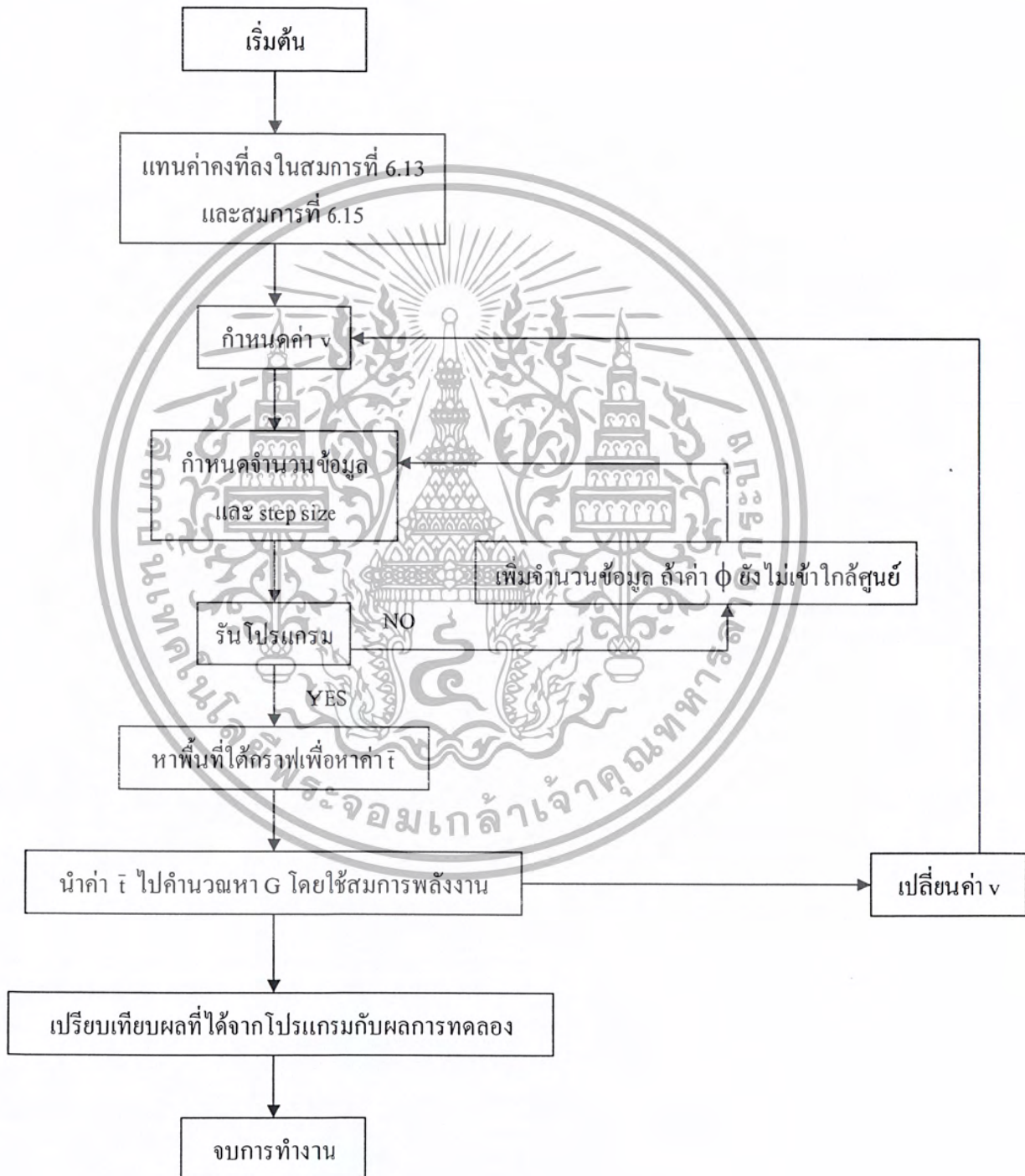
ส่วนที่ 2 เปลี่ยนค่าคงที่ต่างๆในสมการอัตราการลดลงของจำนวนพันธะ เพื่อศึกษาการแยกผิวสัมผัส ภายใต้สภาวะต่างๆ กัน

ในส่วนนี้ ขั้นตอนการคำนวณจะเหมือนกับส่วนที่ 1 แต่จะเปลี่ยนค่าคงที่ในสมการอัตราการลดลงของจำนวนพันธะเพื่อศึกษาถึงผลที่ได้ โดยค่าคงที่ที่จะเปลี่ยน คือค่า T , τ และ M



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนผังลำดับการทำงานในขั้นตอนการคำนวณในส่วนที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากขั้นตอนการคำนวณที่กล่าวมาแล้วสามารถนำมาประมวลผล โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โปรแกรมที่ได้นำมาใช้ในการประมวลผลสำหรับโครงการนี้ คือ โปรแกรมคำนวณสำเร็จรูปพอลิแมท (Polymath) โปรแกรมคำนวณสำเร็จรูปเมทแลบ (Matlab) และโปรแกรมภาษาปาสคาล (Pascal)

โปรแกรมคำนวณสำเร็จรูป เป็นโปรแกรมที่สามารถนำมาใช้งานในด้านการคำนวณต่างๆ เช่น การคำนวณทางด้านการอินทิเกรต การแก้สมการอนุพันธ์ การประมาณค่า เป็นต้น ซึ่งจากประโยชน์ดังกล่าว จึงนำโปรแกรมคำนวณสำเร็จรูป มาใช้ในการประมวลผลสำหรับโครงการนี้ เพื่อแก้ระบบสมการอนุพันธ์ ที่เกิดจากแบบตัวอย่าง ซึ่งได้นำพื้นฐานทางด้านคณิตศาสตร์เคมีมาใช้ในการวิเคราะห์

อนึ่ง โปรแกรมสำเร็จรูปแม้ว่าจะมีความง่ายต่อการใช้งาน แต่ก็มีข้อเสีย คือผู้ใช้ไม่ทราบระบบการคำนวณ หรือวิธีการประมวลผล ที่อยู่ภายในโปรแกรมได้ ทำให้ไม่สามารถทราบว่าขีดความสามารถของโปรแกรมดังกล่าวอยู่ที่ระดับใด ดังนั้น จึงได้นำโปรแกรมภาษาปาสคาลมาเขียนโปรแกรมแก้สมการอนุพันธ์ เพื่อให้ผลที่ได้จากการแก้สมการอนุพันธ์ถูกต้องมากที่สุด

สำหรับรายละเอียดของโปรแกรมคำนวณสำเร็จรูปพอลิแมท โปรแกรมคำนวณสำเร็จรูปเมทแลบและโปรแกรมภาษาปาสคาลนั้น แสดงไว้ในภาคผนวก ข. ส่วนผลการประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แสดงเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 เปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมกับผลการทดลองจริง [7]

ตารางที่ 6.2 ผลการประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง
(ในน้ำ) แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด

ความเร็ว ในการแยก (m/s)	ค่า G ที่ได้จาก การทดลองจริง (ในน้ำ) (J/m ²)	ค่า G ที่ได้จากการประมวลผล ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ในน้ำ) (J/m ²)	เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด
9.97×10^{-7}	196	118	39.79
1.77×10^{-6}	294	294	0.00
2.73×10^{-6}	457	497	8.75
3.89×10^{-6}	621	674	8.53
5.02×10^{-6}	784	786	0.25
6.14×10^{-6}	947	860	9.19
9.00×10^{-6}	1111	1009	9.18
2.77×10^{-5}	1274	1246	2.20
4.16×10^{-5}	1437	1288	10.37
8.28×10^{-5}	1601	1352	15.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 ผลการประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง (ในอากาศ) แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด

ความเร็ว ในการแยกผิวสัมผัส (m/s)	ค่า G ที่ได้จาก การทดลองจริง (ในอากาศ) (J/m ²)	ค่า G ที่ได้จากการประมวลผล ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ในอากาศ) (J/m ²)	เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด
8.23×10^{-7}	1111	1286	15.75
2.41×10^{-6}	1274	1309	2.75
1.02×10^{-5}	1437	1345	6.40
1.99×10^{-5}	1601	1362	14.93
9.94×10^{-5}	1764	1401	20.58
3.35×10^{-4}	1927	1429	25.84

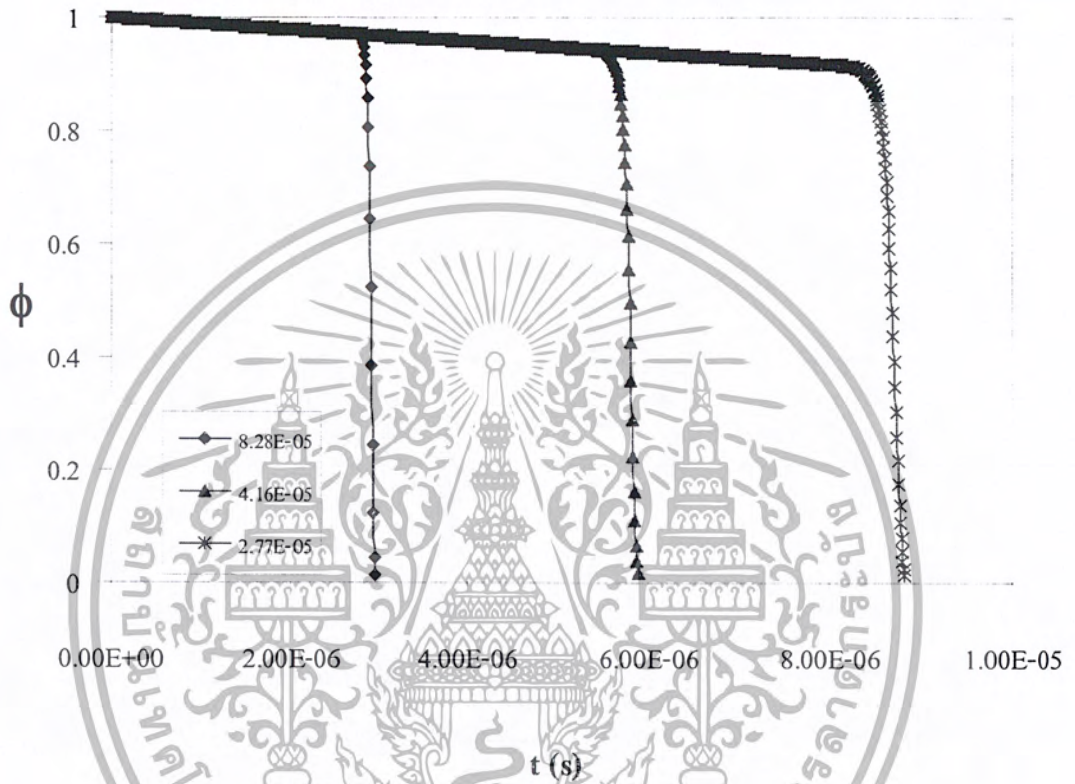
จากนั้น นำค่าที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาเขียนกราฟแสดง ความสัมพันธ์ในแบบต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพัชนะและเวลาที่ความเร็วในการแยกผิวสัมผัส 8.28×10^{-5} เมตรต่อวินาที

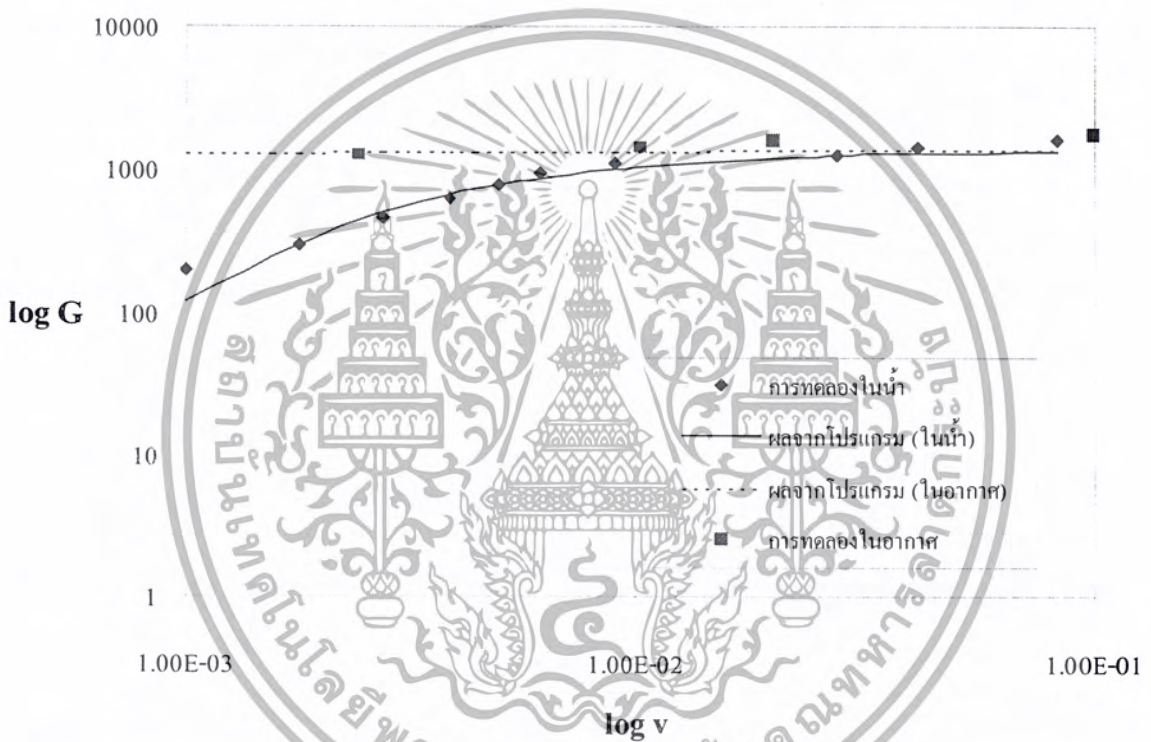
จากรูปที่ 6.4 พบว่า ในช่วงเวลาแรกๆ จำนวนพัชนะจะลดลงทันที จนถึงเวลาหนึ่งจำนวนพัชนะจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากพัชนะที่เหลืออยู่ไม่สามารถทนต่อแรงดึงได้ จึงทำให้พัชนะที่เหลืออยู่ทั้งหมดถูกทำลายอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนขั้นกับเวลาที่ความเร็วในการแยกตัวสัมพันธ์ต่างๆ กัน

จากรูปที่ 6.5 พบว่า เมื่อความเร็วในการแยกตัวสัมพันธ์มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้เวลาที่ใช้ในการแยกตัวสัมพันธ์ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงานและความเร็วที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัส โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากโปรแกรมกับค่าจากการทดลอง

จากรูปที่ 6.6 พบว่า ค่าที่ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง ทั้งในน้ำและในอากาศ

ค่า τ ที่ทำให้ผลของการจำลองแบบมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง ในกรณีของการแยกผิวสัมผัสในน้ำมีค่าเท่ากับ 15 ms เมื่อเปรียบเทียบกับค่า τ ที่ใช้ในกรณีของการแยกผิวสัมผัสในอากาศ ซึ่งค่า τ มีค่าเป็นอนันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

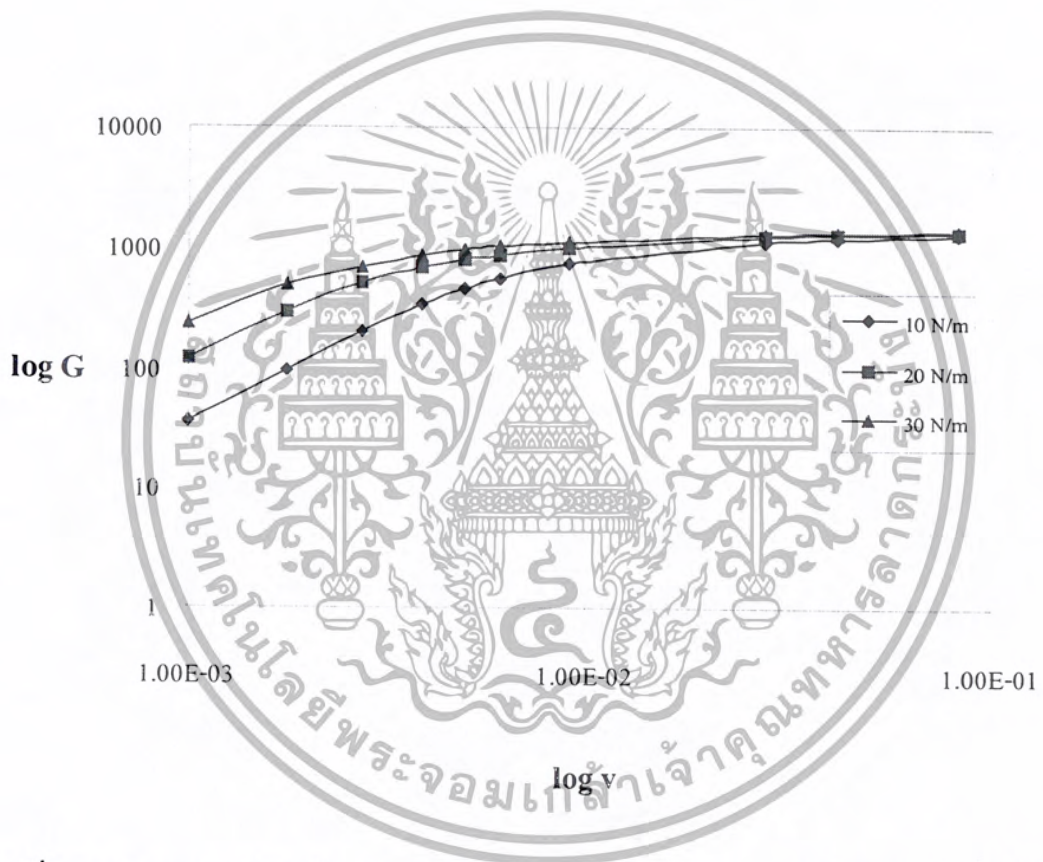
ส่วนที่ 2 เปลี่ยนค่าคงที่ต่างๆ ในสมการอัตราการลดลงของจำนวนพันธะ เพื่อศึกษาการแยกผิวสัมผัส ภายใต้สภาวะต่างๆ กัน



รูปที่ 6.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงานและความเร็ว ที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัส ที่ค่า τ ต่างๆ กัน

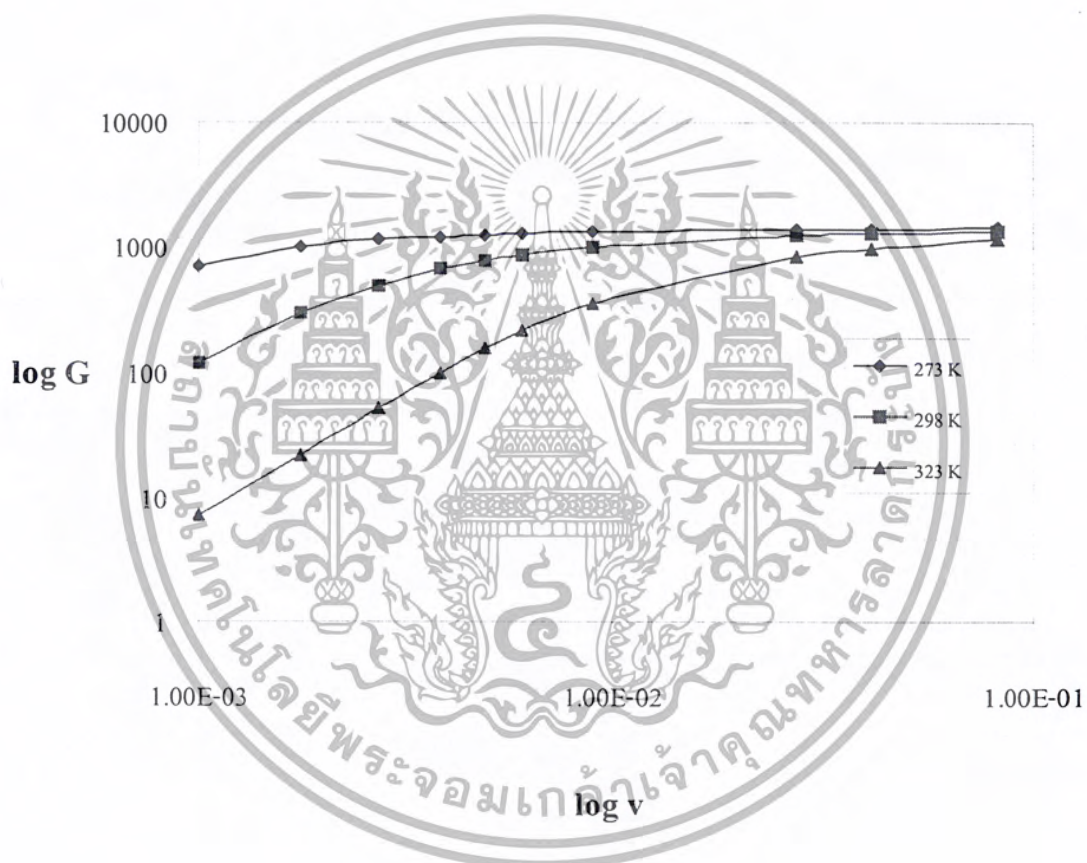
จากรูปที่ 6.7 พบว่า ที่ความเร็วในการแยกผิวสัมผัสเดียวกัน เมื่อเพิ่มค่า τ ให้สูงขึ้น พลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพันธะที่เป็นแคชพอที่มีความยืดหยุ่นสูงขึ้น สามารถทนต่อแรงดึงที่มีค่ามากได้ ทำให้พันธะที่ผิวสัมผัสแข็งแรงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงานและความเร็วที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัส ที่ค่าคงที่ของสปริงต่างๆ กัน

จากรูปที่ 6.8 พบว่า ที่ความเร็วในการแยกผิวสัมผัสเดียวกัน เมื่อเพิ่มค่า M ให้สูงขึ้น พลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพันธะที่เป็นสปริงในสายโซ่พอลิเมอร์มีความแข็งแรงมากขึ้นสามารถทนต่อแรงดึงที่มีค่ามากได้ จึงทำให้พันธะในสายโซ่พอลิเมอร์แข็งแรงขึ้น



รูปที่ 6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงานและความเร็ว ที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัส ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 6.9 พบว่า ที่ความเร็วในการแยกผิวสัมผัสเดียวกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น พลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสจะมีค่าลดลง เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้รับพลังงานจากการเพิ่มอุณหภูมิ พลังงานสะสมจึงเพิ่มขึ้น ทำให้ใช้พลังงานในการแยกน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
สรุปผลและวิเคราะห์

ส่วนการทดลอง

1. การวิเคราะห์สภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียม

- 1.1 แผ่นอลูมิเนียมที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว ปรับสภาพผิวโดยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโคเดคซิลซัลเฟต ที่อุณหภูมิ 29°C และปรับสภาพผิวโดยวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 58°C พบว่า สภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิว โดยวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริกที่อุณหภูมิ 58°C มีความขรุขระเกิดบนผิวหน้าของแผ่นอลูมิเนียม เช่นเดียวกับสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวโดยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโคเดคซิลซัลเฟต ที่อุณหภูมิ 29°C ส่วนสภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว ไม่สังเกตเห็นความขรุขระบนผิวหน้าของแผ่นอลูมิเนียม
- 1.2 แผ่นอลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวโดยวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 29°C , 58°C และ 70°C พบว่า สภาพพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมที่ปรับสภาพผิวโดยวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 58°C และ 70°C มีความขรุขระและโครงสร้างออกไซด์ปรากฏให้เห็น แต่ไม่ชัดเจนนัก โดยที่ อุณหภูมิ 70°C สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนกว่า ส่วนที่อุณหภูมิ 29°C ไม่สังเกตเห็นความขรุขระ หรือโครงสร้างออกไซด์เกิดขึ้นบนผิวหน้าของแผ่นอลูมิเนียม

2. การทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน

- 2.1 ชิ้นงานที่แผ่นอลูมิเนียมไม่ได้ปรับสภาพผิว ปรับสภาพผิวโดยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโคเดคซิลซัลเฟต ที่อุณหภูมิ 29°C และปรับสภาพผิวโดยวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 58°C พบว่า ชิ้นงานที่แผ่นอลูมิเนียมปรับสภาพผิวโดยวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก ที่อุณหภูมิ 58°C มีความแข็งแรงของการยึดเกาะกันสูงที่สุด รองลงมา คือ ชิ้นงานที่แผ่นอลูมิเนียมปรับสภาพผิวโดยวิธีการล้างด้วยสารละลายโซเดียมโคเดคซิลซัลเฟต ที่อุณหภูมิ 29°C และชิ้นงานที่แผ่นอลูมิเนียมที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว ตามลำดับ
- 2.2 ชิ้นงานที่แผ่นอลูมิเนียม ปรับสภาพผิวโดยวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริก ที่ อุณหภูมิ 29°C , 58°C และ 70°C พบว่า ชิ้นงานที่แผ่นอลูมิเนียมปรับสภาพผิวโดยวิธีการกัดด้วยสารละลายกรดโครมิกซัลฟูริกที่อุณหภูมิ 29°C และ 58°C มีความแข็งแรงของการยึดเกาะใกล้เคียงกัน ส่วนชิ้นงานที่แผ่นอลูมิเนียมปรับสภาพผิวที่อุณหภูมิ 70°C มีความแข็งแรงของการยึดเกาะกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยที่สุด สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากพื้นผิวที่มีความขรุขระมาก พื้นที่ผิวสัมผัสจะมากขึ้นด้วย จึงทำให้การยึดเกาะกันดีขึ้น จากการทดลอง พบว่าการเกิดความขรุขระ หรือ โครงสร้างของออกไซด์ บนผิวหน้าของแผ่นอลูมิเนียม ทำให้ค่าความแข็งแรงของการยึดเกาะกันระหว่างอีพอกซีกับแผ่นอลูมิเนียมมีค่าสูงขึ้นและจากการสังเกตด้วยตาเปล่า พบว่าการแยกออกจากกันเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างอีพอกซีกับแผ่นอลูมิเนียม

สาเหตุที่แรงหรือพลังงาน ซึ่งใช้แยกแผ่นอลูมิเนียมออกจากอีพอกซีมีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับค่าพลังงานของการยึดเกาะกันทางเทอร์โมไดนามิกส์นั้น เนื่องมาจากพลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไปกับการงอและการยึดแผ่นอลูมิเนียมที่มีความหนา นอกจากนี้ นี้ยังสูญเสียไปกับการยึดตัวของพอลิเมอร์อย่างถาวร โดย ภาพถ่ายสภาพพื้นผิวของพอลิस्टาไทริน ที่เกิดการยึดตัวจนเสียรูปร่างอย่างถาวร โดยใช้พลังงานในการแยกเท่ากับ 1120 จูลต่อตารางเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 7.1 [8]



รูปที่ 7.1 ภาพถ่ายสภาพพื้นผิวของพอลิस्टาไทรินที่เสียรูปร่างอย่างถาวร หลังจากแยกออกจากแผ่นอลูมิเนียม

3. วิจารณ์ผลการทดลอง

- 3.1 เนื่องจาก ไม่ได้ทำการทดลองในระบบปิด สารละลายบางส่วนได้ระเหยออกไป ทำให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ผลการทดลองที่ได้มีความผิดพลาด หรือคลาดเคลื่อน
- 3.2 ภาพถ่ายพื้นผิวของแผ่นอลูมิเนียมมีความชัดเจนไม่เพียงพอ อาจเนื่องมาจากไม่ได้ทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นอลูมิเนียม ก่อนที่จะนำไปถ่ายภาพ หรืออาจเกิดจากความสามารถของเครื่องมือที่ใช้ยังไม่สูงพอ
- 3.3 แรงดึง หรือพลังงาน ที่ใช้ในการแยกแผ่นอลูมิเนียมออกจากอีพอกซีมีค่าค่อนข้างสูง อาจเนื่องมาจากความหนาของแผ่นอลูมิเนียม หรืออาจเกิดจากคุณสมบัติการยึดเกาะที่ดีของพอลิเมอร์ที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการจำลองแบบ

จากผลการประมวลผล โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และนำไปเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ดังที่แสดงไว้ในบทที่ 6 สามารถสรุปผลได้ ดังนี้

1. ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพันธะกับเวลาที่ความเร็วต่างๆ กัน (รูปที่ 6.5)

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.5 เมื่อใช้ความเร็วในการแยกเพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการแยกจะลดลง

2. ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความเร็วที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัส เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากโปรแกรมกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง (ตารางที่ 6.2 , 6.3 และ รูปที่ 6.6)

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 6.2 , 6.3 และรูปที่ 6.6 ในกรณีผลของ โปรแกรม (ในน้ำ) เมื่อลดความเร็วในการแยกผิวสัมผัส ตั้งแต่ 8.28×10^{-7} เมตรต่อวินาที จนถึง 2.77×10^{-5} เมตรต่อวินาที พลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากปฏิกิริยาในการแยกส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาเซนซิซัน พลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสจะมีค่ามาก แต่เมื่อลดความเร็วตั้งแต่ 9.00×10^{-6} เมตรต่อวินาที จนถึง 9.97×10^{-7} เมตรต่อวินาที พลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสจะมีค่าลดลง เนื่องจากมีน้ำแพร่เข้าสู่ผิวสัมผัสทำให้ปฏิกิริยาในการแยกผิวสัมผัสส่วนใหญ่ เป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส พลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสจึงมีค่าลดลงกว่าปฏิกิริยาเซนซิซัน เพราะว่า พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมีค่าต่ำกว่า พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเซนซิซัน เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากโปรแกรมกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง พบว่า โปรแกรมให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง

ในกรณีผลของ โปรแกรม (ในอากาศ) เมื่อลดความเร็วในการแยกตั้งแต่ 8.28×10^{-5} เมตรต่อวินาที จนถึง 9.97×10^{-7} เมตรต่อวินาที ปฏิกิริยาในการแยกส่วนใหญ่จะเป็นปฏิกิริยาเซนซิซันและเมื่อเปรียบเทียบผล ที่ได้จากโปรแกรมกับผลที่ได้จากการทดลองจริง พบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน

3. ความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงานและความเร็วที่ใช้ในการแยก ที่ค่า τ ต่างๆ กัน (รูปที่ 6.7)

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.7 เมื่อปรับเปลี่ยนค่า τ ให้มีค่าลดลง การแยกจะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยค่า τ เป็นอัตราส่วนระหว่าง η กับ k ซึ่งคือเวลาที่ใช้ในการจัดเรียงตัวของโมเลกุล เพื่อให้พร้อมต่อการตอบสนองต่อแรงที่มากกระทำ ในกรณีที่ค่า τ ของโมเลกุลมีค่าต่ำ แสดงว่า เมื่อมีแรงมากกระทำต่อโมเลกุล โมเลกุลจะตอบสนองต่อแรงนั้นทันที โดยไม่มีการกระจายแรงไปยังส่วนอื่นทำให้การแยกเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัส ในทางตรงกันข้าม ถ้า τ มีค่ามากพันธะที่ผิวสัมผัสสามารถถ่ายโอนแรงที่มากกระทำไปยังพันธะในสายโซ่พอลิเมอร์ได้ ทำให้พันธะในสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแยกออกจากกัน หรือเรียกว่าเป็นการแยกที่เกิดจากปฏิกิริยาเซนซิซัน

หมายเหตุ หากปรับเปลี่ยนค่า τ ให้มีค่ามากขึ้นจนถึงค่าหนึ่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส จะไม่เกิดขึ้น เนื่องจกเวลาที่ใช้ในการจัดเรียงตัวของโมเลกุล เพื่อให้พร้อมต่อการตอบสนองต่อแรง ที่มากระทำมีค่ามากเกินไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาเซนซิซชันขึ้นมาแทน ซึ่งคือการแยกออกจากกัน ในอากาศ นั้นเอง

4. ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานและความเร็วที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัส ที่ค่าคงที่ของสปริงมีค่าต่างๆ กัน (รูปที่ 6.8)

จากรูปที่ 6.8 เมื่อพิจารณาความเร็ว ที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสเดียวกัน พบว่าค่า M ที่มากที่สุด จะใช้พลังงานในการแยกผิวสัมผัสสูงที่สุด เนื่องจากค่า M คือค่าคงที่ของสปริงในสายโซ่พอลิเมอร์ ดังนั้น ความแข็งแรงของผิวสัมผัสจึงแปรผันตรงกับค่าคงที่ของสปริง (M) ในสายโซ่พอลิเมอร์

5. ความสัมพันธ์ระหว่าง พลังงานและความเร็วที่ใช้ในการแยก ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน (รูปที่ 6.9)

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.9 เมื่อพิจารณาความเร็ว ที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสเดียวกัน พบว่า อุณหภูมิสูงที่สุดจะใช้พลังงานในการแยกน้อยที่สุด เนื่องจาก โมเลกุลของพอลิเมอร์ได้รับพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น จึงทำให้พลังงานที่ใช้ในการแยกผิวสัมผัสลดลง



บทที่ 8

ข้อเสนอแนะ

ในส่วนของการทดลอง

1. ควรศึกษาแรง หรือพลังงานที่สูญเสียไปในกรงอ หรือยึดแผ่นอลูมิเนียมที่มีความหนา หรือ ที่สูญเสียไปกับคุณสมบัติการยึดเกาะที่ดีของพอลิเมอร์ เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ใช้มีคุณสมบัติเป็นกาว
2. ควรเปลี่ยนไปใช้แผ่นอลูมิเนียม ที่มีความหนาน้อยลงและเปลี่ยนพอลิเมอร์เป็นชนิดที่ไม่มีคุณสมบัติเป็นกาว เพื่อลดพลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากการบิดงอของแผ่นอลูมิเนียม
3. ควรทำการทดลองในระบบปิด ในขั้นตอนการปรับสภาพผิวของแผ่นอลูมิเนียม เพราะมีสารละลายบางส่วนระเหยออกไป ทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น เป็นผลให้ผลการทดลองที่ได้อาจมีความผิดพลาด หรือคลาดเคลื่อน
4. ควรเพิ่มวิธีการปรับสภาพผิวของโลหะด้วยวิธีอื่นๆ เช่น วิธีการอะโนไดซ์ โดยใช้สารละลายกรดฟอสฟอริก เนื่องจากให้โครงสร้างของออกไซด์ ที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าวิธีที่ใช้ในโครงการนี้
5. ควรทำการทดลองการแยกออกจากกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะ ในสถานะที่มีน้ำ หรือ ความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ เพราะในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง การแยกออกจากกันระหว่างพอลิเมอร์กับโลหะจะมีน้ำ ความชื้นและความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย

ในส่วนของการจำลองแบบ

ควรทำการทดลองจริง เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลของการจำลองแบบ ว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่

เอกสารอ้างอิง

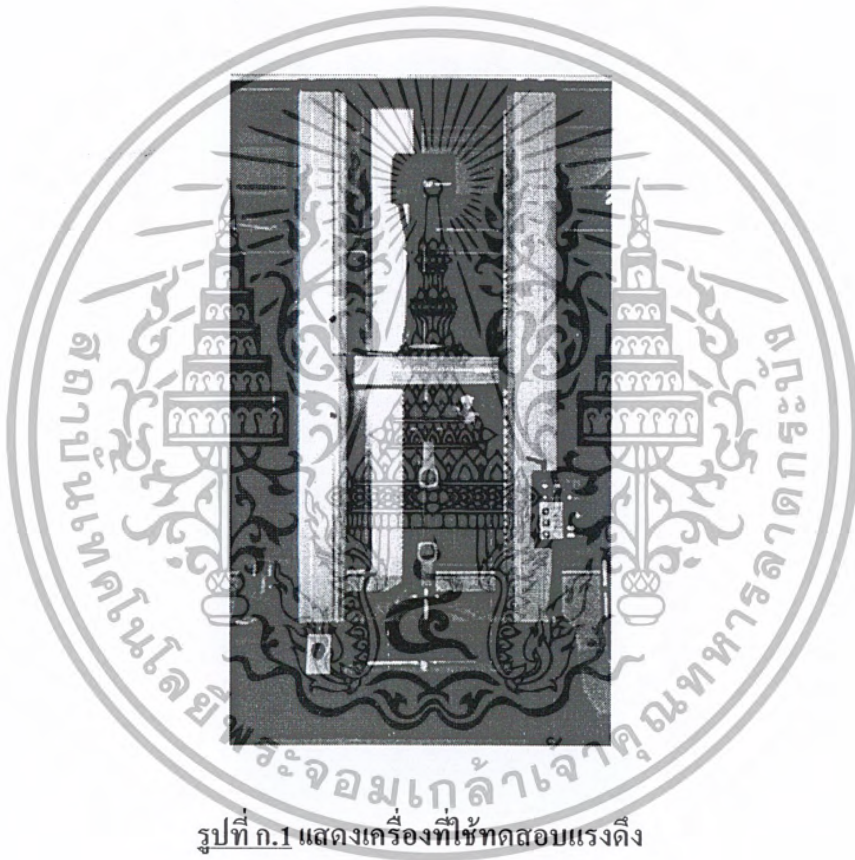
1. Y. Bunsanong, *Effect of Fibre Surface Treatment on the Interfacial Adhesion between Aramid Fibre and Thermoplastic Elastomer*. M.D. Thesis Mahidol University (2001).
2. G.A. Nitowski, *Topographic and Surface Chemical Aspects of the Adhesion of Structural Epoxy Resins to Phosphorus Oxoacid Treated Aluminum Adherends*. Ph.D. Thesis Virginia Polytechnic Institute and State University (1998).
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, *Silane Coupling Agents*. Plenum Press, New York (1982).
7. W. Brockmann, O.-D. Hennemann, H. Kollek and C. Matz, *Int. J. Adhesion Adhesives*. 115-143 (1996).
8. H.M. Clearfield, D.K. McNamara and G.D. Davis, *Adhesive Bonding*. Plenum Press, New York (1982).
9. K.L. Mittal, *Silane and Other Coupling Agents*. Utrecht (1992).
10. A. Namkanisorn, A. Ghatak, M.K. Chaudhury and D.H. Berry, A kinetic approach to study the hydrolytic stability of polymer – metal adhesion, *J. Adhesion Sci. Technol.* 1725-1745 (2001).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
แสดงเครื่องทดสอบแรงดึงและขณะทำการทดสอบ



รูปที่ ก.1 แสดงเครื่องที่ใช้ทดสอบแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.2 แสดงชิ้นงานขณะทดสอบแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
โปรแกรมคอมพิวเตอร์

แสดงรายละเอียดของโปรแกรมคำนวณสำเร็จรูปพอลิเมท โปรแกรมคำนวณสำเร็จรูปเมทแลบ และโปรแกรมภาษาปาสคาล

	Differential equations / explicit equations	Initial value
1	$d(\text{fee})/d(t) = o+r$	1
2	$a = k \cdot \text{temp} \cdot \text{fee}/h$	n.a.
3	$b = m \cdot v \cdot \text{lamda}$	n.a.
4	$c = m \cdot v \cdot s \cdot (1 - \exp(u)) \cdot \text{lamda}$	n.a.
5	$d = 2 \cdot \exp(u)$	n.a.
6	$g = (b+c)/(d)$	n.a.
7	$i = eb-g$	n.a.
8	$i = (-i)/(k \cdot \text{temp})$	n.a.
9	$i = \exp(i)$	n.a.
10	$o = -a \cdot i$	n.a.
11	$f = ec - (m \cdot v \cdot \text{lamda})$	n.a.
12	$p = (-f)/(k \cdot \text{temp})$	n.a.
13	$q = \exp(p)$	n.a.
14	$r = -(n \cdot a \cdot q)$	n.a.
15	$k = 1.380658E-23$	n.a.
16	$h = 6.6260755E-34$	n.a.
17	$\text{temp} = 298$	n.a.
18	$v = 1.77e-6$	n.a.
19	$m = 20$	n.a.
20	$\text{town} = 1e10$	n.a.
21	$\text{zigma} = 1.45E17$	n.a.
22	$\text{lamda} = 1E-10$	n.a.
23	$n = 300$	n.a.
24	$eb = 50000/(6.02E23)$	n.a.
25	$ec = 337000/(6.02E23)$	n.a.
26	$s = t \cdot \text{town}$	n.a.
27	$u = (-t)/(\text{town})$	n.a.
28	$gg = (\text{zigma} \cdot \text{zigma} \cdot m \cdot m \cdot v \cdot v \cdot t^2 \cdot (22/7)^{90E-10} \cdot 4.166666667 \cdot (1 - (1/3)))/(55E6)$	n.a.

รูปที่ ข.1 แสดงรายละเอียดของโปรแกรมคำนวณสำเร็จรูปพอลิเมท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดโปรแกรมสำเร็จรูปแมทแลบ

```
%show the relation between fee and t%
function dy = sol_ode(x,y)

%constants value%
M = 20;
n = 300;
l = 1*10^-10;
tt = 15*10^-3;
T = 298;
k = 1.3810*10^-23;
h = 6.63*10^-34;
v = 5.02*10^-6;

%equation 6.13%
a = k*T/h;
b = M*v*x;
c = M*v*(x-tt);
d = 1-exp(-x/tt);
e = 2-exp(-x/tt);
f = k*T;
g = (b+(c*d)/e)*l;
Ea1 = 50000/(6.02*10^23);
Ea2 = 337000/(6.02*10^23);
ii = (Ea1-g)/f;
jj = exp(-ii);
m = -(a*jj);
o = n*a;
p = b*l;
q = (Ea2-p)/f;
r = exp(-q);
s = -(o*r);
dy = (m+s)*y;

%command to run the program%
function command_m
[x,y]=ode15s('sol_ode',[0 4.5*10^-5],1);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดโปรแกรมภาษาปาสคาล

```

program RK4; {solve eq. 6.13}
label 100;
var ak1,ak2,ak3,ak4,size,t,tt,fee,feefee:double;
i,n:integer;
datafilet,datafilefee:text;

function func(t,fee:double):double; {eq. 6.13}
var k,temp,h,ea1,m,v,town,lamda,mer,ea2,a,b,c,d:double;
begin k := 1.38E-23;
temp := 298;
h := 6.63E-34;
ea1 := 50000/(6.02E23);
m := 20;
v := 8.28e-5; {m/s}
town := 0.015; {s}
lamda := 1E-10;
mer := 300;
ea2 := 337000/(6.02E23);
a := (-1)*k*temp/h;
b := m*v*lamda;
c := k*temp;
d := mer*a;
func := ((a*fee)*exp((((b*t)+(b*(t-town))
*(1-exp((-t)/town))))
/(2-exp((-t)/town))-ea1)/c)
+((d*fee)*exp(((b*t)-ea2)/c));
end;

begin writeln;
write('enter t = ');readln(t);
write('enter fee = ');readln(fee);
write('enter number of steps = ');readln(n);
write('enter step size = ');readln(size);
writeln(' solution with step size = ',size:10,'is: ');
writeln(' t', ' fee', ' i');
writeln(' ',t : 13,' ', fee : 13);
assign(datafilet,'t.txt');
assign(datafilefee,'fee.txt');
rewrite(datafilet);
rewrite(datafilefee);
writeln(datafilet,t);
writeln(datafilefee,fee);

for i := 1 to n do
begin ak1 := func(t,fee);
tt := t + size/2;
feefee := fee + size*ak1/2;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ak2      := func(tt,feefee);
feefee   := fee + size*ak2/2;
ak3      := func(tt,feefee);
tt       := t+size;
feefee   := fee + size*ak3;
ak4      := func(tt,feefee);
fee      := fee + (ak1 + 2*ak2 + 2*ak3 + ak4)*size/6;
t        := t+size;
writeln('      ',t : 13,'      ', fee : 13,'      ',i+1);
if fee <= 1e-2 then goto 100;
writeln(datafilet,t);
writeln(datafilefee,fee);
end;
100 : close(datafilet);
close(datafilefee);
end.

```

63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

program qw; {calculate area}
var
  datafilet,datafilefee:text;
  t:array[1..4000] of double;
  fee:array[1..4000] of double;
  i,n:integer;
  m,sum,v,a,b,g,area,zigma:double;

begin
  writeln;
  write('enter number of data = ');readln(n);
  write('enter v = ');readln(v);
  assign(datafilet,'t.txt');
  assign(datafilefee,'fee.txt');
  reset(datafilet);
  reset(datafilefee);
  for i:=1 to n do
  begin readln(datafilet,t[i]);
        readln(datafilefee,fee[i]);
  end;
  sum := 0;
  for i:=1 to n-1 do
  begin area := (t[i+1]-t[i])*(fee[i+1]+fee[i])/2;
        sum := sum+area;
  end;
  write('t avg = ',sum);writeln;

  {calculate G}
  a := sqrt(1/0.0576);
  b := 1-(1/3);
  zigma := 1.45E17;
  m := 20;
  g := (zigma*zigma*m*m*v*sum*v*sum*2*(22/7)*90E-10*a*b)
      /(55E6);
  write('G = ',g);
  writeln;
end.

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้