

การศึกษาความต้านทานต่อการลอกออกของแผ่นโพลียูรีเทน
กับซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เมื่อใช้สารไพโรเมอร์ที่พัฒนาขึ้นใหม่



นาย นิยม ชำรงค้อนันต์สกุล

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์

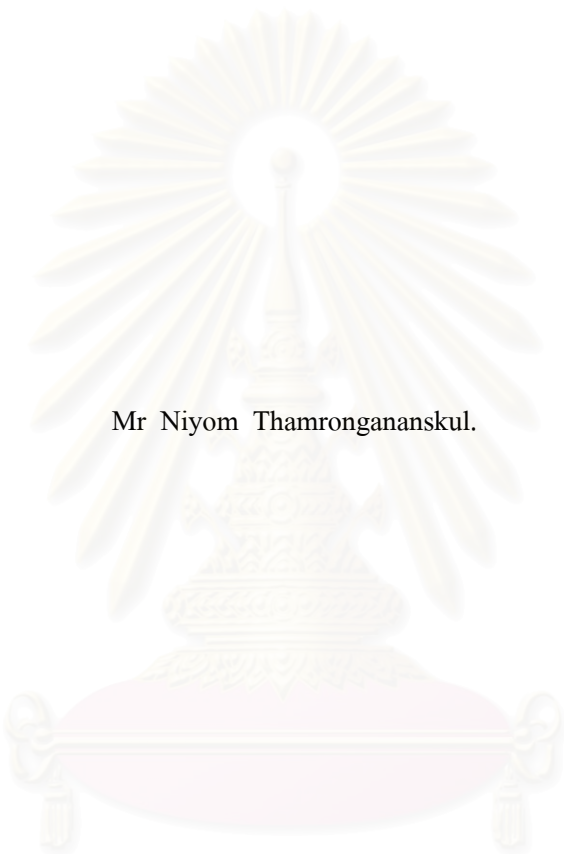
คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-336-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE STUDY OF PEEL STRENGTH OF POLYURETHANE BONDED WITH
SILICONE ELASTOMER WHEN USING NEWLY DEVELOPED PRIMER.



Mr Niyom Thamrongananskul.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Prosthodontics.

Department of Prosthodontics.

Faculty of Dentistry.

Chulalongkorn University.

Academic year 2000.

ISBN 974-346-336-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาความต้านทานต่อการลอกออกของแผ่นโพลียูรีเทนกับ
ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เมื่อใช้สารไพโรเมอร์ที่พัฒนาขึ้นใหม่
โดย นาย นิยม ชำรงค์อนันต์สกุล
ภาควิชา ทันตกรรมประดิษฐ์
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ปิยวัฒน์ พันธุ์โกศล

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์
ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... คณบดีคณะทันตแพทยศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ สุรสิทธิ์ เกียรติพงษ์สาร)

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง ราไพ โรจนกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ปิยวัฒน์ พันธุ์โกศล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร. ไพฑูรย์ สัจจรินทะ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร. มโน ภูรัตน์)

นิยม ชำรงค่อนันต์สกุล : การศึกษาความต้านทานต่อการลอกออกของแผ่นโพลียูรีเทน กับซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เมื่อใช้สารไพรเมอร์ที่พัฒนาขึ้นใหม่ (The study of peel strength of polyurethane bonded with silicone elastomer when using newly developed primer) อาจารย์ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ปิยวัฒน์ พันธุ์โกศล; 63 หน้า. ISBN 974-346-336-4

งานวิจัยครั้งนี้ต้องการศึกษาความต้านทานต่อการลอกออกของแผ่นโพลียูรีเทน กับ ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เมื่อใช้สารไพรเมอร์ที่พัฒนาขึ้นใหม่ โดยการทดสอบได้เตรียมขึ้นทดสอบตามแบบมาตรฐาน เอเอสทีเอ็ม ดี 1876-72 และแบ่งกลุ่มทดสอบออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มละ 30 ชิ้น โดยกลุ่มควบคุมใช้สารเชื่อมเป็น ไพรเมอร์ 1205 ส่วนกลุ่มทดสอบที่เหลือ 2 กลุ่มใช้สารเชื่อมเป็น ไรพอกซี และ ไรพอกซีที่ละลายในสารละลายโทลูอินในอัตราส่วนปริมาตรสองต่อหนึ่ง ทดสอบแรงดึง โดยใช้เครื่องวัด ลอยด์ รูน แอลอาร์ 10 เค ได้ค่าแรงดึงเฉลี่ย และเปรียบเทียบผลทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่าค่าแรงดึงที่ทำให้เกิดการลอกออกของแผ่นโพลียูรีเทนออกจากชั้นซิลิโคน ของกลุ่มทดสอบทั้ง 3 กลุ่ม มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) จึงสรุปได้ว่า ไรพอกซีที่ละลายในสารละลายโทลูอิน ในอัตราส่วนปริมาตรสองต่อหนึ่งซึ่งเป็นสารที่พัฒนาขึ้นใหม่ สามารถที่จะใช้เป็นสารเชื่อมระหว่างแผ่นโพลียูรีเทน กับซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ได้

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....ทันตกรรมประดิษฐ์.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....

4176104432: MAJOR PROSTHODONTICS

KEYWORD: PELL / POLYURETHANE / PRIMER / RIPOXY / SILICONE ELASTOMER / STRENGTH

NIYOM THAMRONGANANSKUL : THE STUDY OF PEEL STRENGTH OF POLYURETHANE BONDED WITH SILICONE ELASTOMER WHEN USING NEWLY DEVELOPED PRIMER. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. PIYAWAT PHANKOSOL, MS. 63 pp. ISBN 974-346-336-4

The purpose of this study was to determine the peel strength of polyurethane bonded with silicone elastomer when using newly developed primer. Ninety specimens were prepared according to ASTM D 1876-72 and were divided into 3 groups (each group had 30 specimens). In the control group, polyurethane sheets were treated with primer 1205. In the other 2 experimental groups, polyurethane sheets were treated with Ripoxy and Ripoxy dissolved in toluene (2:1), respectively. Lloyd universal testing machine was used for measuring T- peel strength. The data were collected and analyzed statistically by one way analysis of variance at 95 % confident level. The results showed that there was no statistical difference among the peel strength of all 3 groups ($p > 0.05$). It was concluded that both Ripoxy and Ripoxy dissolved in toluene (2:1) can be used as primer for bonding polyurethane sheet with silicone elastomer.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....

Student's signature.....

Field of study.....

Advisor's signature.....

Academic year.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ปิยวัฒน์ พันธุ์โกศล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความกรุณาช่วยเหลือดูแล ให้คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยครั้งนี้จาก ดร.สนอง เอกสิทธิ์ อาจารย์คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้กรุณาวิเคราะห์สารเคมีด้วยวิธีการ FTIR และแปลผลให้ เจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัย และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยชีววิทยาช่องปาก ที่กรุณาเอื้ออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆ ผู้วิจัยจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณและขอขอบคุณทุกท่าน ตลอดจนผู้ที่มีส่วนช่วยเหลือทุกท่านที่ได้กล่าวไว้ในที่นี้ และเนื่องด้วยทุนการวิจัยครั้งนี้ ได้รับการสนับสนุนจากการอุดหนุนการวิจัยคณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 คำถามของการวิจัย สมมติฐานการวิจัย	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 รูปแบบการวิจัย.....	3
2. การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ซิลิโคน โพลีเมอร์.....	10
2.2 อาร์ทีวี ซิลิโคน.....	19
2.3 โพลียูรีเทน.....	21
2.4 อีพอกซี เรซิน.....	24
2.5 โฟเรียร์ ทรานฟอรั่ม อินฟราเรด สเปคโตรมิเตอร์.....	25
3. ระเบียบการวิจัย	27
3.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง	27
3.2 วิธีการขึ้นรูปแผ่นโพลียูรีเทน.....	31
3.3 วิธีการตัดชิ้นทดสอบ.....	35
4. ผลการทดลอง	38
5. อภิปรายผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ และสรุปผลการทดลอง.....	53
5.1 อภิปรายผลการทดลอง.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	57
5.3 สรุปผลการทดลอง.....	58

รายการอ้างอิง.....	59
ประวัติผู้วิจัย.....	63



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1	ภาพแผ่นพลาสติกที่ใช้สำหรับเป็นแม่แบบในการทำเข้ายิปซัม.....	28
รูปที่ 2	ภาพการยึดแผ่นพลาสติกติดกับที่วัดระดับและวางอยู่ในภาชนะทองเหลือง.....	29
รูปที่ 3	ภาพภาชนะทองเหลืองรองส่วนฐานด้วยดินน้ำมันและวางอยู่บนเครื่องต้น.....	30
รูปที่ 4	ภาพการบ่มโพลียูรีเทนเหลวในตู้ควบคุมอุณหภูมิ.....	31
รูปที่ 5	ภาพโพลียูรีเทนที่บ่มตัวสมบูรณ์และติดด้วยแถบกาวยึดตามแนวกว้าง.....	32
รูปที่ 6	ภาพการทาสารเชื่อมลงบนแผ่นโพลียูรีเทน.....	34
รูปที่ 7	ภาพการฉีดซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ลงบนแผ่นโพลียูรีเทน.....	35
รูปที่ 8	ภาพชิ้นทดสอบที่มีขนาดตาม ASTM D1876-72	36
รูปที่ 9	ภาพการทดสอบหาความต้านทานต่อการลอกออกโดยใช้เครื่องวัดลดยึด.....	37
รูปที่ 10	กราฟแสดงสารไพรมเมอร์ 1205 เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR	39
รูปที่ 11	กราฟแสดงสารไรพอกซี เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR	40
รูปที่ 12	กราฟแสดงสารบ่มของไรพอกซี เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR	41
รูปที่ 13	ภาพกำลังขยายชิ้นส่วนของซิลิโคนที่ติดอยู่บนแผ่นโพลียูรีเทน.....	42
รูปที่ 14	ภาพกำลังขยาย 70 เท่าของแผ่นโพลียูรีเทน.....	43

- รูปที่15 กราฟแสดงแรงและระยะทางที่ใช้ในการลอกแผ่น โพลียูรีเทนออกจากชั้น
ซิลิโคนของกลุ่มที่ใช้สารเชื่อมเป็น ไพรเมอร์1205.....44
- รูปที่16 กราฟแสดงแรงและระยะทางที่ใช้ในการลอกแผ่น โพลียูรีเทนออกจากชั้น
ซิลิโคนของกลุ่มที่ใช้สารเชื่อมเป็น ไรพอกซี45
- รูปที่17 กราฟแสดงแรงและระยะทางที่ใช้ในการลอกแผ่น โพลียูรีเทนออกจากชั้น
ซิลิโคนของกลุ่มที่ใช้สารเชื่อมเป็น ไรพอกซีที่ละลายใน โทลูอิน 2 ต่อ 1 46
- รูปที่18 ภาพแสดงฟองอากาศที่เกิดในเนื้อแผ่น โพลียูรีเทนที่บ่มตัวสมบูรณ์แล้ว.....53
- รูปที่19 ภาพกำลังขยายฟองอากาศที่เกิดในเนื้อแผ่น โพลียูรีเทนที่บ่มตัวในเบ้ายิปซัม
ที่ไม่ได้ผ่านการอบ ณ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....54
- รูปที่20 ภาพกำลังขยายฟองอากาศที่เกิดในเนื้อแผ่น โพลียูรีเทนบริเวณขอบ
โดยรอบของเบ้ายิปซัม.....55

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่าแรงดึงสูงสุดและแรงดึงเฉลี่ย เมื่อใช้ไฟรเมอร์ 1205 เป็นสารยึด.....	48
ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่าแรงดึงสูงสุดและแรงดึงเฉลี่ย เมื่อใช้โรพอกซี เป็นสารยึด.....	49
ตารางที่ 3 ตารางแสดงค่าแรงดึงสูงสุดและแรงดึงเฉลี่ย เมื่อใช้โรพอกซี ที่ละลายในโทลูอิน (2 : 1) เป็นสารยึด.....	50
ตารางที่ 4 ตารางแสดง Test of Homogeneity of Variance	51
ตารางที่ 5 ตารางแสดง Kolmogorov - Smirnov Test.....	52
ตารางที่ 6 ตารางแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว	52

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ความพิการบนใบหน้า คือ การสูญเสียอวัยวะบางส่วนบนใบหน้าไป ทำให้ไม่สามารถดำรงชีวิตได้ตามปกติ เช่น ตาบอด ใบหูขาด จมูกแหว่ง หรือใบหน้าโหว่ เป็นต้น ความพิการบนใบหน้ามีสาเหตุมาจากหลายประการ อาทิเช่น อุบัติภัยซึ่งถือว่าเป็นสาเหตุหลัก รองลงมาได้แก่มะเร็ง และเนื้องอกต่างๆ การทะเลาะวิวาท ความพิการแต่กำเนิด ผู้ป่วยที่มีความพิการของใบหน้าต้องทนทุกข์ทรมาน และเกิดสภาวะหดหู่ทางจิตใจเป็นอย่างมาก จากสถิติของหน่วยบูรณะช่องปากและใบหน้า คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่ามีผู้ป่วยมาขอรับการรักษาเพิ่มขึ้นทุกปี อวัยวะเทียมจึงเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ผู้ป่วยจะได้รับ โดยที่หน่วยบูรณะช่องปากและใบหน้า คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประดิษฐ์อวัยวะเทียมจากซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ด้วยเหตุผลที่ว่า สามารถเข้าได้ดีกับผิวหนัง และร่างกายของมนุษย์ โดยไม่ก่อให้เกิดการระคายเคือง การอักเสบ สามารถตกแต่งสีให้เหมือนกับผิวหนังของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นการสัก ย้อม หรือทา และสียังคงทนถาวร ไม่เป็นสีน้ำตาลความร้อน และกระแสไฟฟ้า มีความยืดหยุ่นได้ดี และใกล้เคียงกับผิวของมนุษย์ สามารถทำความสะอาดได้ ไม่เป็นที่สะสมและเจริญเติบโตของเชื้อราและแบคทีเรีย ไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ เมื่อสัมผัสกับตัวทำละลาย

ถึงอย่างไรก็ตาม ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ยังมีข้อเสีย คือ ขอบโดยรอบของอวัยวะเทียมที่จะต้องทำเป็นแผ่นบางนั้นมักจะเกิดการฉีกขาดเสมอ และซิลิโคนมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ จึงไม่สามารถใช้กับกาวชนิดที่ละลายน้ำได้ ดังนั้น Udagama จึงแนะนำให้บูรณะของอวัยวะเทียมซิลิโคนด้วยแผ่นโพลียูรีเทน เนื่องจากโพลียูรีเทนสามารถทำให้บางได้โดยที่ยังคงมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง และยังสามารถใช้ได้กับกาวยึดชนิดที่ละลายน้ำได้ดี แต่เนื่องด้วยซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ และโพลียูรีเทนไม่สามารถเชื่อมยึดกันได้ดีโดยลำพัง ซึ่งจะต้องอาศัยสารไพรเมอร์เป็นตัวเชื่อม Wang และคณะ ทำการศึกษาแรงยึดระหว่าง ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ชนิด ไชลาสติก 891 กับแผ่นโพลียูรีเทน โดยใช้ไพรเมอร์ 2 ชนิด คือ 1205 และ เอส-2260 พบว่าไพรเมอร์ 1205 ให้ค่าแรงยึดที่ดีที่สุด จารูวรรณ และคณะ ทำการศึกษาค่าความต้านทานต่อการลอกของซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ชนิด ไตรอะซีทอกซีไซเลน กับแผ่นโพลียูรีเทน ที่ขึ้นรูปจากโพลียูรีเทนเหลว โดยใช้ไพรเมอร์ 3 ชนิด คือ 1205 เอส-2260 และ เอ-4040 พบว่าไพรเมอร์ 1205 ให้ค่าแรงยึดสูงสุด เนื่องจากไพรเมอร์ 1205 เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท ดาว คอร์ปิง ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีราคาแพง และ

อายุการเก็บรักษาค่อนข้างสั้น ขณะที่หน่วยบูรณะช่องปากและไบหน้า เป็นหน่วยงานที่ให้การรักษาแก่ผู้ป่วยที่มีความพิการ ซึ่งส่วนมากเป็นผู้ที่มีฐานะยากจน และด้อยโอกาสทางสังคม แต่ผู้ป่วยเหล่านี้จำเป็นต้องได้รับการรักษาโดยการใส่อวัยวะเทียม เพื่อให้สามารถดำรงชีวิตอยู่ในสังคมได้อย่างปกติสุข ดังนั้นหากสามารถพัฒนาสารเชื่อม โดยใช้สารเคมีที่มีจำหน่ายในประเทศไทยให้เป็นสารเชื่อมที่มีประสิทธิภาพทดแทนสารเชื่อมที่นำเข้าจากต่างประเทศ ก็จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ป่วยของประเทศต่อไป

วัสดุที่นิยมใช้เพื่อการประดิษฐ์อวัยวะเทียมในหน่วยบูรณะช่องปากและไบหน้า คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีอยู่ 2 ประเภทคือ ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ และโพลียูรีเทน

คำถามของการวิจัย

สารไพโรเมอร์ที่พัฒนาขึ้นใหม่สามารถยึดแผ่นโพลียูรีเทนเข้ากับซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ชนิดไดรอะซีทอกซีไซเลน

สมมุติฐานของการวิจัย

ค่าแรงต้านทานต่อการลอกออกของแผ่นโพลียูรีเทน กับ ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ชนิดไดรอะซีทอกซีไซเลน เมื่อใช้สารไพโรเมอร์ที่พัฒนาใหม่ ไม่แตกต่างจากการใช้สารไพโรเมอร์ 1205

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาสารไพโรเมอร์ที่ใช้เป็นสารเชื่อมระหว่างแผ่นโพลียูรีเทนกับซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ ชนิดไดรอะซีทอกซีไซเลน ให้มีค่าแรงต้านทานต่อการลอกออกเทียบเท่าสารไพโรเมอร์ 1205 ที่นำเข้าจากต่างประเทศ

ตัวแปรอิสระ

สารไพโรเมอร์ 2 ชนิด ที่แตกต่างกัน

ตัวแปรตาม

ค่าแรงต้านทานต่อการลอกออก

ขนาดตัวอย่าง

ชั้นทดสอบที่เกิดการเชื่อมยึดระหว่างแผ่นโพลียูรีเทนกับซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เมื่อใช้สารไพรเมอร์ 2 ชนิด ๆ ละ 30 ชิ้น

เกณฑ์การคัดเลือก

ชั้นทดสอบเป็นไปตามเกณฑ์ของ ASTM D 1876-72

เกณฑ์การปฏิเสธ

เกิดฟองอากาศในเนื้อของซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ หรือโพลียูรีเทน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาสารไพรเมอร์รุ่นใหม่ เพื่อใช้ในงานประดิษฐ์อวัยวะเทียม
2. ลดต้นทุนในการประดิษฐ์อวัยวะเทียม โดยไม่ต้องพึ่งพาสารไพรเมอร์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ
3. เป็นแนวทางในการพัฒนาสารไพรเมอร์ชนิดใหม่ๆ เพื่อใช้กับวัสดุอื่นๆ นอกเหนือจาก ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ หรือโพลียูรีเทน

รูปแบบการวิจัย

การวิจัยเชิงทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ปัญหาทางจริยธรรม

ไม่มี

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

อวัยวะเทียมเพื่อการบูรณะช่องปากใบหน้า (maxillofacial prostheses) เป็นสิ่งประดิษฐ์เพื่อทดแทนอวัยวะบริเวณ ศีรษะ ใบหน้า และภายในช่องปากที่บกพร่อง หรือสูญเสียไป อันเนื่องจากการผ่าตัด อุบัติเหตุ ภัยอันตราย หรือ ความผิดปกติที่มีมาแต่กำเนิด เพื่อให้ทำหน้าที่ได้เหมือนปกติและเพื่อความสวยงาม มีหลักฐาน¹⁻⁴ ยืนยันว่าอวัยวะเทียมเริ่มมีการประดิษฐ์ในสมัยอียิปต์จากการค้นพบลูกตาเทียม ใบหูเทียม จมูกเทียม บนซากศพมัมมี่ โดยอวัยวะเทียมเหล่านั้นทำด้วย ไม้ เงิน ทอง บรอนซ์ งาช้าง และหิน เป็นต้น ในชนชาติจีน และ อินคา ก็มีการหุดพบอวัยวะเทียมเช่นกัน โดยอวัยวะเทียมที่ค้นพบเป็นจมูกเทียม หูเทียม ที่ทำจากขี้ผึ้ง เรซินธรรมชาติ และโลหะ^{1,2}

เมื่อเข้าสู่ศตวรรษที่ 15 จึงได้เริ่มมีการจดบันทึกเกี่ยวกับการประดิษฐ์อวัยวะเทียมอย่างเป็นทางการเป็นเรื่องราว โดยศัลยแพทย์ชาวฝรั่งเศส Ambrose Pare^{1,3} ได้อธิบายถึงการใส่อวัยวะเทียมเพื่อทดแทนส่วนที่ขาด หายไป โดยไม่ต้องพึ่งศัลยแพทย์ เช่น ใบหูเทียมที่ทำจากกระดาษ หรือ หนังสัตว์ ซึ่งยึดด้วยสปริงที่โอบรอบศีรษะ หรือจมูกเทียมที่ทำจากโลหะเงิน และปกปิดรอยต่อด้วยหวดปลอม เป็นต้น Tycho Byabe^{1,3} นักดาราศาสตร์ชาวเดนมาร์ก ผู้ซึ่งสูญเสียจมูก ได้ประดิษฐ์จมูกเทียมเริ่มจากการสร้างแบบจำลองด้วยขี้ผึ้ง และ หล่อเป็นทองด้วยตนเอง ปี ค.ศ.1579 ที่เมืองเวนิซ ได้มีการประดิษฐ์ลูกตาเทียมที่ทำจากแก้ว จนถึง ค.ศ. 1940 ได้มีการผลิตลูกตาเทียมจากอะคริลิก เรซิน ซึ่งสามารถตกแต่งสีให้เหมือนกับลูกตาธรรมชาติ และ ได้รับความนิยมาจนถึงปัจจุบัน

Saunders^{2,3} ได้ประดิษฐ์หน้าเทียมให้กับ Alphonse ซึ่งเป็นทหารชาวฝรั่งเศส ผู้มีความพิการของใบหน้ารวมทั้งกระดูกขากรรไกรบน และล่างด้านซ้าย โดยใบหน้าเทียมประดิษฐ์จากโลหะเงินที่เคลือบทับด้วยสีน้ำมันประกอบด้วย คาง ซี่ฟัน กระพุ้งแก้ม และบ่อเก็บน้ำลาย จากอวัยวะเทียมดังกล่าวจึงเป็นที่มาของสมญานามที่ว่า “Gunner with the Silver Mask”¹⁻⁴ อวัยวะเทียมที่ประดิษฐ์ด้วยโลหะมีข้อเสียหลายประการ คือ น้ำหนักมาก เป็นสื่อนำกระแสไฟฟ้า สีทึบ และขาดความสวยงาม

Goodyear¹ ได้ค้นพบการบ่มยางพาราด้วยกำมะถัน (vulcanized rubber) ซึ่งต่อมาได้มีการนำมาผลิตเป็นฐานฟันปลอมและอวัยวะเทียมนอกช่องปาก แต่มีข้อเสียคือ ไม้ยืดหยุ่น ทึบแสง สีไม่คงทน จึงเลิกใช้ไปในที่สุด ปี ค.ศ.1894 Tetamore¹ ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์อวัยวะเทียมจาก เซลลูโลส ไนเตรต (cellulose nitrate) ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ระคายเคืองต่อผิวหนัง น้ำหนักเบา สีใกล้เคียงกับผิวหนัง แต่มีข้อเสียคือ มีการดูดน้ำ ดูดเหงื่อสูง และสีไม่คงทน (เซลลูโลส ไนเตรต ถูกพัฒนาขึ้น โดย John Wesley Hyatt ในปี ค.ศ.1868 เพื่อทดแทนลูกบิลเลียด ซึ่งแต่เดิมทำจากงาช้าง) ปี ค.ศ.1913 ถึง ปี ค.ศ.1915 กลุ่มนักวิจัยชาวฝรั่งเศส และเยอรมันนี้ ได้เสนอวัสดุ

ประเภท เจลาติน กลีเซอริน (gelatin glycerin) เพื่อใช้ทำอวัยวะเทียม ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น และโปร่งแสงแต่มีข้อเสียคือ อายุการใช้งานค่อนข้างสั้นจึงทำให้วัสดุชนิดนี้ไม่ได้รับความนิยม

ปี ค.ศ.1936⁵ ได้เริ่มมีการนำเอาโพลีเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) มาใช้ในงานทำฐานฟันปลอม และอวัยวะเทียม เนื่องจากวัสดุประเภทนี้สามารถแต่งสีให้คล้ายผิวหนังมนุษย์ได้² และปี ค.ศ. 1940 วัสดุจำพวกพลาสติกที่มีความยืดหยุ่นได้ถูกนำมาใช้ประดิษฐ์เป็นอวัยวะเทียมซึ่งมีชื่อทางการค้าต่างๆเช่น ไดคอร (Dicor) สกยูเทกซ์ (Skutex) เฟลซิดเอร์ม (Flexiderm) Tylman¹ และนำไปใช้ อะคริลิกชนิดนุ่ม (plasticized acrylic) ในการประดิษฐ์อวัยวะเทียม เพราะมีความยืดหยุ่น และแนบกับเนื้อเยื่อมนุษย์ดีกว่า อะคริลิกเรซิน ชนิดธรรมดา Clarke⁶ ได้อธิบายวิธีการประดิษฐ์อวัยวะเทียมจากวัสดุจำพวก ขางธรรมชาติ เจลาติน กลีเซอริน และโลหะชุบ (electroplated metals) ซึ่งต่อมามีกลุ่มบุคคลต่างๆได้นำเสนอวัสดุประเภทต่างๆ เพื่อใช้ประดิษฐ์อวัยวะเทียม อาทิเช่น ไวนิลพลาสติกซอล (vinyl plastisol) โพลีไวนิล คลอไรด์ (polyvinyl chloride) โพลียูรีเทน (polyurethane) และ ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์

ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ถูกแนะนำเพื่อใช้ประดิษฐ์อวัยวะเทียมครั้งแรกโดย Barnhart⁷ และได้รับความนิยมมาจนถึงปัจจุบัน อันเนื่องจากซิลิโคน อีลาสโตเมอร์มีคุณสมบัติที่ดี เช่น เนื้อเยื่อต่อสารเคมี มีความแข็งแรง (strength) คงทน และวิธีการขึ้นรูปไม่ยุ่งยากซับซ้อน นับตั้งแต่เริ่มมีการประดิษฐ์อวัยวะเทียมจนถึงปี ค.ศ.1945 วัสดุชนิดต่างๆที่นำมาใช้งานทางด้านนี้เป็นเพียงแต่การลองผิดลองถูกเท่านั้น ขาดการกำหนดคุณสมบัติที่พึงประสงค์ ดังนั้น Bulbulian⁸ จึงได้กำหนดตารางคุณสมบัติอันพึงประสงค์ของวัสดุที่ใช้ประดิษฐ์อวัยวะเทียมเป็นครั้งแรก และได้เพิ่มเติมรายละเอียดให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นในปีถัดมา ซึ่งทำให้มีการตีพิมพ์บทความเกี่ยวกับคุณสมบัติอันพึงประสงค์ของวัสดุที่ใช้ทำอวัยวะเทียมอีกหลายฉบับตามมา⁹⁻¹²

Lewis และคณะ¹¹ ได้จำแนกคุณสมบัติอันพึงประสงค์ออกเป็น 3 หมวดหมู่ คือ คุณสมบัติที่ต้องการสำหรับขบวนการผลิต ได้แก่ ความหนืดต่ำ มีระยะเวลาการทำงาน (working time) ที่เหมาะสม สามารถซ่อมสีได้ทั้งภายในและภายนอก อุณหภูมิที่ใช้บ่มตัวไม่สูงเกินไป แบบหล่อหรือแม่พิมพ์สามารถนำมาใช้ซ้ำได้อีก คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ได้แก่ กำลังแรงดึงสูง เปรอร์เซ็นต์การยืดตัวสูง ความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง มีมิติเสถียรภาพ ทนต่อสารเคมีและแสงอุลตราไวโอเลตและคุณสมบัติข้อสุดท้ายคือ เมื่อใช้กับผู้ป่วยแล้วจะต้องไม่เป็นพิษ ไม่ทำให้เกิดการแพ้ ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง ล้างทำความสะอาดง่าย น้ำหนักเบา ใช้ได้ง่ายกับกาวที่ติดผิวหนัง ราคาไม่แพง

Canter และคณะ¹³ กล่าวว่าไว้ว่าความก้าวหน้าของงานบูรณะช่องปากและใบหน้าได้พัฒนาไปในเชิงศิลปะ โดยไม่เกี่ยวกับขบวนการทางวิทยาศาสตร์ใดๆ ที่นำมาใช้ประเมินคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ในงานด้านนี้เลย ดังนั้น Canter และคณะจึงได้ทำการศึกษา โดยวัดความคงทนของสีและ มิติเสถียรภาพของอีลาสโตเมอร์ 3 ชนิด ซึ่งการวัดคุณสมบัติของวัสดุ อีลาสโตเมอร์ครั้งนี้ถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ประดิษฐ์อวัยวะเทียม และแนวทางการปฏิบัติของ Canter ส่งผลให้ Sweeney และคณะ⁹ ได้พัฒนาระบบการทดสอบวัสดุ อันประกอบด้วย ค่ากำลังแรงดึง ความแข็งผิว ความยืดหยุ่น จากการทดสอบนี้ทำให้ได้ค่าออกมาเป็นช่วง (rang) นอกจากนี้ Sweeney และคณะ เป็นกลุ่มบุคคลกลุ่มแรกที่ศึกษาคูณสมบัติของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากที่วัสดุนั้นๆ ผ่านสภาวะแวดล้อมของอากาศจำลอง (artificial weathering environment)

Lontz และคณะ¹⁴ ทดสอบค่าความยืดหยุ่นของ อีลาสโตเมอร์ที่ใช้ประดิษฐ์อวัยวะเทียม โดยเปรียบเทียบกับความยืดหยุ่นของเส้นเลือดแดงใหญ่ กล้ามเนื้อและเอ็น (tendon) Koran และ Craig¹⁵ ศึกษาคุณสมบัติของ พลาสติไซส์ โพลีไวนิล คลอไรด์ (plasticized polyvinyl chloride) ในเชิงพลวัต (dynamic) ด้วยเครื่อง Goodyear vibrotester โดยให้เหตุผลว่าการทดสอบในเชิงพลวัต มีข้อดีกว่า การทดสอบแบบเชิงสถิต (static) เพราะอวัยวะเทียมนั้นไม่ได้นิ่งอยู่กับที่แต่มีการเคลื่อนไหวไปตามเนื้อเยื่อบริเวณนั้นๆ ด้วย

Firtell และคณะ¹⁶ ได้พยายามปรับปรุงคุณสมบัติของ ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ชนิดปมที่อุณหภูมิห้อง (RTV) โดยการผสมด้วย ซิลิโคน โฟม (silicone foam) เพื่อลดน้ำหนักของชิ้นอวัยวะเทียม พบว่า ซิลิโคน โฟม ทำให้ชิ้นทดสอบมีน้ำหนักเบาขึ้น แต่ความต้านทานต่อการฉีกขาด กลับลดลง Moore และคณะ¹⁷ แนะนำการเตรียมชิ้นทดสอบ ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เป็นรูปห่วง (O-ring) เพื่อทดสอบกลสมบัติ โดยกล่าวว่าการเตรียมชิ้นทดสอบที่เป็นแผ่นบางๆ แล้วใช้มีดกรีดตรงกลางแผ่นคล้ายรูปกางเกง ซึ่งการกระทำดังกล่าวเป็นการก่อให้เกิดรอยแยกเล็กๆ ซึ่งอาจจะเป็นข้อผิดพลาดของการวัดค่ากลสมบัติก็ได้

Gonzales และคณะ^{18,19} รวมทั้ง Goldberg และคณะ²⁰ ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของโพลียูรีเทน โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนต่างๆ พบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของโพลียูรีเทนทำให้ค่าความยืดหยุ่น และความแข็งผิวเปลี่ยนแปลงไปโดยพยายามให้มีค่าดังกล่าวใกล้เคียงกับผิวหนังของมนุษย์ให้มากที่สุด

Craig และคณะ²¹ ได้ทดสอบความคงทนของสีของวัสดุ 3 ชนิด คือ พีวีซี (PVC) โพลียูรีเทน และ ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ (เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4210, 4-4515) พบว่าหลังจากผ่านสภาวะแวดล้อมของอากาศจำลองแล้ว พีวีซีจะมีสีจางลงเมื่อเวลาผ่านไป 100 ชั่วโมง โพลียูรีเทนจะมีสีเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเวลาผ่านไป 300 ชั่วโมง ขณะที่ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์นั้นไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสี

Craig และคณะ²² ทดสอบ โดยการผสมเม็ดสี (pigment) ลงใน เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4210 แล้วผ่านสภาวะแวดล้อมจำลองเป็นเวลา 900 ชั่วโมง พบว่าสีแต่ละชนิดที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด 11 ชนิด จะมีความคงทนไม่เท่ากัน จากนั้นได้ทำการศึกษาเรื่องการติดสีภายนอก²³ ของ เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4210 ไชลาสติก 382 (อาร์ทีวี) เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4515 (เอชทีวี) และพีวีซี พบว่าน้ำชาทำให้เกิดการติดสีน้อยที่สุด ขณะที่ลิปสติกทำให้เกิดการติดสี และ ลบออกยากมากที่สุด ส่วนวัสดุ เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4210 ติดคราบสีจากน้ำชา และลิปสติกได้ยาก เมื่อเทียบกับ พีวีซี ซึ่งเป็นวัสดุที่ง่ายต่อการติดคราบสีมากที่สุด

Yu และ Koran²⁴ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร (permanent deformation) ของ ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ (ไชลาสติก 382, 399, 4-4210, 4-4515) พีวีซี และ โพลียูรีเทน พบว่าซิลิโคนมีมิติเสถียรภาพดีมากไม่ว่าทั้งก่อนหรือหลังการผ่านสภาวะแวดล้อมของอากาศจำลอง ส่วนโพลียูรีเทนจะเสื่อมสภาพไปเมื่อผ่านสภาวะแวดล้อมของอากาศจำลองด้วยเวลาเพียง 600 ชั่วโมง ต่อมา Yu, Koran และ Craig²⁵ ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของ พีวีซี โพลียูรีเทน อาร์ทีวี ซิลิโคน (ไชลาสติก 382, 399 และ เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4210) เอชทีวี (เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4515) ทั้งก่อนและหลังผ่านสภาวะแวดล้อมของอากาศจำลองพบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 600 ชั่วโมง โพลียูรีเทนมีการสูญเสียคุณสมบัติทางกายภาพอย่างมาก ส่วนวัสดุชนิดอื่นๆ เมื่อเวลาผ่านไป 900 ชั่วโมง คุณสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย โดยเอ็มดีเอ็กซ์ 4-4515 เป็นตัวที่มีความเสถียรภาพมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามผู้ทำการศึกษาที่ยังแนะนำให้ใช้เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4210 ในการประดิษฐ์อวัยวะเทียม เพราะเป็นวัสดุที่มีขั้นตอนการประดิษฐ์อวัยวะเทียมไม่ยุ่งยากเมื่อเทียบกับเอ็มดีเอ็กซ์ 4-4515 และได้ทำการศึกษา²⁶ ต่อโดยการผสมเม็ดสี 11 ชนิด โดยผสมแต่ละชนิดลงใน เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4210 พบว่าไม่ทำให้คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

Kent และ Zeigel²⁷ ศึกษาพื้นผิวของซิลิโคน (เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4210) ด้านที่สัมผัสกับเนื้อเยื่อ พบว่ามีความหยาบและเรียบแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวิธีการผสมยิปซัมที่ใช้ทำแบบหล่อ และการใช้สารคั่นกลางทางที่ยิปซัม

Udagama และ Brane²⁸ แนะนำซิลิโคนชนิดใหม่ คือ ไชลาสติก 891 (Medical adhesive type A, Dow Corning A-891) เพื่อใช้ประดิษฐ์อวัยวะเทียม โดยไม่มีการทดสอบคุณสมบัติใดๆ Segall และ Glassman²⁹ ได้ใช้ เอ-891 เป็นวัสดุบุฐานฟันปลอมอย่างนิ่มสำหรับผู้ป่วยที่มีปัญหาในการใส่ฟันปลอมทั้งปาก Udagama และ King³⁰ รายงานผู้ป่วยที่ใส่อวัยวะเทียมแล้วเกิดเป็นรอยแผลถลอกของเนื้อเยื่อ อันเนื่องจากการเสียดสีกับผิวซิลิโคนที่หยาบ และ ขรุขระ ซึ่งมีสาเหตุจากแบบหล่อที่ทำจากยิปซัมมีรูพรุนมาก

Kouyoumdjian และคณะ³¹ ได้ทำการศึกษาผลของการผสม ซิลิโคนเหลว (360 medical fluid) ลงใน เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4210 พบว่าสามารถทำให้ความแข็งผิวของซิลิโคนลดลงได้แต่ก็จะทำให้คุณสมบัติต่างๆ เช่น กำลังแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด ลดลงด้วย Wolfaardt และ

คณะ³² รวมทั้ง Bell และคณะ³³ ทำการศึกษากลสมบัติ (กำลังแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด) ของซิลิโคนชนิดใหม่ (Q7-4635, Q74650, Q7-4735) โดยเปรียบเทียบกับ เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4210 และ เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4515 พบว่า ซิลิโคนชนิดใหม่มีกลสมบัติเหนือกว่า Farah และคณะ³⁴ พบว่าการผสมส่วนเบส (base) ของเอ็มดีเอ็กซ์ 4-4210 เข้ากับไซลาสติก 891 จะทำให้ได้ซิลิโคนที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น

Udagama³⁵ ได้แนะนำวิธีการบูรณะของอวัยวะเทียมด้านที่สัมผัสกับเนื้อเยื่อด้วยแผ่นโพลียูรีเทน โดยให้เหตุผลว่าขอบของซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ไม่สามารถใช้กับกาวชนิดที่ละลายน้ำได้ ส่วนบริเวณที่บางนั้นมีความต้านทานต่อการฉีกขาดต่ำ คุดซบไบมันและสิ่งคัดหลั่งจากร่างกาย เป็นที่เจริญเพาะพันธุ์ของเชื้อรา ดังนั้นการบูรณะของซิลิโคนด้วยแผ่นโพลียูรีเทนจึงเป็นการแก้ปัญหาที่กล่าวมาได้เป็นอย่างดี ซึ่งก่อนหน้านั้น Udagama ได้ทดลองใช้วัสดุบูรณะหลายชนิดได้แก่ เอทิลเมทาคริเลต (ethyl methacrylate) โพลีเอทิลีน (polyethylene) พีวีซี แต่คุณสมบัติไม่ดีเท่าโพลียูรีเทน แต่โพลียูรีเทนมีข้อด้อยที่ไม่สามารถเชื่อมติดกับซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ได้ จำเป็นต้องใช้สารไพรเมอร์เป็นตัวเชื่อม ซึ่ง Udagama ทำการศึกษาถึงวิธีเพื่อเพิ่มแรงยึดระหว่างซิลิโคนชนิดไซลาสติก 891 กับแผ่นโพลียูรีเทน โดยแบ่งเป็น 3 วิธี คือ วิธีที่ 1 ทำความสะอาดแผ่นโพลียูรีเทน ด้วยสารละลายอะซิโตน แล้วให้ความร้อนแก่แผ่นโพลียูรีเทนจนใส จากนั้นทาด้วย ไซลาสติก 891 และอัดทับด้วยซิลิโคน วิธีที่ 2 ทำความสะอาดแผ่นโพลียูรีเทนด้วยอะซิโตน ให้ความร้อนบนแผ่นโพลียูรีเทนจนใส ทาด้วยไพรเมอร์ 1205 ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง แล้วจึงทาด้วยไซลาสติก 891 แล้วอัดทับด้วยซิลิโคน วิธีที่ 3 ทำเหมือนวิธีที่ 2 แต่ใช้ไพรเมอร์ชนิด เอส-2260 พบว่าวิธีที่ 3 ให้ค่าแรงยึด (bond strength) ระหว่างแผ่นโพลียูรีเทน กับไซลาสติก 891 ดีที่สุด Wang และคณะ³⁶ ทำการศึกษาค่าแรงยึดระหว่าง ไซลาสติก 891 กับ แผ่นโพลียูรีเทน โดยใช้สารไพรเมอร์ 2 ชนิด (1250 และ เอส-2260) โดยแปรเปลี่ยนระยะเวลาหลังจากที่ทาสารไพรเมอร์ลงบนแผ่นโพลียูรีเทน เป็นเวลา 30 นาที , 1, 2 , 4 , 6 , 8 และ 10 ชั่วโมง และแปรเปลี่ยนตามวิธีการบ่ม (บ่มด้วยความร้อนแห้ง ไมโครเวฟ หรือทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้อง) พบว่าไพรเมอร์ 1205 ให้ค่าแรงยึดสูงกว่าการใช้สารไพรเมอร์ชนิด เอส-2260 และการทาด้วยไพรเมอร์ 1205 แล้วทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ก่อนบ่มด้วยความร้อนแห้งจะให้ค่าแรงยึดสูงสุด

Taft และคณะ³⁷ ทดสอบค่าแรงยึดระหว่าง ไซลาสติก 891 กับ อะคริลิก เรซิน 2 ชนิด (บ่มด้วยตนเอง และบ่มด้วยความร้อน) โดยใช้สารไพรเมอร์ 2 ชนิด (1205 และ เอส-2260) พบว่าไพรเมอร์ 1205 ให้แรงยึดระหว่าง ไซลาสติก 891 กับผิวของอะคริลิกเรซิน ทั้ง 2 ลักษณะ (ผิวเรียบหรือผิวขรุขระ) ได้ดีกว่าการใช้ไพรเมอร์ชนิดเอส-2260 Singer และคณะ³⁸ ทำการทดสอบค่าแรงยึดระหว่างแผ่นโพลียูรีเทน และซิลิโคนที่ดัดแปลงอัตราส่วนผสมกับไซลาสติก 891 พบว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของเอ็มดีเอ็กซ์ 4-4210 ผสมกับ 50 เปอร์เซ็นต์ของไซลาสติก 891 เกิดแรงยึดกับแผ่นโพลียูรีเทนได้ดี เมื่อใช้ไพรเมอร์ เอส-2260 หรือใช้ เอ-4040 โดยมีค่าแรงยึดสูงกว่ากลุ่มที่เป็น 50

เปอร์เซ็นต์ เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4210 ผสมกับ 50 เปอร์เซ็นต์ของไซลาสติก 891 และทาด้วยไซลาสติก 891 บางๆ ที่แผ่นโพลียูรีเทน และตามด้วยไพรเมอร์ เอส-2260 หรือ เอ-4040 สำหรับกลุ่มที่ไม่ได้ใช้สารไพรเมอร์นั้นไม่พบการยึดกันระหว่างซิลิโคนและแผ่นโพลียูรีเทน

McMordie และ King³⁹ ทดสอบค่าแรงยึดของ ไซลาสติก 891 กับ อะคริลิก เรซิน โดยใช้สารไพรเมอร์ 3 ชนิด คือ เอ-4040 เอส-2260 และ 1205 พบว่าไพรเมอร์ เอ-4040 ให้ค่าแรงยึดสูงสุด Davis และ James⁴⁰ ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของตำแหน่งการให้ความร้อนแก่แผ่นโพลียูรีเทนจากด้านบนหรือด้านล่าง พบว่าค่าแรงยึดของแผ่นโพลียูรีเทนกับ ไซลาสติก 891 ด้วยวิธีการให้ความร้อนด้านบนแผ่นโพลียูรีเทนจะให้ค่าสูงกว่าการให้ความร้อนจากด้านล่าง เมื่อใช้ร่วมกับไพรเมอร์ เอส-2260 จารูมา และคณะ⁴¹ ทำการศึกษาแรงยึดของแผ่นโพลียูรีเทนกับซิลิโคน 2 ชนิด คือ (เอ-2186 และ เอ-595) โดยใช้ไพรเมอร์ เอส-2260 ทาลงบนแผ่นโพลียูรีเทน เป็นเวลา 30 นาที 1 และ 2 ชั่วโมง ก่อนที่จะอัดทับด้วยซิลิโคน พบว่าแรงยึดของซิลิโคนชนิด เอ-2186 กับแผ่นโพลียูรีเทนที่ทาด้วยสารไพรเมอร์แล้วทิ้งไว้ 1 หรือ 2 ชั่วโมง ให้ค่าแรงยึดมากกว่าที่ทาแล้วทิ้งไว้เพียงแค่ 30 นาที ส่วนในซิลิโคน เอ-595 ไม่พบความแตกต่างของแรงยึดเมื่อทาสารไพรเมอร์ทิ้งไว้ทั้ง 3 ช่วงเวลา

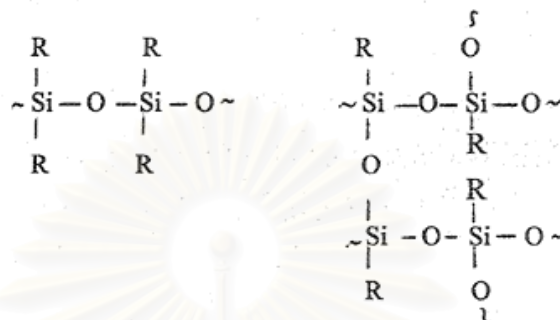
จารูวรรณ และคณะ⁴² ทำการศึกษาแรงยึดของซิลิโคนชนิด ไตรอะซีทอกซีไซเลน กับแผ่นโพลียูรีเทน (ที่ขึ้นรูปจากโพลียูรีเทนเหลว) โดยใช้สารไพรเมอร์ 3 ชนิด คือ 1205 เอส-2260 และ 4040 พบว่าไพรเมอร์ 1205 ให้ค่าแรงยึดสูงสุด โดยเกิดการฉีกขาดในเนื้อซิลิโคน (cohesive failure) เมื่อทดสอบด้วยวิธีการหาค่าความต้านทานต่อการลอกออกกระหว่างซิลิโคนกับโพลียูรีเทน ส่วนไพรเมอร์ เอส-2260 และ เอ-4040 ไม่พบการยึดระหว่างซิลิโคนกับแผ่นโพลียูรีเทน ทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นการศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ประดิษฐ์อวัยวะเทียมซึ่งเป็นวัสดุที่จะต้องใช้กับมนุษย์ ดังนั้นการกำหนดคุณสมบัติอันพึงประสงค์ของวัสดุจึงเป็นสิ่งจำเป็น

คุณสมบัติอันพึงประสงค์ของวัสดุที่ใช้ประดิษฐ์อวัยวะเทียมนอกช่องปาก²

สามารถเข้าได้ดีกับผิวหนัง และร่างกายของมนุษย์ โดยไม่ก่อให้เกิดการระคายเคือง การอักเสบ และไม่เป็นสารที่ก่อมะเร็ง น้ำหนักเบา เมื่อผู้ป่วยสวมหรือติดกับส่วนหนึ่งส่วนใดของร่างกายแล้วไม่รบกวนขณะปฏิบัติภารกิจประจำวัน สามารถตกแต่งสีให้เหมือนกับผิวหนังของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นการสัก ย้อม หรือทา และสีจะต้องคงทนถาวร ไม่เป็นสื่อนำความร้อน และกระแสไฟฟ้า มีความยืดหยุ่นได้ดี และใกล้เคียงกับผิวของมนุษย์ สามารถทำความสะอาดได้ ไม่เป็นที่สะสมและเจริญเติบโตของเชื้อราและแบคทีเรีย มีความแข็งแรงคงทนต่อการฉีกขาด ไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเมื่อสัมผัสกับตัวทำละลาย แสงแดด ความร้อน และความเย็น ราคาไม่แพง หาซื้อง่าย และขั้นตอนการประดิษฐ์ไม่ยุ่งยากซับซ้อน

ซิลิโคนโพลิเมอร์ หรือ โพลีไซลอกเซน (Silicone polymers or polysiloxanes)^{43,44}

หมายถึงโพลิเมอร์ที่มีโครงสร้างประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอน (Si) และอะตอมของออกซิเจน (O) อยู่สลับไปมา (-Si-O) ตลอดสายโซ่ของโพลิเมอร์ โดยอะตอมของ ซิลิคอนจะมีหมู่อินทรีย์ (organic group) อยู่ด้วย ดังนั้นซิลิโคนจึงมีโครงสร้าง ทั่วไปดังนี้



ด้วยพันธะระหว่าง ซิลิคอน และออกซิเจน นี้เองจึงทำให้ซิลิโคนมีคุณสมบัติดังนี้ คือทนต่อความร้อนได้สูง (thermal stability) จึงสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูง เช่น ใช้เป็น heat-transfer agent มีความยืดหยุ่นสูงดีมาก (exceptional flexibility) แม้จะใช้ที่อุณหภูมิต่ำ (เพราะมี $T_g = -123^\circ\text{C}$) ยังคงมีคุณสมบัติคล้ายยางแม้มีอุณหภูมิ -90 องศาเซลเซียส ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและทางชีวภาพ (chemical and biological inertness) ทนต่อแสงอาทิตย์ อากาศ โอโซนและอื่นๆ ไม่กลมกลืนหรือไม่เข้ากับ (incompatible) สารประกอบอินทรีย์ส่วนใหญ่ คือไม่ยึดหรือเชื่อมต่อกับสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ จึงมักใช้เป็น สารกั้นกลาง เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี จึงมักนำไปใช้ในวงจรไฟฟ้าเพื่อกันไม่ให้เกิดการลัดวงจร ให้ก๊าซซึมผ่านได้ดีมาก (high permeability of gases) จึงใช้ทำแมมเบรนเพื่อใช้ประโยชน์ด้านการแพทย์และงานทางด้านศัลยกรรม

ซิลิโคนอาจมีโครงสร้างเป็นแบบเส้นตรง (linear) หรือแบบ รังแห (net work) ก็ได้ เพื่อความสะดวกซิลิโคนในเชิงพาณิชย์จึงแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ ซิลิโคนแบบของไหล (fluids) ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ (elastomer) และ ซิลิโคนเรซิน (resins)

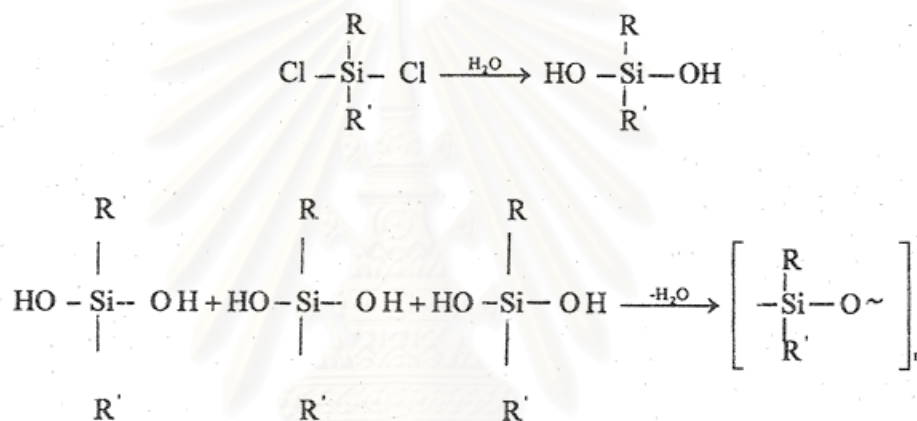
การพัฒนา

Dumas Friedel และ Griffs⁴³ เป็นบุคคลกลุ่มแรกที่เตรียมสารประกอบของ ออร์กาโนซิลิคอน (organosilicon compounds) และต่อมา Kipping ซึ่งถือว่าเป็นบุคคลแรกที่ได้ศึกษาและวางรากฐานของเคมีออร์กาโนซิลิคอน แต่งานวิจัยของ Kipping นั้นเฉพาะสารประกอบของซิลิคอนที่ไม่ใช่โพลิเมอร์เพียงเท่านั้น ความสนใจในด้านการพัฒนาซิลิคอนโพลิเมอร์ในเชิงพาณิชย์เริ่มในทศวรรษ 1930 โดยบริษัท Corning Glass Work (USA) และ General Electric Co. สหรัฐอเมริกา เป้า

หมายของการวิจัยคือ พยายามประดิษฐ์วัสดุที่สามารถทนความร้อนได้ดีจนพัฒนาซิลิโคนเรซินเป็นผลสำเร็จ ซิลิโคนในเชิงพาณิชย์วางตลาดเป็นครั้งแรกโดยบริษัท Dow Corning Corp. สหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1943 และต่อมาโดยบริษัท General Electric Co. สหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1946

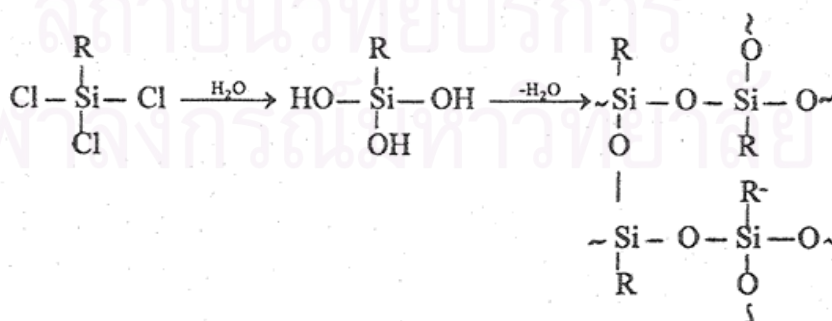
การเตรียมโมโนเมอร์ หรือวัตถุดิบ

สารตั้งต้นที่ใช้สำหรับผลิตซิลิโคนคือสารจำพวกคลอโรไซเลน ซึ่งทำปฏิกิริยากับน้ำได้ไซเลนอล (silanol) ไซเลนอลที่เกิดขึ้นไม่เสถียรและควมแน่นต่อไปได้ไซลอกเซนตามต้องการ เช่น ไคคลอโรไซเลนจะเกิดซิลิโคนที่มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงดังนี้



silicone

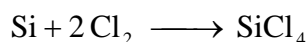
โพลิเมอร์จำพวกนี้เป็นพื้นฐานของซิลิโคนของไหล และซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ส่วนไคคลอโรไซเลนให้ซิลิโคนที่มีสาขาไซโซ่และมีโครงสร้างเป็นร่างแห เช่น



crosslinked silicone

ซิลิโคนที่มีโครงสร้างข้างต้นนี้เป็นพื้นฐานของซิลิโคนเรซินหรือพลาสติก

อุตสาหกรรมเตรียมซิลิคอนโรโซเลน โดยใช้โลหะซิลิคอนและซิลิคอนเตตระคลอไรด์เป็นสารตั้งต้น ซึ่งสารทั้งสองต่างเตรียมจากซิลิกา (SiO_2) ดังนี้

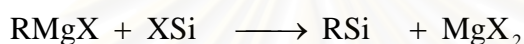


silicon tetrachloride (tetrachlorosilane)

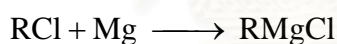
วิธีการเตรียมซิลิคอนโรโซเลนมีหลายวิธี ที่สำคัญคือดังนี้

ก. กระบวนการกริกยาค์ (Grignard process)

กระบวนการนี้ ใช้สารออร์กาโนแมกเนเซียม เพื่อให้หมู่ออร์กาโนแก่ซิลิคอน

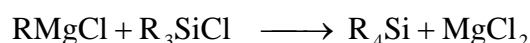
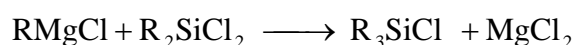
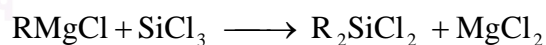


ส่วนสารออร์กาโนแมกเนเซียม (เรียกว่าน้ำยากริกยาค์) เตรียมโดยการเติม อัลคิล เฮไลด์ (ทั่วไปเป็นคลอไรด์) หรือ อาริล เฮไลด์ (ทั่วไปเป็นโบรไมด์) กับผงแมกเนเซียม ที่แขวนลอยในอีเทอร์แห้ง (ทั่วไปเป็นไดเอทิลอีเทอร์) เช่น



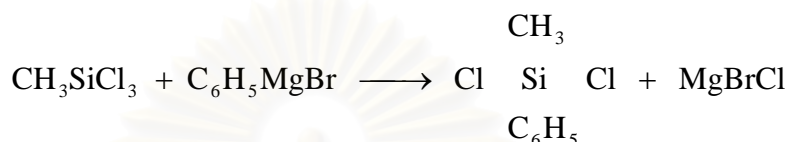
a grignard reagent

เมื่อเติมซิลิคอนเตตระคลอไรด์ (SiCl_4) ให้กับน้ำยากริกยาค์ข้างต้น (ปฏิกิริยาคายความร้อนมากจึงต้องคอยควบคุมอุณหภูมิให้เย็นอยู่เสมอ) จะได้สารออร์กาโนซิลิคอนหลายสาร ซึ่งเกิดจากการแทนที่เป็นขั้นๆ ดังนี้ (ส่วนผลผลิตพลอยได้คือ MgCl_2 จะตกตะกอนออกมา)



ถึงแม้วิธีนี้จะได้ซิลิคอนออกมาในรูปของของผสมเสมอ ปริมาณของแต่ละองค์ประกอบสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมปริมาณของน้ำยากริกยาค์ที่ใช้และสถานะของปฏิกิริยา ทั่วไปจะได้ไดอัลคิล

(หรือไดอาริล) ไคลด์คลอโรไซเลนเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ทั้งนี้เนื่องจากผลทางสเตอริก (steric effect) ช่วยป้องกันการเพิ่มหมู่อินทรีย์ (R) ตัวต่อไป สารต่างๆ ที่เกิดขึ้นสามารถแยกออกจากกันและกันโดยการกลั่นแบบลำดับส่วน กระบวนการกริกยาด์เป็นกระบวนการแรกที่ใช้ โดยอุตสาหกรรมในการเตรียมคลอโรไซเลน แต่ในปัจจุบันได้หันมาใช้กระบวนการโดยตรง เพราะกระบวนการโดยตรงดำเนินการได้ง่ายกว่า และมีต้นทุนที่ถูกลงกว่า แต่กระบวนการกริกยาด์ก็ยังคงมีความสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้เตรียมออร์กาโนไซเลนที่ไม่อาจเตรียมโดยกระบวนการโดยตรงได้ เช่น เตรียมคลอโรไซเลนที่มีทั้งหมู่อัลคิลและหมู่อาริล ดังนี้



ข. กระบวนการโดยตรง (Direct process)

กระบวนการนี้เปลี่ยนธาตุซิลิคอนเป็นคลอโรไซเลนโดยตรง โดยให้ทำปฏิกิริยากับ อัลคิลหรือ อาริล คลอไรด์ ดังนี้



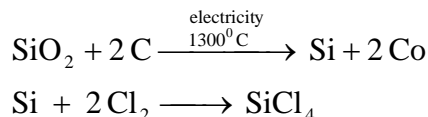
ในทางปฏิบัติ นอกจากจะได้ R_2SiCl_2 แล้ว ยังได้คลอโรออร์กาโนไซเลน อื่นๆ เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ด้วยกระบวนการทั่วไป ผ่านเมทิลคลอไรด์ (CH_3Cl) เข้าไปยังของผสมของซิลิคอนและทองแดง (ทำหน้าที่เป็นตัวเร่ง) ที่ 250-280 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ได้จากปฏิกิริยาทั่วไปแสดงในตารางที่ 1 องค์ประกอบเหล่านี้สามารถแยกออกจากกันและกันโดยการกลั่นแบบลำดับส่วน

ตารางที่ 1 สัดส่วนของผลผลิตที่ได้จากเมทิลคลอไรด์ทำปฏิกิริยากับซิลิคอนโดยตรง ($\text{CH}_3\text{Cl} + \text{Si}$)

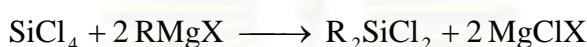
สารประกอบ	จุดเดือด ($^{\circ}\text{C}$)	เปอร์เซ็นต์
ไดเมทิลไดคลอโรไซเลน, $(\text{CH}_3)_2\text{SiCl}_2$	70	75
เมทิลไตรคลอโรไซเลน CH_3SiCl_3	66	10
ไตรเมทิลคลอโรไซเลน $(\text{CH}_3)_3\text{SiCl}$	58	4
เมทิลไดคลอโรไซเลน $\text{CH}_3\text{SiHCl}_2$	41	6
ซิลิคอนเตตระคลอไรด์	58	
เตตระเมทิลไซเลน $(\text{CH}_3)_4\text{Si}$	26	ปริมาณเล็กน้อย
ไตรคลอโรไซเลน SiHCl_3	32	
กากที่มีจุดเดือดสูง	100-200	

สรุปการเตรียมโมนอเมอร์⁴⁵

วัสดุที่ใช้เตรียมโมนอเมอร์คือโลหะซิลิคอนและเตตระคลอโรไซเลน ซึ่งสามารถเตรียมได้จาก



ก. จากเตตระคลอโรไซเลน โดย Grignard reaction



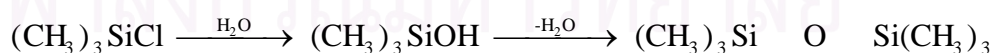
ข. จากโลหะซิลิคอนโดยปฏิกิริยาโดยตรง หรือ “Rochow process”



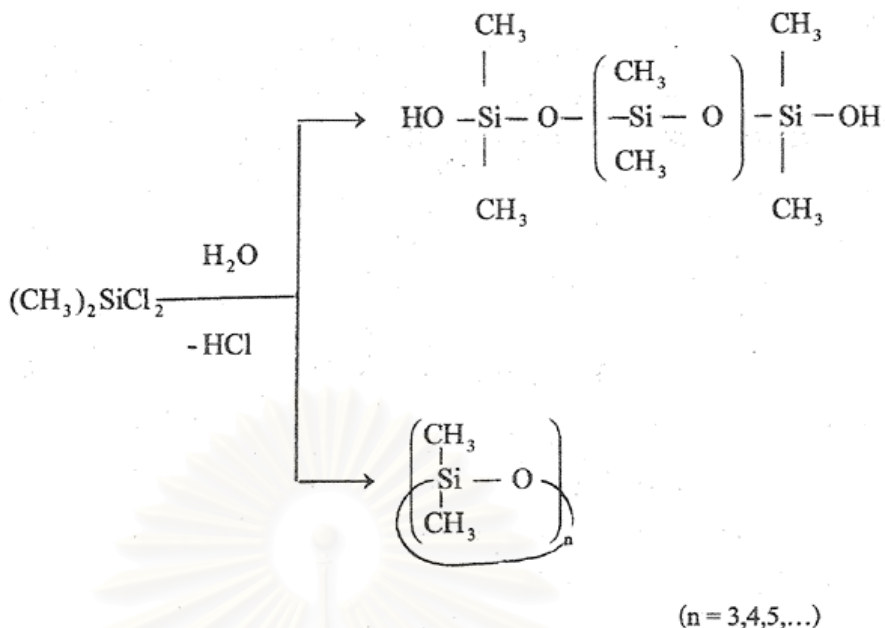
การเตรียมโพลิเมอร์ (Polymerization)

การเตรียมโพลิไซลอกเซน จะเริ่มจากการไฮโดรไลซ์สารประกอบคลอโรไซเลนให้เป็นไซเลนอลก่อน แล้วจึงเกิดการควบแน่นกลายเป็นโพลิไซลอกเซน ดังนั้นโครงสร้างของไซลอกเซนที่ได้จึงขึ้นกับหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวของคลอโรไซเลนและสภาวะของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ใช้ ดังแสดงโดยตัวอย่างต่อไปนี้

ก. ไตรเมทิลคลอโรไซเลน (Trimethylchlorosilane) เนื่องจากมีหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวเพียง (Cl) หมู่เดียว ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการควบแน่นหลังปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจึงเป็นเพียงไดเมอร์ คือ เฮกซะเมทิลไดไซลอกเซน ดังนี้

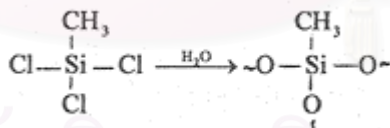


ข. ไดเมทิลไดคลอโรไซเลน (Dimethyldichlorosilane) เนื่องจากมีหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัว (Cl) อยู่สองหมู่ ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารนี้จึงเป็นของผสมของโพลิเมอร์เชิงเส้นตรงและวงแหวน

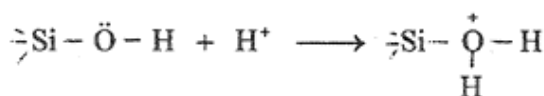


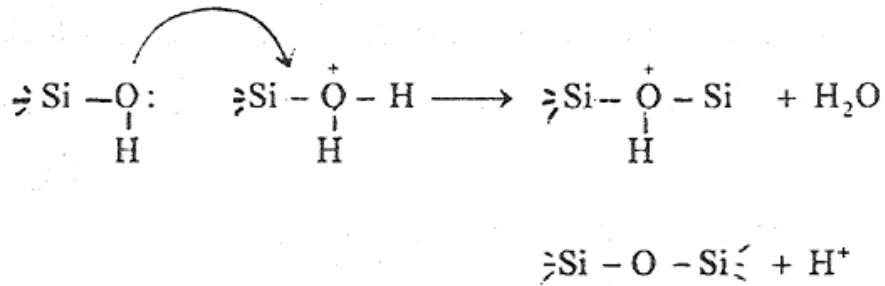
สัดส่วนของโพลิเมอร์โซ่ตรงกับวงแหวน จะขึ้นอยู่กับสถานะของปฏิกิริยาเช่นถ้าใช้น้ำอย่างเดียวยังได้ โพลิเมอร์โซ่ตรง 50-80เปอร์เซ็นต์ และโพลิเมอร์วงแหวน 50-20 เปอร์เซ็นต์ และถ้าใช้กรดซัลฟูริกจะได้โพลิเมอร์โซ่ตรงเป็นส่วนใหญ่ มีโพลิเมอร์วงแหวนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ค.เมทิลไตรคลอโรไซเลน (Methyltrichlorosilane) เนื่องจากสารนี้มีหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัว (Cl) 3 หมู่ ไฮโดรไลซิสของสารนี้โดยใช้น้ำเพียงอย่างเดียวจะได้โพลิเมอร์แบบเชื่อมโยงที่มีลักษณะคล้ายวุ้นหรือเป็นผง

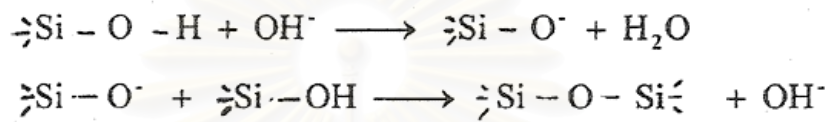


ในทำนองเดียวกัน ถ้าใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ด้วย จะช่วยทำให้เกิดการควบแน่นภายในโมเลกุลได้สารประกอบแบบวงแหวนด้วยการควบแน่นของไซเลนอลโดยการขจัดโมเลกุลของน้ำออกไปสามารถคะตะไลส์ โดยทั้งกรด และเบส และเนื่องจากไฮโดรไลซิสของคลอโรไซเลน (ขั้นแรก) ได้กรดไฮโดรคลอริกเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ กรดที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาการควบแน่นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว กลไกของปฏิกิริยาคือดังนี้





ส่วนปฏิกิริยาการควบแน่นโดยมีเบสเป็นตัวเร่ง (Base-catalyse) ก็ดังนี้



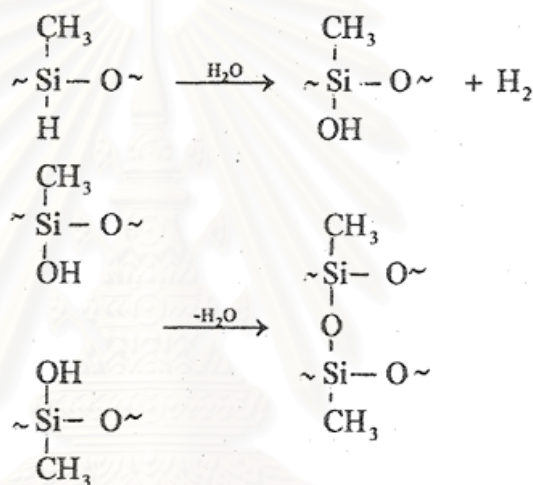
นอกจากนี้แล้วปฏิกิริยาการควบแน่นยังสามารถคะตะไลส์โดยสารประกอบของโลหะ เช่น โคบอลท์เนฟทีเนต (cobalt naphthenate) หรือสแตนนัสออกโตเอต (stannous octoate) ได้ด้วยดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ซิลิโคนที่มีความสำคัญในเชิงพาณิชย์จำแนกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ โพลีเมอร์จำพวกของไหล อีลาสโตเมอร์ และเรซินหรือพลาสติก การเตรียมโพลีเมอร์ เหล่านี้อาศัยอาศัยปฏิกิริยาทั่วไปดังกล่าวมาแล้วข้างต้นเป็นหลัก ต่อไปนี้จะกล่าวถึงการเตรียมโพลีเมอร์ทั้ง 3 ประเภทนี้โดยสังเขป

ก. ซิลิโคนของไหล (Silicone fluids)

องค์ประกอบของซิลิโคนของไหลเป็นโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ทั่วไป 4,000-25,000 โพลีเมอร์ที่สำคัญที่สุดคือ โพลีไดเมทิล ซิลอกเซน กระบวนการเตรียมทั่วไปคือ นำไดเมทิลไดคลอโรไซเลนมาไฮโดรไลส์ อย่างต่อเนื่อง โดยผสมกับกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง ผลผลิตที่ได้ อยู่ในรูปของน้ำมันซึ่งแยกออกจากชั้นของน้ำ ผลผลิตที่ได้ในขั้นนี้เป็นของผสมของซิลอกเซนโพลีเมอร์ที่มีความยาวโซ่ขนาดต่างๆกัน และซิลอกเซนแบบวงแหวน (ส่วนใหญ่เป็นเตตระเมอร์ และออกตะเมทิลไซโคลเตตระซิลอกเซน) แยกน้ำมันนี้ออกจากน้ำ เติมกรดซัลฟูริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์เล็กน้อย แล้วให้ความร้อนที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหลายชั่วโมง ซึ่งในระหว่างให้ความร้อนนี้เติมเฮกซะเมทิลซิลอกเซน (ทำหน้าที่เป็นตัวหยุดปฏิกิริยาการควบแน่น) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดตามต้องการ (เพราะความหนืดแปรผันโดยตรงกับน้ำหนักโมเลกุล) แยกของไหลที่ได้ไปกรอง ทำให้แห้งและให้ความร้อนแบบลดความดันเพื่อขจัดสารที่ระเหยง่ายออกไป

ในกรณีที่ต้องการให้ซิลิโคนของไหลมีเสถียรภาพต่อความร้อนเพิ่มขึ้น มีการเตรียมซิลิโคนที่มีทั้งหมู่เมทิลและฟีนิลในโมเลกุล ซึ่งโดยทั่วไปให้มีหมู่ฟีนิล 10-45 เปอร์เซ็นต์ ของหมู่แทนที่ทั้งหมดในโมเลกุล ซิลิโคนชนิดนี้เตรียมจากการนำของผสมของ เมทิลคลอโรไซเลน และฟีนิลคลอโรไซเลน มาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ซิลิโคนของไหลที่ต้องการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเส้นใยมีการรวมหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเข้าไปในโซ่ของโพลิเมอร์ด้วย เพื่อจะได้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลได้ผลิตภัณฑ์ที่ถาวร โดยทั่วไปจะให้ของไหลที่เตรียมได้มีพันธะ Si - H ในโมเลกุล (นำเข้าไปยังโซ่ของโพลิเมอร์โดยการเติมเมทิลไดคลอโรไซเลนในกระบวนการโพลิเมอไรเซชันด้วย) ซึ่งจะเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลเมื่อเติมเบสและให้ความร้อน ดังนี้

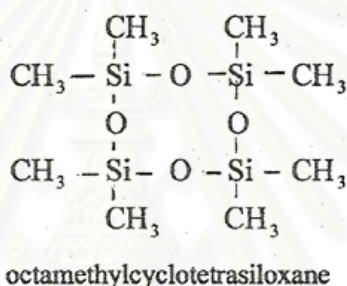


ข. ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์

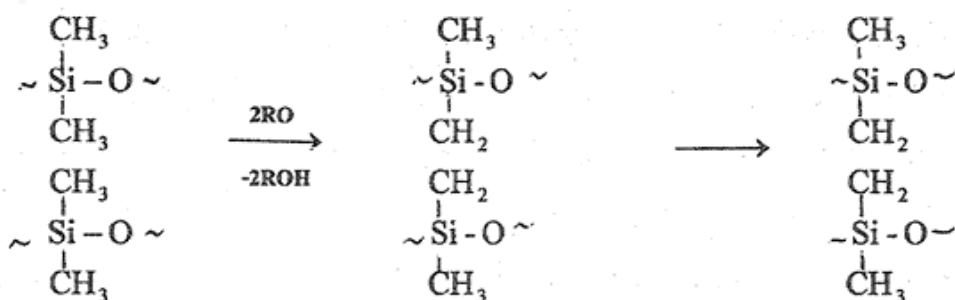
ทำนองเดียวกับซิลิโคนของไหล ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์เป็นโพลิเมอร์เชิงเส้นตรงแต่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่ามาก และทำนองเดียวกับอีลาสโตเมอร์อื่นๆ โพลิเมอร์เชิงเส้นตรงที่ได้ต้องนำไปผ่านกระบวนการทำให้เกิดการเชื่อมโยง (cross-linked) ระหว่างโมเลกุลเพื่อให้ได้สมบัติที่ดีของอีลาสโตเมอร์ ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ที่ใช้งานเอนกประสงค์เป็น โพลิเมอร์จำพวกโพลิไดเมทิลไซลอกเซน อย่างไรก็ตามก็มีการเตรียมอีลาสโตเมอร์ที่ใช้งานจำเพาะอื่นๆ โดยรวมหมู่สมบัติเฉพาะตัวอื่นๆเข้าไปในโซ่ของโพลิเมอร์ด้วย ตัวอย่างของซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ได้แก่ ไวนิลซิลิโคน ฟีนิลซิลิโคน ไดเมทิลซิลิโคน เป็นต้น

ไดเมทิลซิลิโคน อีลาสโตเมอร์

ไดเมทิลซิลิโคนที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันเป็นโพลิเมอร์เชิงเส้นตรงที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ทั่วไป 300,000 – 700,000 โพลิเมอร์นี้ไม่อาจเตรียมโดยตรงจากการนำไดเมทิลไดคลอโรไซคลอโรพอสโอส เพราะการที่จะได้โพลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากนี้ จะต้องใช้ไซคลอ (สารตั้งต้น) ที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก ซึ่งทำได้ไม่ง่ายนักในทางปฏิบัติ (สารปนเปื้อนที่มีหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัว 1 หมู่ ทำให้น้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยต่ำลง ส่วนที่มีหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวมากกว่า 2 หมู่ ทำให้เกิดสาขาไซได้) โพลิเมอร์เชิงเส้นตรงที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากจึงต้องเตรียมโดยวิธีค่อนข้างพิเศษดังนี้กระบวนการที่ใช้ทั่วไป นำไดเมทิลไดคลอโรไซคลอโรพอสในอีเทอร์ แล้วผสมน้ำเข้าไปในปริมาณมากเกินไปเกิดโพลิเมอร์วงแหวนขึ้นก่อนซึ่งก็คือ ออกตะเมทิลไซโคลเตตระไซคลอกเซน ซึ่งเป็นเตตระเมอร์ มีโครงสร้างดังนี้



เตตระเมอร์นี้มีจุดเดือด 175 องศาเซลเซียส สามารถแยกออกจากของผสมและทำให้บริสุทธิ์ โดยการกลั่น ต่อไปนำเตตระเมอร์นี้ไปโพลิเมอไรซ์ที่ 150-200 องศาเซลเซียส โดยมีไซเดียมไฮดรอกไซด์เล็กน้อยอยู่ด้วย และมีการเติมสารที่มีหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวเพียง 1 หมู่เล็กน้อยเข้าไปด้วย เพื่อควบคุมน้ำหนักโมเลกุลของโพลิเมอร์ที่ได้ ผลผลิตที่ได้ในขั้นนี้มีลักษณะเป็นขี้ผึ้งเหนียวมาก ยังไม่มีสมบัติของอีลาสโตเมอร์ขั้นต่อไปคือการนำไดเมทิลซิลิโคนที่มีลักษณะเป็นขี้ผึ้งเหนียวนี้ไปทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลโดยใช้สารจำพวกเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ หรือ 2, 4-dichlorobenzoyl peroxide และให้ความร้อน อุณหภูมิที่ใช้ทั่วไปคือ 110-175 องศาเซลเซียส ฟรีเรดิคัลที่เกิดจากการแตกสลายโมเลกุลของเปอร์ออกไซด์จะดึงเอาไฮโดรเจนอะตอมจากหมู่เมทิล แล้วเกิดการรวมตัวกันอีกครั้งหนึ่งได้การเชื่อมโยงแบบเอทิลีน ดังนี้



ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ที่ใช้ในการประดิษฐ์อวัยวะเทียม แบ่งออกเป็น 2 ประเภท^{2,46,47} ตามลักษณะการบ่มตัว คือ ชนิดที่บ่มตัวเองที่อุณหภูมิห้อง (Room temperature-vulcanizing or RTV, LTV) ชนิดที่บ่มตัวด้วยความร้อน (Heat-vulcanizing or HTV)

อาร์ทีวีซิลิโคน (RTV silicone)

เป็นอีลาสโตเมอร์ที่ วัลคาไนเซชัน ที่อุณหภูมิห้องโดยโพลีซิลอกเซนยังคงเป็นโพลีไดเมทิลซิลอกเซน แต่จะมีหมู่ปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลและมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10,000-100,000 แล้วทำการ วัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้สารเชื่อมขวางเช่น เอทิลออร์โทไซเลน (ethyl orthosilane) และใช้ สเตนน์สออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปัจจุบันนิยมใช้ไตรหรือเตตระอะซีทอกซีไซเลน (tri or tetraacetoxysilane) เพื่อให้โพลิเมอร์ที่เตรียมได้มีหมู่ปลายเป็นอะซีทอกซี (acetoxo) เมื่อเจอความชื้น หมู่อะซีทอกซีจะถูกไฮโดรไลซ์ไปเป็นหมู่ซิลานอล เพื่อจะเกิดการเชื่อมขวางต่อไปตัวอย่างของ อาร์ทีวีซิลิโคน ที่ใช้ในงานประดิษฐ์อวัยวะเทียม อาทิเช่น เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4210^{*} (Methylvinyl dimethylsiloxane), ซิลาสติก 382^{*} (polymethyl siloxane), ซิลาสติก 891^{*} (Methylไตรอะซีทอกซีไซเลน), ซิลาสติก 399^{*}, เอ 2186^{**}, เอ 102^{*} เป็นต้น

เอชทีวี ซิลิโคน (HTV silicone)

เป็นอีลาสโตเมอร์ที่ วัลคาไนเซชันด้วยความร้อน โดยมีเปอร์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวอย่างของซิลิโคนชนิดนี้ได้แก่ เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4514^{*} (Dimethyl, phenylmethyl and methylvinyl siloxane), เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4515^{*} (Dimethyl and methylvinyl siloxane), เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4516^{*} (Dimethyl and methylvinyl siloxane) เป็นต้น

* เป็นผลิตภัณฑ์ของ บริษัท Dow Corning, Mid-land, Mich, USA.

** เป็นผลิตภัณฑ์ของ บริษัท Factor II, Lakeside, AZ, USA.

ค. ซิลิโคนเรซินหรือพลาสติก (Silicone resin)

ซิลิโคนเรซิน เป็นโพลิเมอร์ที่มีสาขาไซโซ เตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ของไตรคลอโรไซเลน แต่ถ้าใช้ไตรคลอโรไซเลนบริสุทธิ์ ผลผลิตที่ได้มีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลมากขึ้นไป แข็งเกินไป ไม่อาจแปรรูปได้ จึงไม่เหมาะสำหรับการใช้งานปกติ ดังนั้นเพื่อลดปริมาณของการเชื่อมโยง ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทั่วไปจะผสมไตรคลอโรไซเลนเข้าไปด้วย วิธีสะดวกวิธีหนึ่งที่ใส่บอกจำนวนหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวของผสมคือการใช้ค่า R/Si ซึ่งเป็นอัตราส่วนของจำนวนหมู่อินทรีย์และซิลิกอนอะตอม ดังนั้นไดเมทิลไตรคลอโรไซเลนจะมีค่า R/Si เท่ากับ 2 ส่วน เมทิลไตรคลอโรไซเลนมีค่า R/Si เท่ากับ 1 เป็นต้น การเตรียมซิลิโคนเรซินในเชิงพาณิชย์ ทั่วไปใช้ของผสมของโมโนเมอร์ที่มีค่า R/Si 1.2-1.6 ซิลิโคนเรซินในเชิงพาณิชย์ทั่วไปมีทั้งหมู่เมทิลและหมู่ฟีนิล

นิลในโพลีเมอร์การมีหมู่ฟีนิลในร่างแหของเมทิลไซลอคเซนทำให้ทนต่อความร้อนดีขึ้น ความสามารถในการยืดหยุ่นและสมบัติการเข้ากันได้กับสีกัดขึ้นด้วย คลอโรไซเลนที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ เมทิลไตรคลอโรไซเลนฟีนิล ไตรคลอโรไซเลน ไดมethyl ไดคลอโรไซเลน ไดฟีนิลไดคลอโรไซเลน และ เมทิลฟีนิลไดคลอโรไซเลน ในทางปฏิบัติเลือกใช้โมโนเมอร์ข้างต้นและส่วนผสมที่เหมาะสมตามที่ต้องการกระบวนการเตรียมเรซินทั่วไป นำของผสมของคลอโรไซเลนไปละลายในตัวทำละลายเช่น โทลูอินหรือไซลีนแล้วเติมน้ำพร้อมด้วยการกวน ถ้าของผสมมีเมทิลคลอโรไซเลนเป็นองค์ประกอบหลัก ปฏิกิริยาจะเกิดเร็วมากและคายความร้อนมาก จึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิโดยการหล่อเย็นเพื่อป้องกันการเกิดวุ้น แต่ถ้าของผสมมีฟีนิลคลอโรไซเลนอยู่มาก ปฏิกิริยาจะเกิดช้า ดังนั้นทั่วไปอาจต้องเพิ่มอุณหภูมิของปฏิกิริยาเป็น 70-75 องศาเซลเซียส เพื่อให้มั่นใจว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์หลังปฏิกิริยาสิ้นสุดลง ปล่อยให้ของผสมทั้งหมดแยกออกเป็นสองชั้น นำชั้นอินทรีย์ไปล้างกรดไฮโดรคลอริกออกจนหมด แล้วกลั่นเอาตัวทำละลายออกไปจนได้สารละลายที่มีของแข็งอยู่ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ณ ชั้นนี้เพียง 90 เปอร์เซ็นต์ ของหมู่ไซเลนอลที่มีอยู่เดิมทั้งหมดได้ควบแน่นและเรซินที่ได้มีหมู่ไซเลนอลอยู่ปลายโซ่ซึ่งเป็นของผสมประกอบด้วยโพลีเมอร์เชิงเส้นตรง สาขาโซ่ และที่เกิดการเชื่อมโยง และโพลีเมอร์แบบวงแหวนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ต่อไปนำสารละลายเรซินนี้ไปให้ความร้อนที่ประมาณ 150 องศาเซลเซียส โดยมีตัวเร่งเช่น ซิงค์ออกไซด์อยู่ด้วย หมู่ไซเลนอลที่เหลือจะเกิดการควบแน่นต่อไปทำให้น้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยของเรซินเพิ่มสูงขึ้นอีกมาก หลังจากนั้นนำไปทำให้เย็นเพื่อยุติปฏิกิริยาซิลิโคนเรซินในเชิงพาณิชย์ทั่วไปขายในรูปของสารละลาย เตรียมโดยวิธีการข้างต้น ส่วนการเปลี่ยนเรซินที่ละลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการเชื่อมโยงอย่างเต็มที่ ทั่วไปกระทำในขั้นสุดท้าย เมื่อต้องการนำวัตถุดิบไปใช้งาน โดยการให้ความร้อน และ ใช้ตัวเร่ง เช่น ซิงค์ออกไซด์ โคบอลท์ เนฟทีเอต หรือไตรเอทานอลามีน เป็นต้น ซิลิโคนเรซิน อาจใช้ผสมกับเรซินอื่นๆ ได้เรซินแบบปรับปรุงแล้ว (modified) ซึ่งใช้ประโยชน์เป็นตัวเคลือบผิว เรซินแบบปรับปรุงแล้ว อาจเตรียมได้โดยการนำเรซินสองชนิดมาตีผสมเข้าด้วยกัน หรืออาจทำให้เกิดเป็นโคโพลีเมอร์ก็ได้

สรุปคุณสมบัติและการใช้ประโยชน์

สมบัติที่เด่นประการหนึ่งของซิลิโคน คือ เสถียรภาพต่อความร้อนเป็นพิเศษ โดยทั่วไปสามารถนำโพลีเมอร์ไปให้ความร้อนสูงถึง 200 องศาเซลเซียส โดยที่สมบัติทางกายภาพของโพลีเมอร์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก เสถียรภาพต่อความร้อนนี้เกิดจากพลังงานพันธะที่ค่อนข้างสูงของพันธะต่างๆ ในโพลีเมอร์ (ค่าพลังงานพันธะ Si-O และพันธะอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องให้ไว้ใน ตารางที่ 2 พึงสังเกตว่าพันธะ Si-O เป็นพันธะที่แข็งแรงมาก นี่เป็นสาเหตุสำคัญที่สุดที่ ซิลิโคนมีเสถียรภาพสูง)

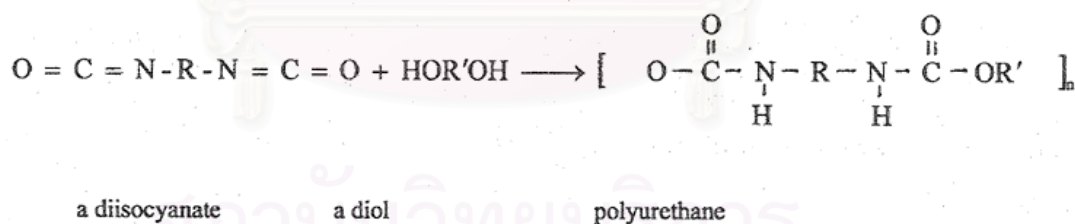
ตารางที่ 2 พลังงานพันธะของพันธะซิลิโคนและคาร์บอนบางพันธะ

พันธะ	พลังงานพันธะ (kcal)
Si – O	106
C – H	99
C – O	86
C – C	83
Si – C	76
Si – H	76
Si – Si	53

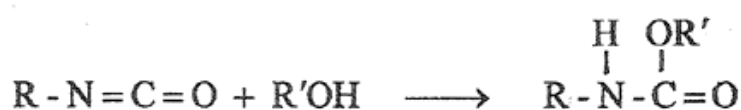
ถึงแม้พันธะ Si-O จะเสถียรต่อความร้อนมาก แต่พันธะนี้มีความเป็นอิกอนิกสูง (มีสภาพขั้วสูง) ถึง 51 เปอร์เซ็นต์ พันธะนี้จึงสลายลงค่อนข้างง่ายโดยกรดแก่และเบสแก่สมบัติที่เด่นอีกประการหนึ่งของซิลิโคน คือ โพลีเมอร์ประเภทนี้ไม่ชอบน้ำเลยเพราะโครงสร้างของโพลีเมอร์ถูกล้อมรอบโดยตลอดด้วยหมู่แทนที่ที่เป็นอินทรีย์ เป็นเหตุให้ผิวของซิลิโคนไม่เปียกน้ำ แต่ลื่นคล้ายไข

โพลียูรีเทน (Polyurethane) ^{48,49}

โพลียูรีเทน เป็นโพลีเมอร์ที่มีหมู่ -NHCOO- อยู่ในโมเลกุลซึ่งหมู่นี้เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างได-หรือโพลีไอโซไซยานต (Di or Polyisocyanate) กับ ได-หรือโพลีไฮดรอกซีแอลกอฮอล์ (Di or Polydiol) ดังนี้



ปฏิกิริยาการเกิดโพลียูรีเทนค้นพบในปี ค.ศ.1848 โดยเวิร์ต (Wurtz) ที่พบว่าโมโนไอโซไซยานต (R-N=C=O , R = หมู่อัลคิล หรืออาริล) สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบซึ่งมีไฮโดรเจนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา(เช่น แอลกอฮอล์ และเอมีน) ได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้อง เกิดเป็นเอสเทอร์ของกรดคาร์บามิกที่ถูกแทนที่ ดังนี้



ต่อมาในปี ค.ศ.1937 ไบเออร์ (Bayer) นักเคมีชาวเยอรมันและผู้ร่วมงานพบว่า ถ้านำไดไอโซไซยานเนตทำปฏิกิริยากับไดออล จะได้โพลียูรีเทนซึ่งมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างแข็งเส้น และเริ่มมีการพัฒนาการผลิตโพลียูรีเทนในเชิงพาณิชย์ในประเทศเยอรมันนี้ โดยบริษัท I.G. Farbenindustrie และได้เริ่มนำผลิตภัณฑ์มาใช้ประโยชน์ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่สอง (เฉพาะประเทศเยอรมัน) หลังสงครามโลกที่สองสหราชอาณาจักรและสหรัฐอเมริกาเริ่มสนใจโพลียูรีเทน แต่การพัฒนาในเชิงพาณิชย์ดำเนินไปค่อนข้างช้า ในปี ค.ศ.1950 บริษัท ไบเออร์ ประเทศเยอรมันนี้ เริ่มผลิตโพลียูรีเทนอีลาสโตเมอร์ เพื่อวางตลาดและในปี ค.ศ.1952 ผลิตโฟมโพลียูรีเทนที่ยืดหยุ่นได้ ในปี ค.ศ.1955 ได้มีการผลิตโฟมยูรีเทนอย่างกว้างขวางโดยประเทศอุตสาหกรรมเกือบทุกประเทศ

การเตรียมโพลียูรีเทน

สารประกอบไดไอโซไซยานเนตที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมมี 2 ชนิด คือ โทลิลีน 2, 4-ไดไอโซไซยานเนต (2, 4 TDI) และโทลิลีน 2, 6-ไดไอโซไซยานเนต (2,6 TDI) สารประกอบไอโซไซยานเนตว่องไวต่อปฏิกิริยามาก หมู่ไอโซไซยานเนตสามารถทำปฏิกิริยากับสารต่อไปนี้ คือ แอมิน น้ำ หรือความชื้น แอลกอฮอล์ กรดคาร์บอนซิลิก และยูรีเทน เนื่องจากหมู่ไอโซไซยานเนตว่องไวต่อน้ำหรือความชื้น ดังนั้นตัวทำละลายที่ใช้เช่น เอสเตอร์อีโตน และ อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน จะต้องไม่มีน้ำ

คุณสมบัติของโพลียูรีเทน

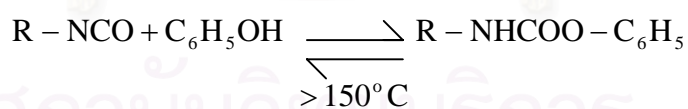
- 1.พันธะยูรีเทนเกิดไฮโดรไลซิสได้ยาก ดังนั้นโพลียูรีเทนจึงทนต่อน้ำและกรด ได้ดีอย่างไรก็ตาม ความทนต่อน้ำจะไม่เท่ากับอีพอกซีเรซิน ที่ได้ผ่านการอบหรือการบ่มเย็นมาแล้ว
- 2.ฟิล์มของโพลียูรีเทนจะทนต่อตัวทำละลายอินทรีย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อตัวทำละลายอะโรมาติก และคลอริเตดไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ยังทนต่อน้ำมันด้วย
- 3.ฟิล์มของโพลียูรีเทนซึ่งได้ผ่านการบ่มเต็มที่แล้ว จะมีแรงยึดผิวน้ำดี มีความทนทานต่อการขีดสูง มีความเหนียว (toughness) และทนทานต่อลมฟ้าอากาศเป็นอย่างดี สมบัติดังกล่าวนี้อธิบายได้ว่าเนื่องจากมีหมู่ที่มีขั้วอยู่มากในโซ่โพลิเมอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีหมู่อะมิโน ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้กับผิววัสดุที่เคลือบ และกับออกซิเจนอะตอมของหมู่คาร์บอนิลในตัวมันเองด้วย
- 4.สารเคลือบผิวโพลียูรีเทน ซึ่งมีอะโรมาติกไอโซไซยานเนตเป็นองค์ประกอบ มักจะเหลืองได้ง่ายเมื่อถูกแสงอัลตราไวโอเลต และจะเหลืองง่ายยิ่งขึ้นถ้าโมเลกุลมีกรดไขมันที่ไม่มีอิมัลชันซึ่งสามารถเกิดเป็นเปอร์ออกไซด์กับออกซิเจนได้ เชื่อกันว่าเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะไปออกซิไดส์หมู่อะโรมาติกให้ เกิดเป็นสารสีเหลือง

มีหลักฐานที่สนับสนุนข้อความข้อความที่ได้กล่าวมาแล้ว เพราะพบว่าโพลียูรีเทนที่ทำจากอะลิฟาติกไอโซไซยานเนต จะเหลืองน้อยกว่าโพลียูรีเทนที่ทำจากอะโรมาติกไอโซไซยานเนต นอกจากนี้โพลียูรีเทนจากอะลิฟาติกไอโซไซยานเนตจะทนต่อไฮโดรไลซิสในด่างและกรดได้ดีกว่า แต่จะเกิดเป็นฟิล์มได้ช้ากว่าและมีราคาแพงกว่าโพลียูรีเทนที่ทำจากอะโรมาติกไอโซไซยานเนต

การใช้งานของโพลียูรีเทน

สามารถเตรียมขึ้นในรูปแบบต่างๆดังนี้

1. โพลียูรีเทนชนิดที่ 2 ส่วน (Two-can Urethane Systems) ได้จากปฏิกิริยาระหว่างพรีโพลิเมอร์ที่มีหมู่ไอโซไซยานเนตอยู่ที่ปลายโซ่ (OCN-NCO) กับโพลิเอสเทอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ที่ปลายโซ่ (OH-OH) โพลียูรีเทนประเภทนี้ใช้ทำกาว แต่มีจุดอ่อน คือ ทำแล้วต้องใช้งานให้หมด มิฉะนั้นถ้าเหลือจะแข็งตัว
2. พรีโพลิเมอร์ที่มีไอโซไซยานเนตอิสระเป็นตัวเชื่อมขวาง (Prepolymer with free isocyanate crosslinked with a catalyst) ได้จากปฏิกิริยาระหว่างพรีโพลิเมอร์ที่มีหมู่ไอโซไซยานเนตอิสระกับตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันคือ เมทิลไดเอทานอลเอมีน
3. โพลียูรีเทนชนิด 1 ส่วนแบบอบ (One-can Urethane Stoving System) โพลียูรีเทนชนิด 2 ส่วน มีข้อยุ่งยากตรงที่จะต้องผสม 2 ส่วนเข้าด้วยกัน และจะต้องทิ้งของผสมไว้สักระยะหนึ่งก่อนจึงจะใช้งานได้ ปัจจุบันนี้สามารถทำให้เป็น 1 ส่วนได้ โดยปิด (block) หมู่ไอโซไซยานเนตด้วยฟีนอล ซึ่งจะเกิด adduct คือ ฟีนิลยูรีเทน (phenyl urethane) ที่ไม่เสถียร และจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส เกิดเป็นหมู่ไอโซไซยานเนตขึ้นมาใหม่ ดังนี้



หมู่ไอโซไซยานเนตที่เกิดขึ้นนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับโพลิเอสเทอร์ที่ใส่รวมอยู่ด้วยและในขณะเดียวกันฟีนอลที่เกิดขึ้นจะระเหยไปถ้าอบของผสมที่อุณหภูมิสูงกว่า 150 องศาเซลเซียส ในทางปฏิบัติใช้ อุณหภูมิ 160-180 องศาเซลเซียส

4. โพลียูรีเทนชนิด 1 ส่วนแบบบ่มด้วยความชื้น (One-can Moisture-cured Urethane Coatings) ประกอบด้วยพรีโพลิเมอร์ ซึ่งมีหมู่ไอโซไซยานเนตอิสระที่สามารถทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศ เกิดเป็นฟิล์มที่มีโครงสร้างแน่นอนหนา พรีโพลิเมอร์ที่ใช้โดยทั่วไป ได้แก่ โพลีเอเทอร์ซึ่งมีปลายโซ่เป็นหมู่ไอโซไซยานเนต กลไกของการเกิดปฏิกิริยาของโพลียูรีเทนประเภทนี้ คือ น้ำจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยานเนตเกิดเป็นหมู่อะมิโน ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยาต่อกับหมู่ไอโซไซยานเนตที่มีอยู่

ในพรีโพลิเมอร์ เกิดเป็นโมเลกุลที่ใหญ่กว่าเดิม สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะระเหยไปพร้อมกับตัวทำละลาย ดังนั้น หากฟิล์มหนาเกินไป จะเกิดเป็นฟอง



โพลิยูรีเทนประเภทนี้ ต้องการความชื้นสัมพัทธ์อย่างน้อยที่สุด 30 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จึงจะเกิดการบ่มได้รวดเร็วพอเพียง ซึ่งอัตราการบ่มนี้สามารถเร่งได้โดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น 0.5 เปอร์เซ็นต์ ไตรเอทิลเอมีน ลงไปด้วย

อีพอกซี เรซิน^{44,48}

อีพอกซีเรซินควรจัดเป็นโพลีเอเทอร์แต่เรียกว่าอีพอกซีเรซิน เพราะสารตั้งต้นเป็นสารจำพวกอีพอกไซด์ และมีหมู่อีพอกไซด์อยู่ในโซ่โพลิเมอร์ก่อนเกิดการเชื่อมโยง ดังนั้นอาจให้คำนิยามของอีพอกซีเรซินว่าเป็นโพลิเมอร์เชื่อมโยงซึ่งการเชื่อมโยงเกิดจากปฏิกิริยาของหมู่อีพอกซีในโซ่โพลิเมอร์ พี คาสตัน (P. Caston) ชาวสวิสเซอร์แลนด์ เป็นผู้จดทะเบียนสิทธิบัตรอีพอกซีเรซินไว้ในปี ค.ศ. 1938 หลังจากนั้นบริษัทซีบา (Ciba) ในสวิสเซอร์แลนด์ และบริษัทเดอโรและเรย์โนลด์ (Deroe & Reynolds) ในสหรัฐอเมริกาได้ผลิตเรซินนี้ออกจำหน่ายในนาม 'Epon' และได้ผลิตส่งออกนอกสหรัฐอเมริกาในนาม 'Epikote' ต่อมาในปี ค.ศ.1948 บริษัทซีบาได้ผลิตอีพอกซีเรซินออกจำหน่ายในนาม 'Araldite'

อีพอกซีเรซิน เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างได- หรือโพลีไฮดรอกฟีนอน และอีพิฮาโลไฮดริน (epihalohydrin) โพลีไฮดรอกฟีนอนที่ใช้กันมาก ได้แก่ บิสฟีนอล-เอ (bisphenol-A) สำหรับอีพิฮาโลไฮดรินที่สำคัญในทางการค้า คือ อีพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin)

สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์

อีพอกซีเรซินส่วนใหญ่ใช้เป็นวัสดุเคลือบผิว เพราะมีความทนทานต่อเคมีภัณฑ์ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อด่างทั้งหลาย มีสมบัติเหนียว ยึดหยุ่นได้มีความสามารถในการยึดเหนี่ยวหรือเกาะติด(adhesion)วัสดุทั่วไปเป็นอย่างดี เพราะสายโซ่โพลิเมอร์ที่มีปริมาณของหมู่ที่มีขั้วสูง นอกจากนี้การที่มีหมู่ ไฮดรอกซิลอยู่ห่างกัน อย่างเป็นระเบียบในโมเลกุล จะทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนได้ดี เป็นผลให้มีแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่สูง และเลื้อยต่อปฏิกิริยาทั่วไป อีพอกซีเรซิน มีความแข็งแรงและอ่อนตัวไม่เปราะ การที่โมเลกุลมีหมู่อะโรมาติกอยู่บนโซ่ทำให้โซ่แข็ง และการที่มีหมู่อีพอกซีและหมู่ไฮดรอกซิลที่มีอยู่ในโมเลกุล ทำให้อีพอกซีเรซินสามารถเกิดโพลิเมอร์เซชัน หรือเกิดการบ่มต่อไป ทำให้ได้เป็นโครงสร้าง 3 มิติ ที่แข็งแรงทนทานและใช้ประโยชน์ได้ดี

ตัวทำละลาย⁴⁸ (Solvents)

ตัวทำละลาย คือ ของเหลวที่ระเหยได้ซึ่งใช้เพื่อละลายสารยึดที่เป็นของแข็งหรือที่มีความหนืดสูงให้ได้เป็นเนื้อเดียว กระบวนการการละลายของโพลิเมอร์เกิดเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 เมื่อผสมโพลิเมอร์และตัวทำละลายเข้าด้วยกันแล้ว โมเลกุลของตัวทำละลาย จะซึมซาบหรือแพร่เข้าหาโมเลกุลของโพลิเมอร์อย่างช้าๆ ทำให้โมเลกุลของโพลิเมอร์ขยายตัวออก เกิดการบวม (swelling) โดยการดูดซึมเอาตัวทำละลายเข้าไว้ ขั้นตอนที่ 2 โพลิเมอร์ที่บวมตัวแล้วนี้จะขยายตัวออกไปอีกจนกระทั่งถึงจุดที่รับตัวทำละลายมากขึ้นจนทำให้สายโซ่ของโพลิเมอร์สามารถเลื่อนไถลผ่านกันไปได้ เกิดการผสมที่เป็นของเหลว คือ มีการละลายเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์

โทลูอิน เป็นตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนแบบวงที่มีโครงสร้างเป็นวงเบนซิน โทลูอินมีจุดเดือดเท่ากับ 111 องศาเซลเซียส และมีค่าอัตราการระเหยที่ได้จากการทดลอง เท่ากับ 1.95 ในขณะที่อัตราการระเหยของนอร์มอล-บิวทิลอะซิเตตเท่ากับ 1 ซึ่งหมายความว่า โทลูอินจะระเหยเร็วกว่านอร์มอล-บิวทิลอะซิเตต 1.95 เท่า

สมัยก่อนได้โทลูอินจากน้ำมันดิบ (coal tar) เป็นส่วนใหญ่ แต่เนื่องจากปัจจุบัน ความต้องการใช้ตัวทำละลายดังกล่าวในอุตสาหกรรมสูงมาก จึงได้มีโรงงานอุตสาหกรรมเคมีคิดค้นวิธีการผลิตตัวทำละลายดังกล่าวนี้จากน้ำมันปิโตรเลียม และทำให้ปัจจุบันนี้ตัวทำละลายดังกล่าวได้มาจากน้ำมันปิโตรเลียมมากกว่าจากน้ำมันดิบ

สำหรับโทลูอิน เป็นพิษน้อยกว่าเบนซิน และอัตราการระเหยก็เกินไปโดยเหมาะสม ดังนั้นจึงนิยมใช้โทลูอินเป็นตัวทำละลายสำหรับเรซินสังเคราะห์บางตัว

ในการวิเคราะห์เพื่อหา กลุ่มฟังก์ชันนัล (functional group) หรือหาแนวโน้มชนิดของสารไม่ว่าจะเป็นสารละลาย ของแข็ง หรือ ก๊าซ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ด้วย FTIR

โฟเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)^{50,51}

แสงอินฟราเรดเป็นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ที่มีความยาวคลื่น (wavelength) อยู่ระหว่างแสงที่มองเห็น และไมโครเวฟ แสงอินฟราเรดนี้จะให้พลังงานน้อยกว่าแสงอุลตราไวโอเล็ต แต่ให้ความรู้ในการศึกษาถึง กลุ่มฟังก์ชันนัล ในโมเลกุลของสารได้ดีกว่าแสงอุลตราไวโอเล็ต แสงอินฟราเรดที่ใช้มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.78–1,000 μm หรือมีเลขคลื่น (wavenumber) อยู่ระหว่าง 12,800–10 cm^{-1} แต่ช่วงความยาวคลื่นที่ใช้ในการศึกษาทั่วไปจะมีความยาวคลื่นในช่วง 2.5–25 μm (4,000 – 400 cm^{-1}) แสงอินฟราเรดนี้พบครั้งแรกในปี ค.ศ.1800 โดย Sir William Herschel นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษซึ่งเป็นผู้ได้รับการยกย่องว่าเป็นบิดาแห่งวิชาดาราศาสตร์ยุคใหม่ Herschel ได้ศึกษาเกี่ยวกับ heating effect ในช่วงต่างๆ

ของสเปคตรัม โดยพบว่า heating effect มีมากที่สุดแถบของสเปคตรัมที่ปลายสีแดง (red end) ไปแล้ว จากการค้นพบนี้เองได้มีการคิดประดิษฐ์ลำแสงนี้ขึ้นมา โดยในช่วงปลายของศตวรรษที่ 18 เริ่มมีการศึกษาอินฟราเรดสเปคตรัมมากขึ้น และในปี ค.ศ.1910 William W Coblentz ได้ศึกษาการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของสารบริสุทธิ์ต่างๆ และได้สร้างความสัมพันธ์ของอินฟราเรดสเปคตรัมกับโครงสร้างของสารขึ้น ซึ่งยังคงใช้อยู่จนกระทั่งปัจจุบันนี้ ในปี ค.ศ.1939-1945 ได้มีการศึกษาและนำอินฟราเรดสเปคโตรสโกปีไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ของผสมพวกไฮโดรคาร์บอนและสารในกลุ่มที่ใกล้เคียงกันได้ดังมีผู้วิจัยด้านนี้มากขึ้นทั้งเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ และเครื่องวัดที่มีสภาพไวสูงๆ อินฟราเรดสเปคโตรสโกปีเป็นเทคนิคอย่างหนึ่งใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ พิสูจน์ และศึกษาเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร นอกจากนี้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของสารก็นำมาใช้อย่างกว้างขวางเพิ่มขึ้น ทั้งทางด้านเภสัชกรรมและอุตสาหกรรม และทางทันตกรรม เช่น การศึกษาหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ แอซิดและเบส ของกลาสไอโอโนเมอร์ ซีเมนต์ เป็นต้น จากการที่กล่าวมาไว้จะเกี่ยวเนื่องช่องปากที่ประดิษฐ์ด้วยซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ นั้น จำเป็นต้องบูรณาการด้วยแผ่นโพลียูรีเทน เนื่องจาก ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ มีคุณสมบัติเฉพาะตัว คือ ไม่เชื่อมยึดกับแผ่นโพลียูรีเทนได้โดยตรง จำเป็นต้องใช้สารเชื่อมที่เรียกว่า ไพรเมอร์ จากการศึกษานี้ของ จารุมาและคณะ พบว่าไพรเมอร์ 1205 เหมาะที่จะใช้กับซิลิโคน ชนิดไตรอะซีโทกซีไซเลน (triacetoxysilane) แต่เนื่องจากไพรเมอร์ 1205 เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท ดาวคอร์นิง ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีราคาแพง และอายุการเก็บรักษาค่อนข้างสั้น ขณะที่หน่วยบูรณะช่องปากและใบหน้า เป็นหน่วยงานที่ให้การรักษาแก่ผู้ป่วยที่มีความพิการ ซึ่งส่วนมากเป็นผู้ที่มีฐานะยากจน และด้อยโอกาสทางสังคม แต่ผู้ป่วยเหล่านี้จำเป็นต้องได้รับการรักษา โดยการใส่อวัยวะเทียม เพื่อให้สามารถดำรงชีวิตอยู่ในสังคมได้อย่างปกติสุข ดังนั้นหากสามารถพัฒนาสารเชื่อม โดยอาศัยสารเคมีที่มีอยู่ในท้องตลาดของเมืองไทยให้ได้สารเชื่อมที่มีประสิทธิภาพทัดเทียมสารเชื่อมที่นำเข้าจากต่างประเทศ ก็จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ป่วยของประเทศไทยต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

ศึกษาความต้านทานต่อการลอกออกของแผ่นโพลียูรีเทน กับซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เมื่อใช้สารไพโรเมอร์ที่พัฒนาขึ้นใหม่ การศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการวิจัยนำร่องเพื่อหาแนวโน้มนองค้ประกอบของสาร3ชนิดได้แก่ ไพโรเมอร์ 1205 ไรพอกซี และสารบ่ม และหาค่าความต้านทานต่อการลอกออกของแผ่นโพลียูรีเทน กับซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เมื่อใช้ ไรพอกซีและไรรพอกซีที่ละลายในโทลูอินในความเข้มข้นต่างๆ ส่วนการศึกษาในตอนที 2 เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาความต้านทานต่อการลอกออกของแผ่นโพลียูรีเทน กับซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เมื่อใช้สารไพโรเมอร์ที่พัฒนาขึ้นใหม่เปรียบกับการใช้ ไพโรเมอร์ 1205 เป็นสารเชื่อม

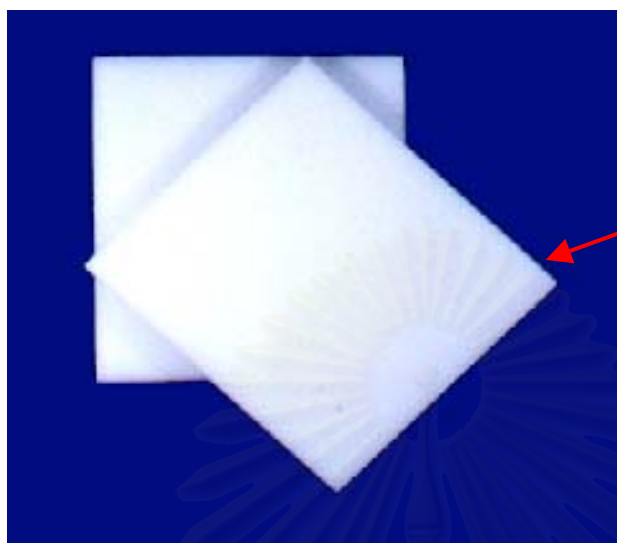
วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การวิเคราะห์สารเชื่อม

นำสารไพโรเมอร์ 1205 (Dow Corning Corporation, Midland, USA.) สารไรรพอกซีและสารบ่ม (Showa Highpolymer Co., Ltd, Japan) ไปวิเคราะห์เพื่อหาแนวโน้มนองค้ประกอบของสารด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สารโพเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปคโตรมิเตอร์ (Bruker South East Asia, Vector 33, Germany)

การเตรียมแบบพลาสติก

ในวิจัยนำร่องได้เตรียมแบบหล่อยิปซัมครึ่งล่างของภาชนะทองเหลืองโดยนำแผ่นพลาสติกขนาด $6 \times 6.5 \times 0.5$ เซนติเมตร (กว้าง \times ยาว \times หนา) หนึ่งแผ่นส่วนในการวิจัยตอนที่ 2 ได้เปลี่ยนวิธีการในการเตรียมแบบหล่อยิปซัมครึ่งล่างของภาชนะทองเหลืองโดยนำแผ่นพลาสติกขนาด $6 \times 6.5 \times 0.5$ เซนติเมตร (กว้าง \times ยาว \times หนา) ดังรูปที่ 1 จำนวน 2 แผ่นประกบเข้าด้วยกันเพื่อเป็นการเพิ่มความลึกของเบ้ายิปซัม ทำการบุงอบโดยรอบของแผ่นพลาสติกด้วยขี้ผึ้งสีชมพูหนา 1 มิลลิเมตร เพื่อให้ง่ายต่อการแกะออกจากยิปซัม ยึดเครื่องมือวัดระดับ (Torpedo Level, Taiwan) จำนวน 2 ชิ้นเข้าด้วยกันโดยใช้แถบกาวยาส (บริษัท 3 เอ็ม ประเทศไทย) จากนั้นนำแผ่นพลาสติกที่เตรียมไว้มายึดติดกับขอบล่างของเครื่องมือวัดระดับ โดยใช้แถบกาวยาสยึดระหว่างขอบด้านข้างของเครื่องมือวัดระดับกับผิวหน้าด้านบนบนของแผ่นพลาสติก

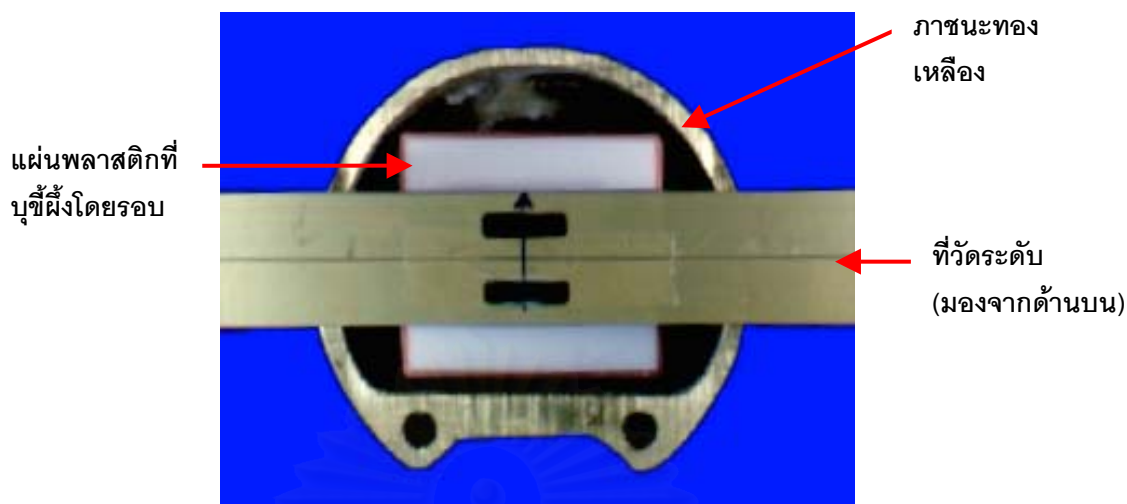


แผ่นพลาสติกที่ใช้ทำ
แม่แบบเข้ายิปซัม

รูปที่ 1 แผ่นพลาสติกขนาด $6 \times 6.5 \times 0.5$ เซนติเมตร (กว้าง \times ยาว \times หนา) สำหรับใช้เป็นแม่แบบในการทำเข้ายิปซัม

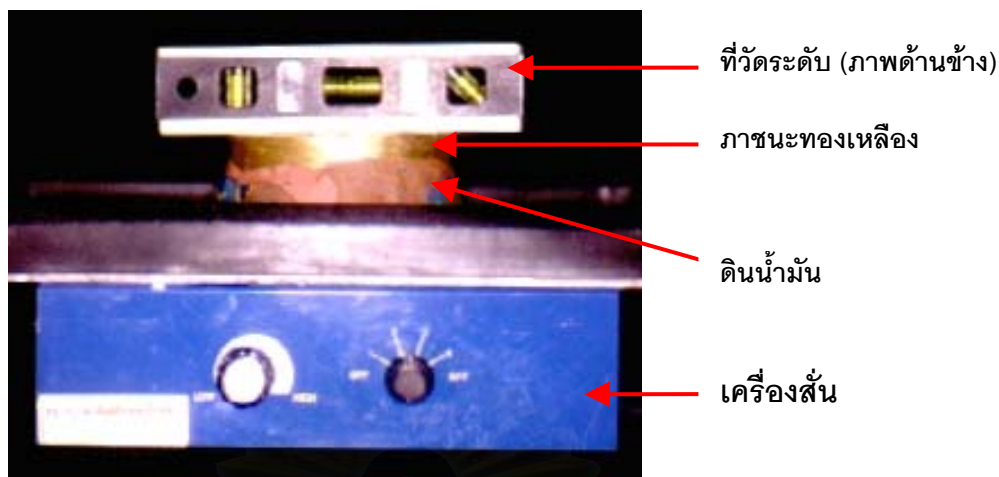
วิธีการสร้างผิวหน้าของแผ่นพลาสติกและขอบด้านบนของภาชนะทองเหลืองให้ขนานกับแนวระนาบ

นำแผ่นพลาสติกที่ถูกยึดเข้ากับเครื่องวัดระดับไปลงในภาชนะทองเหลืองครึ่งล่างเพื่อเฉลี่ยระยะทางระหว่างขอบโดยรอบของแผ่นพลาสติกและขอบด้านบนของภาชนะทองเหลืองให้ได้ระยะทางที่ใกล้เคียงกัน พร้อมทั้งทำเครื่องหมายที่ขอบด้านบนของภาชนะทองเหลืองตามแนวการพาดผ่านของเครื่องมือวัดระดับ โดยใช้ปากกาสีเคมีชนิดไม่ละลายน้ำ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การกำหนดตำแหน่ง ในภาชนะทองเหลือง แผ่นพลาสติกจะถูกนำมายึดติดกับที่วัดระดับ และนำไปลงในภาชนะทองเหลืองเพื่อเฉลี่ยระยะทางขอบของแผ่นพลาสติกมิให้ชิดกับขอบของภาชนะทองเหลืองที่มุมใดมุมหนึ่งมากเกินไป เมื่อได้ตำแหน่งที่เหมาะสมแล้วก็ทำเครื่องหมายกำกับไว้

นำส่วนครึ่งล่างของภาชนะทองเหลืองวางบนเครื่องสั่น โดยใช้ดินน้ำมันรองฐานภาชนะทองเหลืองไว้ นำแผ่นพลาสติกที่ถูกยึดเข้ากับเครื่องวัดระดับไปลงในภาชนะทองเหลืองอีกครั้ง โดยให้ที่วัดระดับอยู่ตรงกับเครื่องหมายที่ทำไว้บนขอบภาชนะทองเหลืองและปรับภาชนะทองเหลืองจนกระทั่งฟองอากาศในหลอดแก้วของเครื่องมือวัดระดับอยู่ตรงกลางระหว่างขีดพอดี ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การปรับระดับให้ขอบภาชนะทองเหลืองขนานกับแนวระนาบ นำดินน้ำมันมารองไว้ใต้ภาชนะทองเหลืองซึ่งวางอยู่บนเครื่องสั่นและปรับระดับให้ขอบของภาชนะทองเหลืองขนานกับแนวระนาบ โดยใช้ที่วัดระดับเป็นตัวบอก

จากนั้นนำแผ่นพลาสติกที่ถูกยึดเข้ากับเครื่องวัดระดับออกจากภาชนะทองเหลือง

วิธีการลงยิปซัมในภาชนะทองเหลืองครึ่งบนและครึ่งล่าง

ผสมยิปซัม (Vel-mix die stone, Kerr Corporation, Romulus, U.S.A.) อัตราส่วนผงยิปซัม 100 กรัมต่อน้ำ 23 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องผสมสุญญากาศ (Vacuum mixer, J Morita Corporation, Japan) แล้วเทลงในภาชนะทองเหลืองครึ่งล่างที่วางอยู่บนเครื่องสั่น (vibrator) จนเต็ม จากนั้นนำแผ่นพลาสติกที่ถูกยึดด้วยเครื่องวัดระดับ วางลงในตำแหน่งเดิม โดยใช้เครื่องหมายที่ทำไว้ที่ขอบของภาชนะทองเหลืองเป็นตัวกำหนด กดให้แผ่นพลาสติกจมลงในยิปซัม โดยที่ขอบด้านล่างของเครื่องวัดระดับยังแตะสัมผัสกับขอบด้านบนของภาชนะทองเหลือง ฟองอากาศในหลอดแก้วของเครื่องมือวัดระดับยังคงอยู่ตรงกึ่งกลางระหว่างขีด ตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง เพื่อให้ยิปซั่มก่อตัวสมบูรณ์ จากนั้นทำการขัดแต่งผิวหน้าของยิปซัมให้เรียบด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 1000 ทาสารคั้นกลาง ที่ ยิปซัม ในทิศทางเดียวกันให้ทั่วจำนวนหนึ่งรอบ ประกบภาชนะทองเหลืองส่วนครึ่งบนเข้ากับส่วนครึ่งล่าง ผสมยิปซัมวิธีเดิมเทลงในภาชนะทองเหลืองจนเต็ม และอัดด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิก (Kavo type 5518 EWL, Kavo, Germany) ที่วัดแรงดันได้ 100 บาร์ ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นแยกภาชนะทองเหลืองครึ่งบนและล่างออกจากกัน นำไปไล่สีผสมพูน้ำเดือด เพื่อให้ง่ายต่อการแกะแผ่นพลาสติกออกจากยิปซัม

วิธีการทำความสะอาดเบ้ายิปซัม

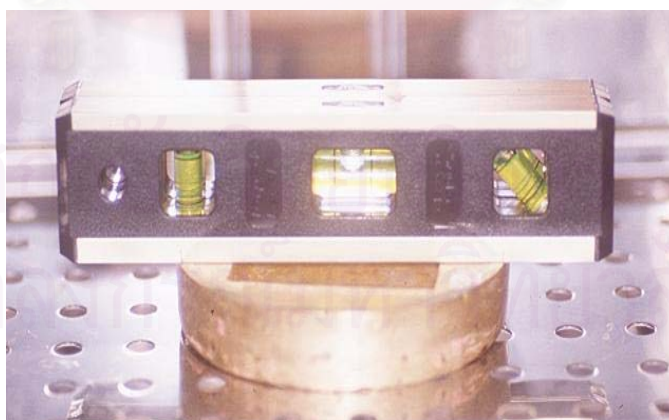
ทำความสะอาดเบ้ายิปซัมให้ปราศจากไขขี้ผึ้งโดยใช้น้ำเดือดรดทำความสะอาดเบ้ายิปซัมอีกครั้งด้วยผ้าก๊อชชุบอะซีโตน (บริษัท วิทยากร จำกัด กรุงเทพมหานคร) หมาดๆ เช็ดไปในทิศทางเดียวกัน 1 รอบ ทิ้งไว้ 10 นาที ทาสารคั่นกลาง (GMS De Trey[®], Dentsply Limited, Surrey, England) ที่เบ้ายิปซัมในทิศทางเดียวกันให้ทั่วจำนวน 1 รอบ

วิธีการอบเบ้ายิปซัมครึ่งล่างก่อนขึ้นรูปแผ่นโพลีเอทิลีน

นำเบ้ายิปซัมในภาชนะทองเหลืองครึ่งล่างเข้าสู่ตู้อบความร้อน (Memmert Co, GmbH, Germany) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ยิปซัมแห้งสนิท จากนั้นนำเบ้ายิปซัมออกจากตู้อบและตั้งทิ้งไว้ให้เย็น ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที

วิธีการขึ้นรูปแผ่นโพลีเอทิลีนจากโพลีเอทิลีนเหลว

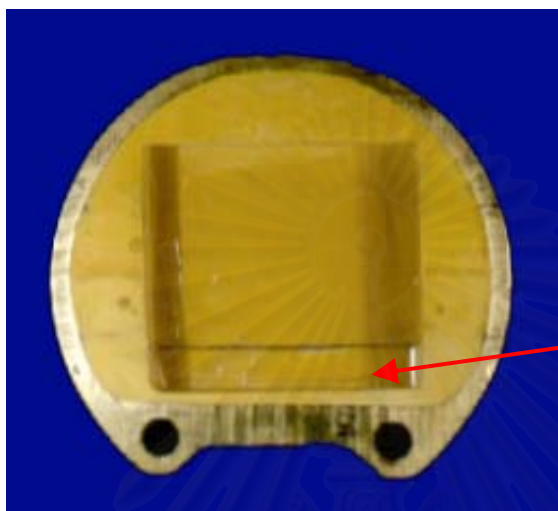
นำภาชนะทองเหลืองครึ่งล่างวางบนเครื่องชั่ง (AND FP 6000, A&D Company Ltd. Tokyo, Japan) ตั้งมาตรวัดที่หน้าปัดให้เท่ากับ 0.00 กรัม แล้วจึงเทโพลีเอทิลีนเหลว (Sunny Jin Industrial Co. Inchon, Korea.) ลงในเบ้ายิปซัมให้ได้น้ำหนัก 20.00 กรัม นำภาชนะทองเหลืองวางบนเครื่องชั่งเพื่อให้โพลีเอทิลีนแผ่นจืดเต็มเบ้า และนำเข้าตู้อบโดยใช้เครื่องมือวัดระดับวาง ณ ตำแหน่งที่ได้ทำเครื่องหมายไว้และปรับให้ขอบภาชนะทองเหลืองขนานกับแนวระนาบ อบโพลีเอทิลีนเหลวไว้ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 70 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การอบโพลีเอทิลีนเหลว โพลีเอทิลีนเหลว ซึ่งถูกเทลงในเบ้ายิปซัม จะถูกอบในตู้อบควบคุมอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง โดยปรับให้ภาชนะทองเหลืองอยู่ในแนวระนาบ

วิธีการสร้างรอยแยกระหว่างแผ่นโพลีเอทิลีนกับชั้นซิลิโคน

เมื่อโพลีเอทิลีนบ่มตัวสมบูรณ์ ใช้เทปกาว (บริษัท 3 เอ็ม ประเทศไทย) ที่มีความ กว้าง 1 เซนติเมตร ปิดทับลงบน แผ่นโพลีเอทิลีนตามแนวความกว้างดังรูปที่ 5



แถบกาวใสที่ปิดทับอยู่
บนแผ่นโพลีเอทิลีน

รูปที่ 5 แสดงโพลีเอทิลีนที่มีแถบกาวใสติดอยู่ เมื่อโพลีเอทิลีนบ่มตัวสมบูรณ์แล้วนำแถบกาวใสขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร ปิดทับลงบนแผ่นโพลีเอทิลีนตามแนวกว้าง (แนวเส้นสีน้ำเงิน)

วัตถุประสงค์เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศซึมผ่านสัมผัสกับสารเชื่อมและใช้ส่วนนี้ เป็นที่จับยึดขึ้นทดสอบเข้ากับเครื่องวัดลอยด์ทำความสะอาดผิวหน้าของโพลีเอทิลีนโดยใช้ผ้าก๊อชชุบสารละลาย 1, 1, 1 ไตรคลอโรเอเทน (บริษัท วิทยาศาสตร์จำกัด กรุงเทพมหานคร) ในลักษณะหมาดๆ เช็ดลงบนผิวหน้าของโพลีเอทิลีนในแนวยาวจนทั่ว 1 รอบ และ ทิ้งไว้ 10 นาที เพื่อให้แห้งสนิท จากนั้นใช้ผ้าก๊อชชุบใหม่ชุบสารละลาย 1, 1, 1 ไตรคลอโรเอเทนในลักษณะหมาดๆ เช็ดลงบนผิวหน้าของโพลีเอทิลีนในแนวกว้างจนทั่ว 1 รอบและทิ้งไว้ 10 นาที เพื่อให้สารละลาย 1, 1, 1 ไตรคลอโรเอเทน แห้งสนิท

ชนิดของสารเชื่อมที่ใช้

ในการวิจัยนำร่องใช้สารเชื่อมเป็น สารไรพอกซี (Showa Highpolymer Co., Ltd, Japan) ที่ผสมด้วยสารบ่มในปริมาณร้อยละหนึ่งและสารไรพอกซีที่ผสมด้วยสารบ่มในปริมาณร้อยละหนึ่ง ที่ละลายในโทลูอิน (บริษัท วิทยาศาสตร์จำกัด กรุงเทพมหานคร) ในอัตราส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 2:1 1:1 1:2 1:4 1:8 ส่วนในการวิจัยตอนที่ 2 กลุ่มควบคุมใช้ ไพรเมอร์ 1205 ส่วนกลุ่มทดลองใช้ สารไรพอกซีที่ผสมด้วยสารบ่มในปริมาณร้อยละหนึ่งและสารไรพอกซีที่ผสมด้วยสารบ่มในปริมาณร้อยละหนึ่งที่ละลายในโทลูอินในอัตราส่วน โดยปริมาตรเท่ากับ 2:1ตามลำดับ

การเตรียมสารไรพอกซีสำหรับเป็นสารเชื่อม

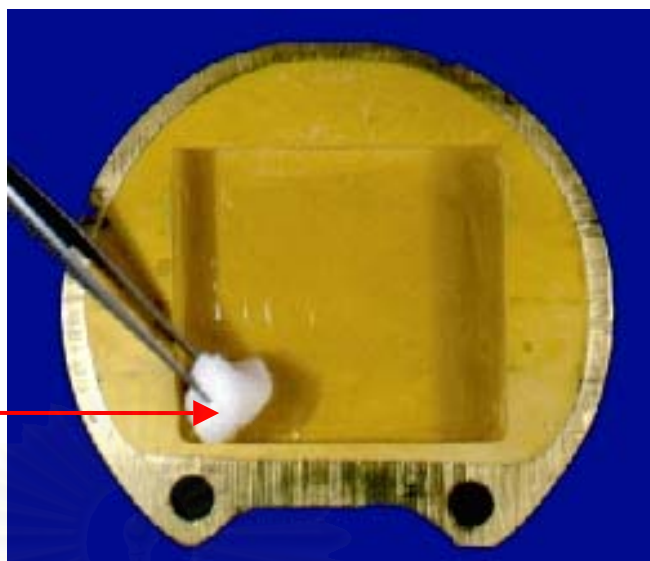
การเตรียมสารไรพอกซีที่ผสมสารบ่มในปริมาณร้อยละหนึ่งของปริมาตรทำได้โดย ใช้ปีเปตดูดสารไรพอกซีเป็นปริมาตร 10 มิลลิลิตรใส่ลงในบีกเกอร์ และใช้ปีเปตใหม่ดูดสารบ่มสารเป็น ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรใส่ลงในบีกเกอร์ ใช้แท่งแก้วกวนจนสารทั้งสองผสมกันสมบูรณ์

การเตรียมสารไรพอกซีที่ผสมสารบ่มในปริมาณร้อยละหนึ่งของปริมาตรละลายใน โทลูอิน ในอัตราส่วนโดยปริมาตรไรพอกซีต่อโทลูอินเท่ากับ 2:1 ทำได้โดย ใช้ปีเปตดูดสารไรพอกซีเป็น ปริมาตร 20 มิลลิลิตรใส่ลงในบีกเกอร์ และใช้ปีเปตใหม่ดูดสารบ่ม 0.2 มิลลิลิตรใส่ลงในบีกเกอร์ ใช้แท่งแก้วกวนจนสารทั้งสองผสมกันสมบูรณ์ จากนั้นใช้ปีเปตใหม่ดูดสารไรพอกซีที่ผสมสารบ่มแล้ว เป็นปริมาตร 5 มิลลิลิตรผสมกับสารโทลูอินปริมาตร 2.5 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ใหม่ใช้แท่งแก้วกวน จนสารทั้งสองผสมกันสมบูรณ์ ส่วนการเตรียมสารไรพอกซีที่ผสมสารบ่มในปริมาณร้อยละหนึ่งของ ปริมาตรละลายในโทลูอินในอัตราส่วนโดยปริมาตรไรพอกซีต่อโทลูอินเท่ากับ 1:1 1:2 1:4 ทำได้ โดยวิธีการข้างต้นเพียงแต่เปลี่ยนการผสมสาร โทลูอินจาก 2.5 มิลลิลิตรเป็น 5 , 10, 20 ตามลำดับ

วิธีการทาเชื่อมลงบนแผ่นโพลีเอทิลีน

ใช้ผ้าก๊อชขนาด 6 × 6 เซนติเมตร (กว้าง × ยาว) พับทบกันทีละครึ่ง จนได้ผ้าก๊อชที่มี ขนาดเล็กลงเท่ากับ 1.5 × 1.5 เซนติเมตร ใช้คีมคีบผ้าก๊อชชุบสารไพรเมอร์ 1205 (Dow Corning 1205 primer coat, Dow Corning corporation, Midland, USA.) ที่เทออกจากภาชนะบรรจุ ลงในถ้วย แก้วที่สะอาด นำผ้าก๊อชที่ชุบด้วยสารไพรเมอร์ 1205 ที่อยู่ในลักษณะหมาดๆ ทาบนแผ่นโพลีเอทิลีน ตามแนวยาวจนทั่ว 1 รอบและใช้ผ้าก๊อชชิ้นใหม่ชุบไพรเมอร์ 1205 ในลักษณะหมาดๆ ทาตามแนว กว้างให้ทั่วอีก 1 รอบ ดังรูปที่ 6 และตั้งไว้ในตู้อบที่ตั้งอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต ส่วนสารเชื่อมที่เป็น ไรพอกซี และ ไรพอกซีที่ละลายด้วยโทลูอิน ใน ระดับความเข้มข้นต่างให้ใช้วิธีการทาเช่นเดียวกับการทาไพรเมอร์ 1205 เพียงแต่ต้องตั้งไว้ในตู้อบที่ ตั้งอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

ผ้าก๊อชชุบสารเชื่อม
 หนาๆที่ทาลงบนแผ่นโพลี
 ยูรีเทน



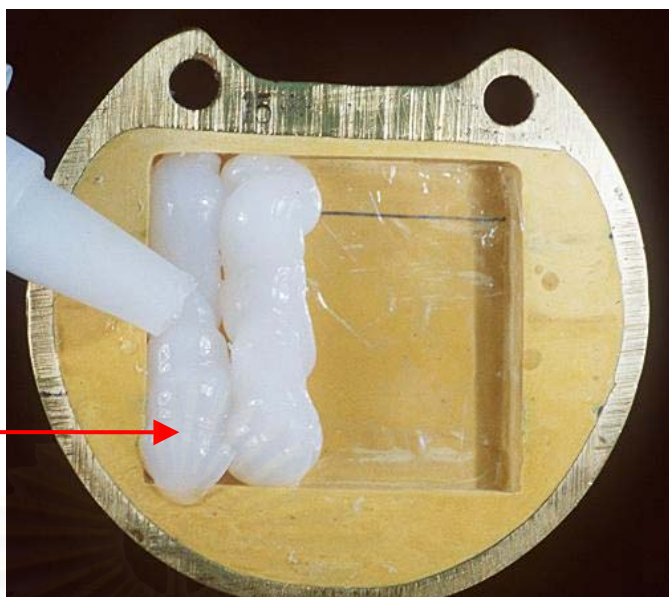
รูปที่ 6 การทาสารเชื่อมลงบนแผ่นโพลียูรีเทน ใช้ผ้าก๊อชชุบสารเชื่อมให้หนาๆและทาลงบนแผ่นโพลียูรีเทน ในทิศทางเดียวกันจนทั่วทั้งแผ่น

วิธีการขึ้นรูปซิลิโคน อีลาสโตเมอร์เพื่อให้เชื่อมยึดกับแผ่นโพลียูรีเทน

ตัดปลายหัวฉีดของกระบอกซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ที่ระดับข้อที่ 3 ซึ่งจะทำได้รูปเปิดของหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ฉีดซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ (Bayer and Bayer, Germany) ลงบนแผ่นโพลียูรีเทนที่อยู่ในเบ้ายิปซัมตามแนวยาว จำนวน 6 แถว ดังรูปที่ 7 แล้วนำภาชนะแบบหล่อทองเหลืองครึ่งบนประกบเข้ากับครึ่งล่าง จะมีซิลิโคนที่มาก เกินพอไหลออกมา นำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ที่วัดค่าแรงดันได้ 100 บาร์ ทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และภาชนะทองเหลืองออกจากกันจะได้ชิ้นงานที่เป็นแผ่นโพลียูรีเทนยึดอยู่กับชิ้นซิลิโคนอีลาสโตเมอร์เว้นแต่ส่วนที่ปิดด้วยแถบกาวใส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์
ที่ยังไม่บวมตัว

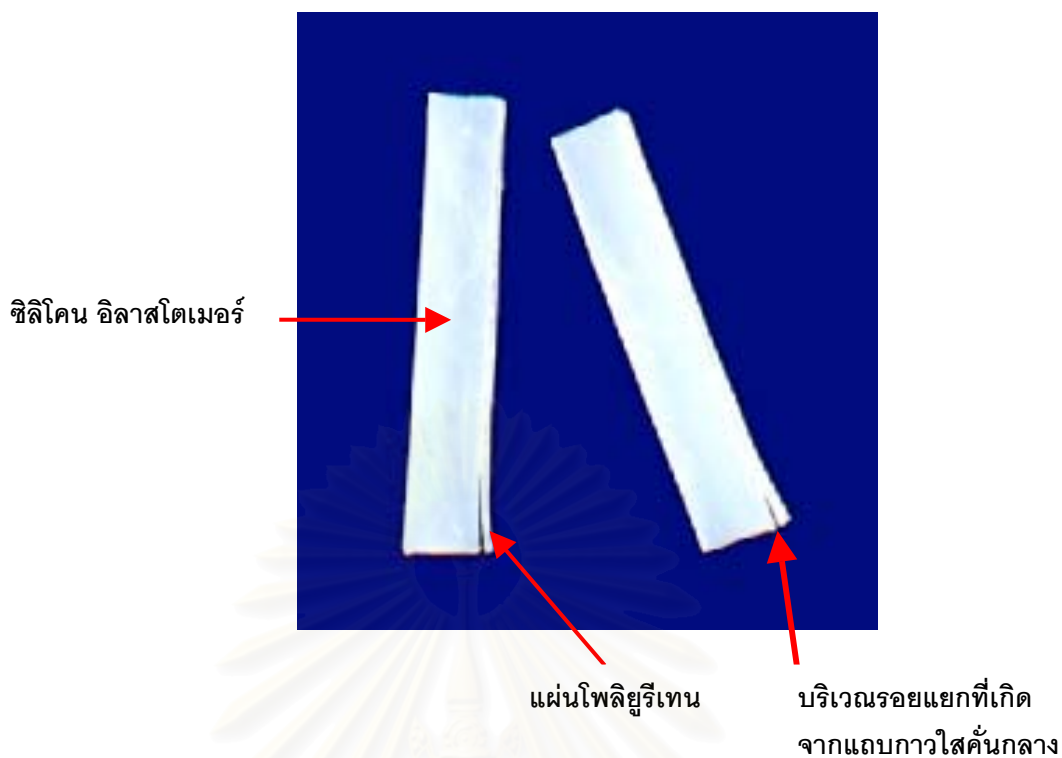


รูปที่ 7 การฉีดซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ซิลิโคนถูกฉีดออกจากหัวฉีดที่เปิดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร โดยฉีดลงบน แผ่นโพลียูรีเทนที่ทาสารเชื่อมแล้วตามแนวยาวจำนวน 6 แถว

วิธีการตัดชิ้นทดสอบ

จากนั้น นำชิ้นงานไปตัดด้วยมีดคมกริบ (NT Cutter, Osaka, Japan) โดยลงมีดจากทางแผ่นโพลียูรีเทนไปหาด้านที่เป็นเนื้อซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ให้เป็นชิ้นที่มีขนาดตาม เอเอสทีเอ็ม ดี 1876-72 (American Society for Testing Materials: ASTM D 1876-72) คือมีขนาด กว้าง 0.5 เซนติเมตร ยาว 6.5 เซนติเมตร ดังรูป 8 โดยกำกับหมายเลขที่ชิ้นทดสอบตามลำดับการตัด

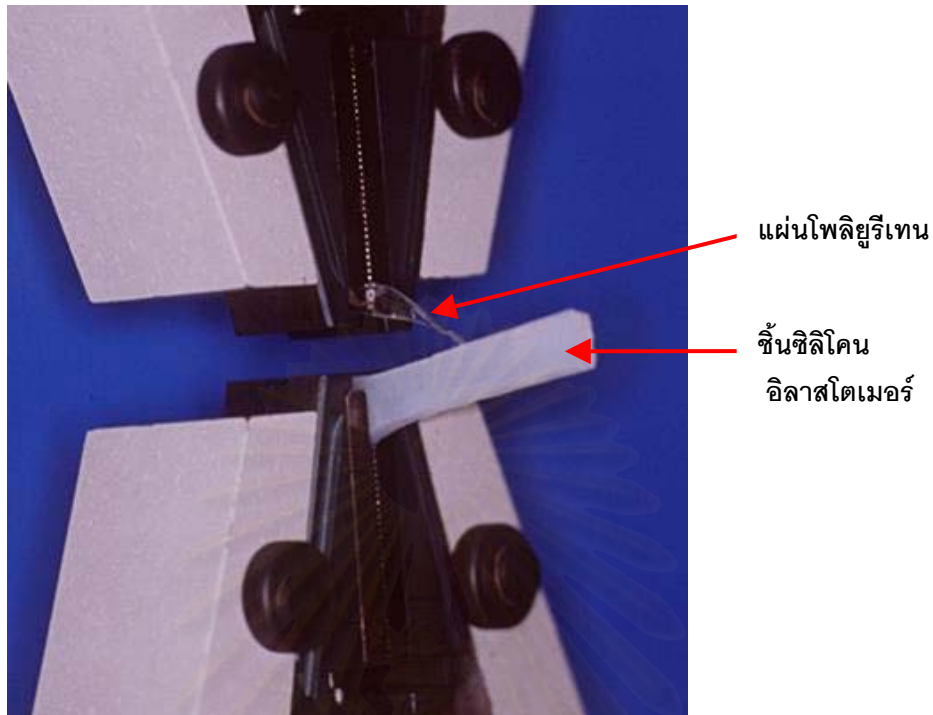
การวิจัยตอนที่ 2 จะได้ชิ้นทดลองทั้งหมด 90 ชิ้น โดยมีกลุ่มต่างๆ ดังนี้ กลุ่มควบคุม คือกลุ่มที่ใช้ไพรเมอร์ 1205 จำนวน 30 ชิ้น กลุ่มทดสอบสารไรพอกซีที่ผสมสารบ่มในปริมาณร้อยละหนึ่งของปริมาตร จำนวน 30 ชิ้น กลุ่มทดสอบสารไรพอกซีที่ผสมสารบ่มในปริมาณร้อยละหนึ่งของปริมาตรละลายในโทลูอีนในอัตราส่วนโดยปริมาตรไรพอกซีต่อโทลูอีนเท่ากับ 2:1 จำนวน 30 ชิ้น



รูปที่ 8 ชิ้นทดสอบซึ่งมีโพลีเอทิลีนยึดติดกับซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ แต่ละชิ้นมีขนาดตามมาตรฐานของ ASTM D 1876-72 คือ กว้าง 5 มิลลิเมตร ยาว 6.5 มิลลิเมตร

การทดสอบความต้านทานต่อการลอกออกระหว่างแผ่นโพลีเอทิลีนกับชิ้นซิลิโคน อีลาสโตเมอร์

นำชิ้นทดสอบไปหาค่าความต้านทานต่อการลอกออก โดยใช้เครื่องวัดลดยด์รุ่นแอลอาร์ 10 เค (Lloyd Universal Testing Machines Model LR 10 K, England) ด้วยโหลดเซลล์ (Load cell) 100 นิวตัน และครอสเฮดสปีด (cross head speed) เท่ากับ 25.4 เซนติเมตร ต่อนาทีดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงการทดสอบหาความต้านทานต่อการลอกออกโดยใช้เครื่องวัด ลอยด์ รุ่น แอลอาร์ 10 เค ด้วย โหลดเซลล์ (Load cell) 100 นิวตัน และครอสเฮดสปีด (cross head speed) เท่ากับ 25.4 เซนติเมตร ต่อนาที

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำผลการทดสอบซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยแรงดึงที่ใช้ลอกแผ่นโพลียูรีเทนออกจากซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตัน ไปคำนวณทางสถิติ ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว โดยกำหนด ระดับนัยสำคัญที่ 0.05

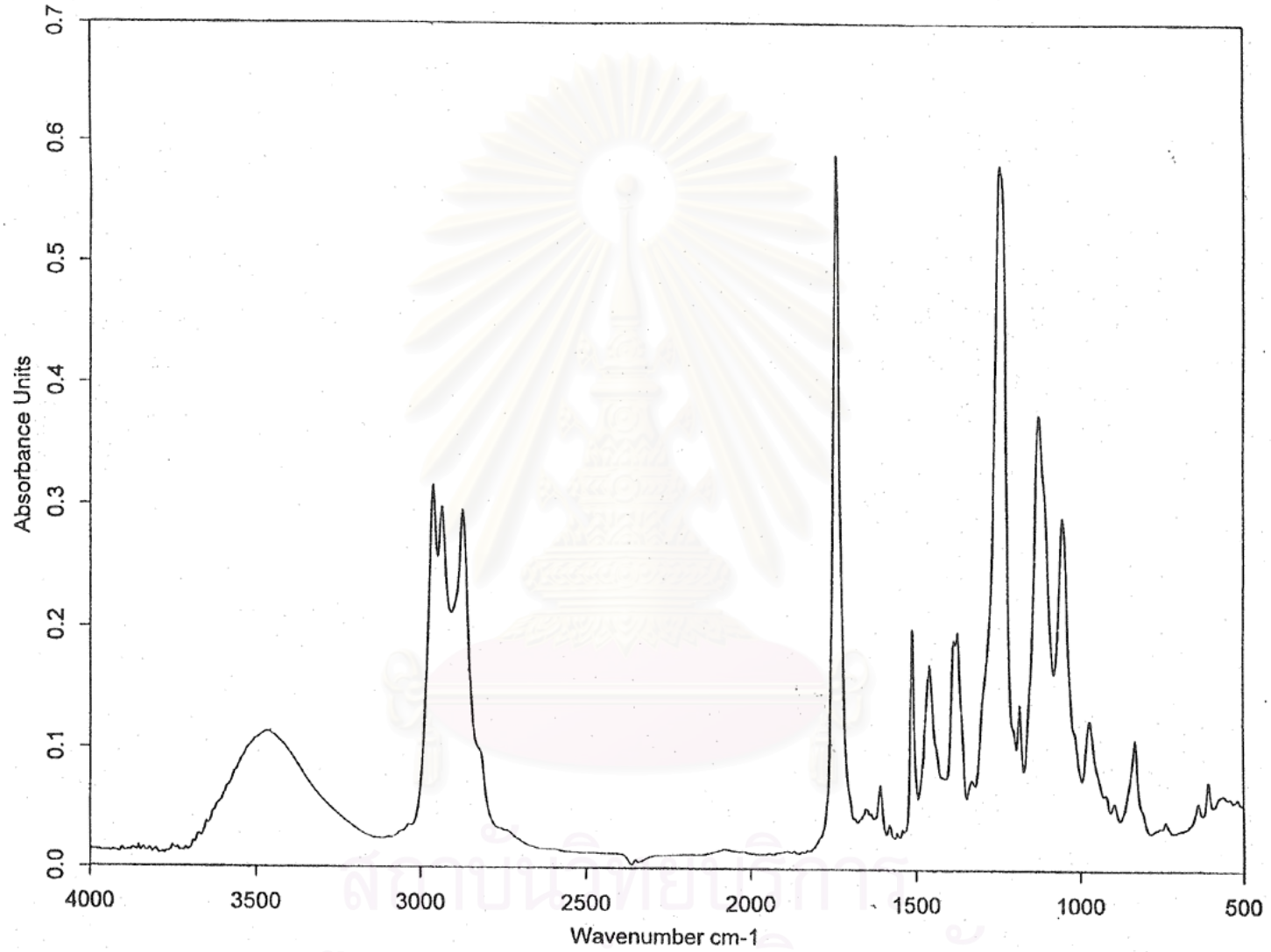
บทที่ 4

ผลการทดลอง

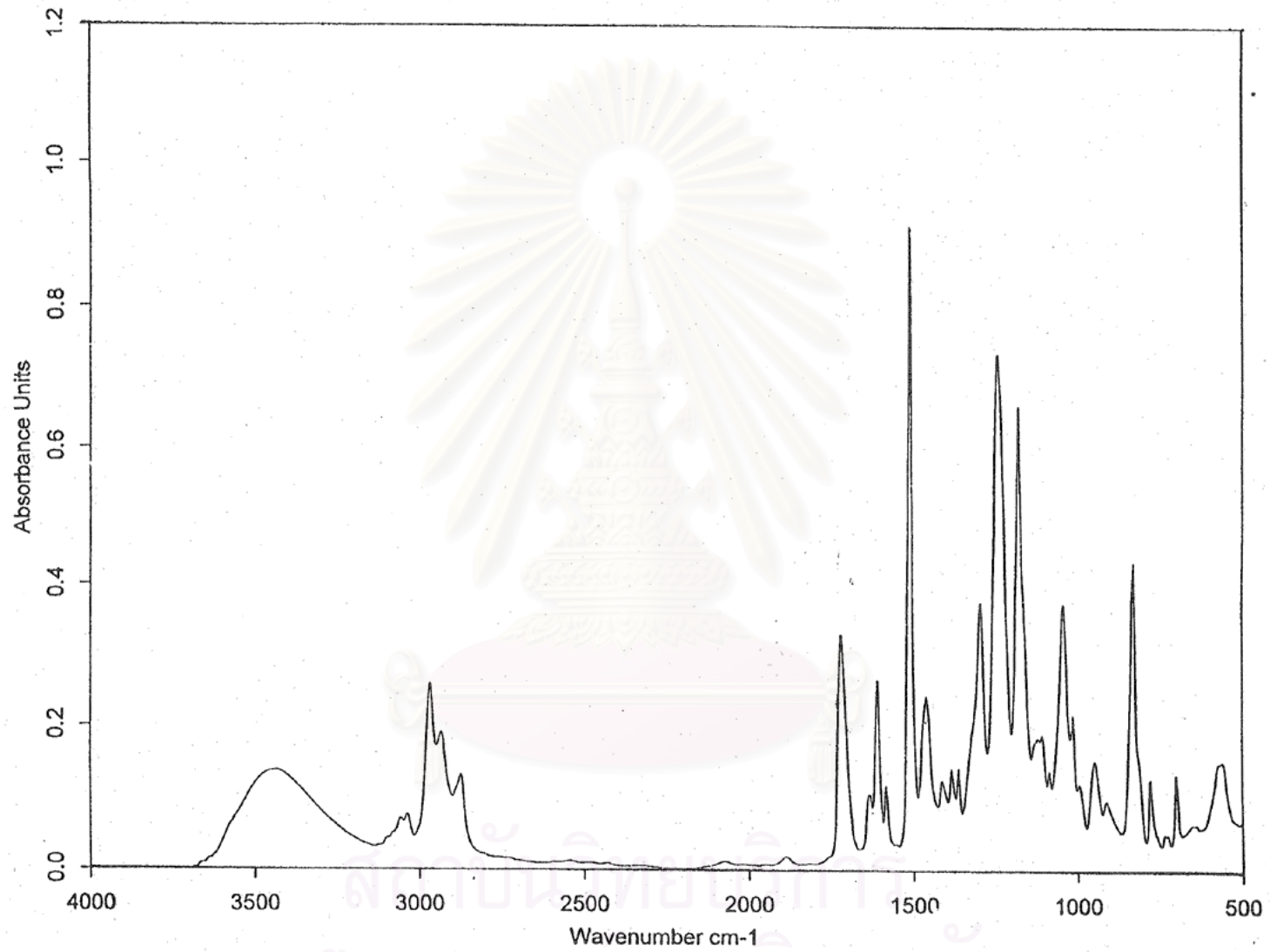
ผลการวิเคราะห์หาสารหลักในไพรเมอร์ 1205 นั้นสามารถทำได้โดยวิธี เอฟทีไออาร์ (FTIR) จะได้กราฟดังรูป 10 และเมื่อนำกราฟไปจับคู่ใน สเปกตรอล ไลบรารี (spectral library) พบว่าไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าเป็นสารชนิดใดเนื่องด้วยไพรเมอร์ 1205 เป็นสารละลายที่ประกอบด้วยสารหลักและตัวทำละลาย แต่จากลักษณะของกราฟมีการแสดงตำแหน่งของหมู่อีพอกไซด์ซึ่งนั่นสารหลักจึงมีแนวโน้มที่จะเป็นสารจำพวก อีพอกซี เรซิน ส่วนตัวทำละลายมีแนวโน้มที่จะเป็นสารบิวทิลไกลคอล อะซิเตท(butylglycol acetate) และสารโทลูอิน ส่วนการวิเคราะห์สารอีพอกซีด้วยวิธี FTIR ได้กราฟดังรูป 11 และ เมื่อจับคู่ใน สเปกตรอล ไลบรารี พบว่าเป็น สารจำพวก อีพอกซี เรซิน และเมื่อนำสารบ่ม(hardener) ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีเดียวกันได้กราฟดังรูปที่ 12 พบว่าเป็นสารที่มีหมู่เบนซีนริง เป็นหลัก



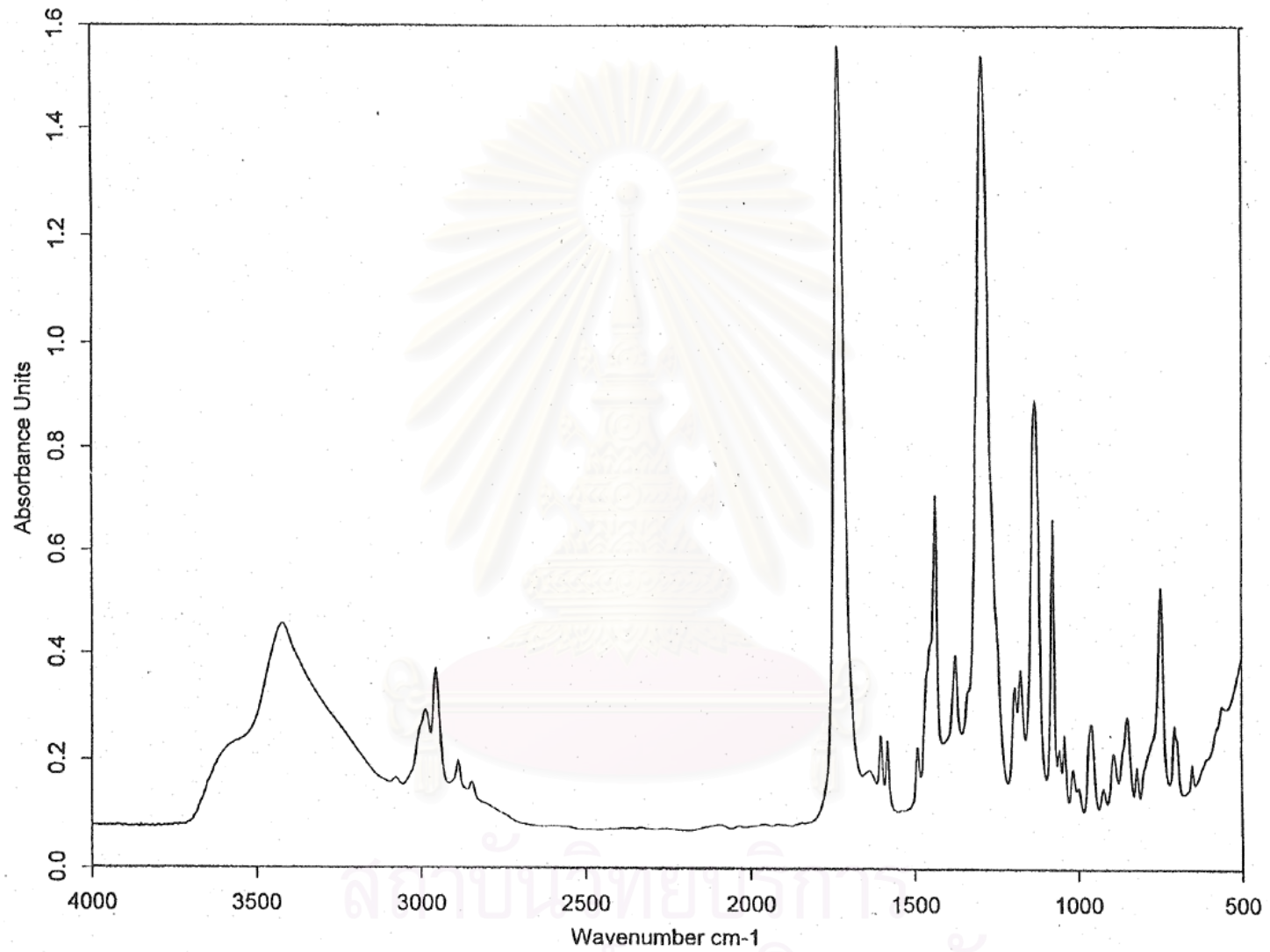
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 10 กราฟแสดงสารไพเรเนอร์ 1205 เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR



รูปที่ 11 กราฟแสดงการไรพอกซี เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR



รูปที่ 12 กราฟแสดงสารบ่มของไพโรอกซี เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี FTIR

ในวิจัยนำร่องเมื่อทดสอบค่าแรงต้านทานต่อการลอกออกระหว่างแผ่นโพลียูรีเทนกับชั้นซิลิโคน อีลาสโตเมอร์โดยใช้เครื่องวัดลดยด์ พบว่าชั้นทดสอบกลุ่มที่ใช้สารยึดโรพอกซี และกลุ่มที่ใช้ สารยึดโรพอกซีละลายในโทลูอินอัตราส่วนโดยปริมาตรสองต่อหนึ่งไม่เกิดการฉีกขาดบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นโพลียูรีเทนและชั้นซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ แต่เกิดการฉีกขาดในเนื้อซิลิโคนเอง (cohesive failure) และเมื่อนำแผ่นโพลียูรีเทนด้านที่เชื่อมยึดกับซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ไปส่องด้วยกล้องไมโครสโคป (Microscope for operation, SZH 10 Research Stereo, Olympus, Japan) ด้วยกำลังขยาย 70 เท่าปรากฏดังรูปที่ 13 พบลักษณะเป็นริ้วกระจายอยู่ซึ่งเป็นชั้นของซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ที่ติดอยู่บนแผ่นโพลียูรีเทนนั่นเอง ส่วนกลุ่มอื่นๆที่เหลือไม่พบการยึดระหว่างแผ่นโพลียูรีเทนกับชั้นซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เพราะขณะที่ทำการแยกภาชนะทองเหลืองครึ่งบนและครึ่งล่างออกจากกันแผ่นโพลียูรีเทนและชั้นซิลิโคน อีลาสโตเมอร์จะแยกหลุดออกจากกันทันที



รูปที่13 ภาพกำลังขยายของแผ่นโพลียูรีเทนที่มีชั้นส่วนของซิลิโคนที่ติดอยู่ โดยมีลักษณะเป็นริ้วกระจายอยู่ทั่วไป

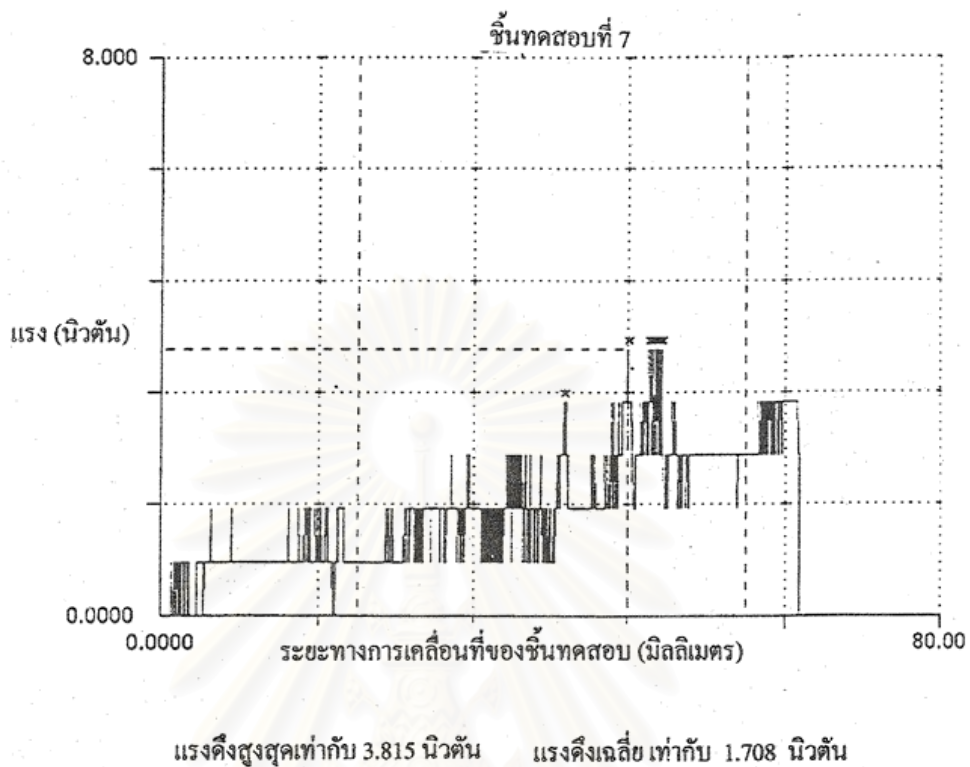
ในวิจัยตอนที่ 2 เมื่อนำชั้นทดสอบไปทดสอบหาค่าแรงยึดระหว่างแผ่นโพลียูรีเทนกับชั้นซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ โดยใช้เครื่องวัดลดยด์ พบว่าเกิดการแยกออกบริเวณผิวหน้า (adhesive failure) ของแผ่นโพลียูรีเทนที่เชื่อมติดกับชั้นซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ และเมื่อนำแผ่นโพลียูรีเทนด้านที่เชื่อมยึดกับซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ไปส่องด้วยกล้องไมโครสโคป ด้วยกำลังขยาย 70 เท่าปรากฏดังรูปที่ 14 ไม่พบลักษณะริ้วของชั้นของซิลิโคน แต่เป็นลักษณะของเนื้อโพลียูรีเทนเอง



รูปที่ 14 ภาพกำลังขยาย 70 เท่าของแผ่น โพลียูรีเทนที่ปราศจากการยึดติดกับชิ้นส่วนของซิลิโคน อีลาสโตเมอร์

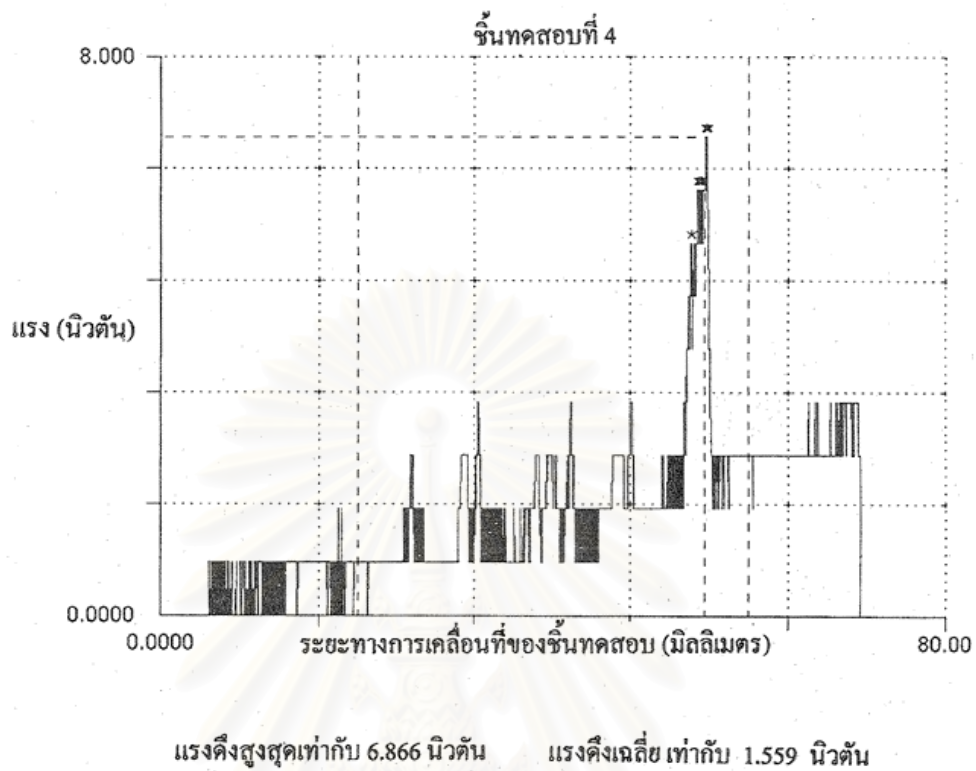
จากการวัดและการคำนวณของเครื่องลอยค้ ได้กราฟโดยในแนวแกนตั้งเป็นค่าแรงที่ใช้ลอก แผ่นโพลียูรีเทนออกจากชิ้นซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ หน่วยเป็น นิวตัน ในแนวแกนนอนเป็นระยะทาง ที่ขึ้นทดสอบเคลื่อนที่ไประหว่างที่มีแรงมากกระทำเพื่อให้เกิดการลอกออก มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรดัง รูปที่ 15, 16 และ 17

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



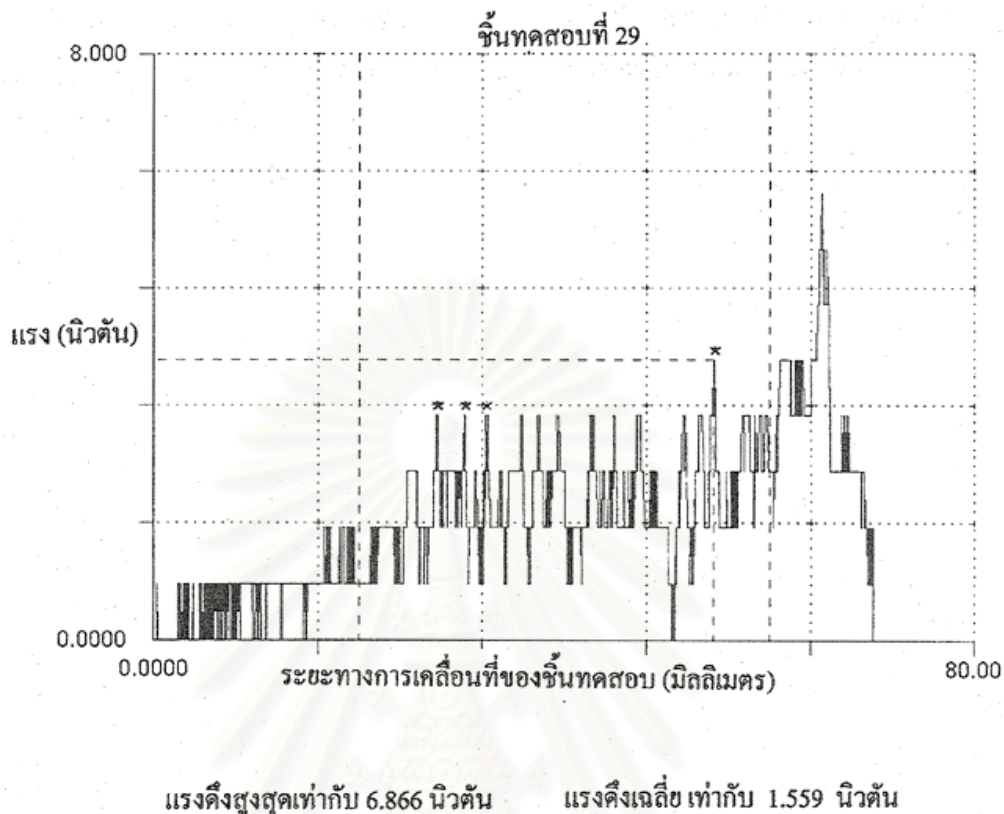
รูปที่ 15 กราฟแสดงแรงและระยะทางที่ใช้ในการลอกแผ่นโพลียูรีเทนออกจากชิ้นซีลิกอนของกลุ่มที่ใช้สารเชื่อมเป็น ไพรเมอร์ 1205

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 16 กราฟแสดงแรงและระยะทางที่ใช้ในการลอกแผ่นโพลียูรีเทนออกจากชิ้นซิลิโคนของกลุ่มที่ใช้สารเชื่อมเป็น ไรพอกซี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 17 กราฟแสดงแรงและระยะทางที่ใช้ในการลอกแผ่นโพลียูรีเทนออกจากชั้นซีเมนต์คอนกรีตของกลุ่มที่ใช้สารเชื่อมเป็น ไรพอกซีที่ละลายใน โทลูอิน 2 ต่อ 1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แรงดึงสูงสุด (maximum load) และ แรงดึงค่าเฉลี่ย (mean load) ของชิ้นทดสอบทั้ง 3 กลุ่ม โดยแต่ละกลุ่มใช้สารช่วยยึดเป็นไพรมอร์ 1205 ไรพอกซี และไรพอกซีที่ละลายในสารละลายโทลูอินในอัตราส่วนโดยปริมาตร 2 ต่อ 1 และแสดงผลดังตารางที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ โดยกลุ่มที่ 1 มีค่าเฉลี่ยของแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 3.866 นิวตัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.387 ค่าแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 1.865 นิวตัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.592 กลุ่มที่ 2 มีค่าเฉลี่ยของแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 4.018 นิวตัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.218 ค่าแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 1.962 นิวตัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.597 กลุ่มที่ 3 มีค่าเฉลี่ยของแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 3.510 นิวตัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.816 ค่าแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 1.756 นิวตัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.564



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1 แสดงค่าแรงดึงสูงสุดและแรงดึงเฉลี่ย ที่ใช้ลอกแผ่นโพลียูรีเทน ออกจากชั้น ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เมื่อใช้ไพรเมอร์ 1205 เป็นสารยึด

ลำดับชั้น ทดสอบ	ไพรเมอร์ 1205				
	แรงดึง สูงสุด (นิวตัน)	แรงดึง เฉลี่ย (นิวตัน)	ลำดับชั้น ทดสอบ	แรงดึง สูงสุด (นิวตัน)	แรงดึง เฉลี่ย (นิวตัน)
1	2.289	1.026	16	2.289	0.881
2	2.289	1.764	17	3.815	1.619
3	2.289	1.222	18	4.578	1.623
4	3.052	1.808	19	6.104	2.985
5	3.052	1.599	20	4.578	1.817
6	4.578	2.858	21	5.341	3.227
7	3.815	1.708	22	4.578	3.060
8	3.815	1.717	23	6.104	2.010
9	3.815	1.685	24	6.866	1.743
10	3.052	2.216	25	6.866	2.731
11	3.052	1.821	26	5.341	2.116
12	3.052	1.627	27	3.815	2.022
13	3.815	2.684	28	3.052	1.216
14	3.052	1.718	29	1.526	0.647
15	3.052	1.904	30	3.052	1.906

ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 3.866 นิวตัน

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 1.387

ค่าเฉลี่ยแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 1.865 นิวตัน

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 0.592

ตารางที่ 2 แสดงค่าแรงดึงสูงสุดและแรงดึงเฉลี่ย ที่ใช้ลอกแผ่นโพลียูรีเทน ออกจากชั้น ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เมื่อใช้ไรรพอกซีเป็นสารยึด

ลำดับชั้นทดสอบ	ไรรพอกซี				
	แรงดึงสูงสุด (นิวตัน)	แรงดึงเฉลี่ย (นิวตัน)	ลำดับชั้นทดสอบ	แรงดึงสูงสุด (นิวตัน)	แรงดึงเฉลี่ย (นิวตัน)
1	3.052	2.474	16	5.341	1.711
2	5.341	2.030	17	6.140	1.855
3	5.341	2.105	18	5.341	3.744
4	6.866	1.559	19	3.815	2.403
5	3.815	1.865	20	3.052	1.276
6	3.815	2.065	21	2.289	1.402
7	5.341	2.212	22	5.341	2.862
8	3.815	1.739	23	3.815	2.961
9	3.052	2.149	24	3.815	2.346
10	2.289	1.220	25	2.289	1.630
11	2.289	0.532	26	3.815	2.332
12	3.052	1.648	27	4.578	2.700
13	2.289	1.461	28	3.815	1.997
14	5.815	1.743	29	4.578	1.576
15	4.578	1.756	30	3.518	1.774

ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 4.018 นิวตัน

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 1.218

ค่าเฉลี่ยแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 1.962 นิวตัน

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 0.597

ตารางที่ 3 แสดงค่าแรงดึงสูงสุดและแรงดึงเฉลี่ย ที่ใช้ลอกแผ่น โพลียูรีเทน ออกจากชั้น ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เมื่อใช้ไรรพอกซีที่ละลายในสารละลายโทลูอีน 2 :1 เป็นสารยึด

ลำดับชั้น ทดสอบ	ไรรพอกซีที่ละลายในสารละลายโทลูอีน 2 :1				
	แรงดึง สูงสุด (นิวตัน)	แรงดึง เฉลี่ย (นิวตัน)	ลำดับชั้น ทดสอบ	แรงดึง สูงสุด (นิวตัน)	แรงดึง เฉลี่ย (นิวตัน)
1	1.526	0.854	16	3.815	2.066
2	3.815	1.968	17	3.052	1.766
3	3.052	1.162	18	3.052	1.798
4	4.578	1.507	19	2.289	0.805
5	5.341	2.328	20	2.289	1.002
6	4.578	2.661	21	3.052	1.618
7	3.815	2.216	22	3.815	1.969
8	3.052	1.343	23	3.815	1.811
9	3.052	1.529	24	3.815	1.433
10	3.052	2.039	25	5.341	3.628
11	3.815	1.690	26	3.815	2.346
12	3.815	1.500	27	3.052	1.687
13	3.815	1.395	28	3.052	1.840
14	3.052	2.027	29	3.815	1.867
15	3.052	1.128	30	3.815	1.692

ค่าเฉลี่ยแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 3.510 นิวตัน

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 0.816

ค่าเฉลี่ยแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 1.756 นิวตัน

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ 0.564

เมื่อนำค่าแรงดึงเฉลี่ยของทั้ง 3 กลุ่ม ไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อทดสอบการกระจายตัว (Kolmogorov - Smirnov Test) และความแตกต่างของค่าความแปรปรวน (test of homogeneity of variance) ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำเร็จรูปเอสพีเอสเอส สำหรับวินโดวส์ รุ่น 98 ได้ผลดังตารางที่ 4 และ 5 ซึ่งได้ค่านัยสำคัญเท่ากับ 0.251 และ 0.914 ตามลำดับซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ 0.05 ดังนั้นจึงแปลผลได้ว่าค่าแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นทดสอบทั้ง 3 กลุ่มมีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ (normal distribution) และค่า ความแปรปรวน ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความแตกต่างของค่าแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นทดสอบทั้ง 3 กลุ่ม จึงเลือกใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเอสพีเอสเอส สำหรับวินโดวส์ รุ่น 98 ได้ผลดังตารางที่ 6 ได้ค่านัยสำคัญเท่ากับ 0.397 ซึ่งมีความมากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้คือ 0.05 ดังนั้นจึงต้องยอมรับสมมุติฐานที่ตั้งไว้ คือ แรงยึดของแผ่นโพลียูรีเทน กับซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เมื่อใช้สารยึดเป็นไพรมเมอร์ 1205 ไม่แตกต่างจากการใช้สารโรพอกซีทั้งสองรูปแบบ

ตารางที่ 4 แสดง Kolmogorov - Smirnov Test

การทดสอบการแจกแจงข้อมูลแบบ Kolmogorov-Smirnov

จำนวนข้อมูล	90
รูปแบบของการแจกแจงที่เลือกทดสอบ ^{ก,ข} ค่าเฉลี่ย	1.861026
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	.584140
ค่า ผลต่างมากที่สุด โดยไม่คิดเครื่องหมาย	.107
ค่า ผลต่างมากที่สุด ทางบวก	.107
ค่า ผลต่างมากที่สุด ทางลบ	-.072
ค่าสถิติ Kolmogorov - Smirnov Z	1.018
ค่าความน่าจะเป็น 2- Tailed P	.251

ก . ทดสอบการแจกแจงเป็นแบบปกติ

ข . คำนวณจากข้อมูล

ตารางที่ 5 แสดงการทดสอบความแตกต่างของความแปรปรวนในแต่ละกลุ่ม โดยวิธีการของ Levene Test

ค่าสถิติ	ชั้นของความเป็นอิสระ1	ชั้นของความเป็นอิสระ2	นัยสำคัญ
.090	2	87	.914

ตารางที่ 6 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

สาเหตุความแปรปรวน	ผลรวมกำลังสอง	ชั้นของความเป็นอิสระ	ผลรวมกำลังสองเฉลี่ย	อัตราส่วนเอฟ	นัยสำคัญ
ระหว่างกลุ่ม	.638	2	.319	.933	.397
ภายในกลุ่ม	29.731	87	.342		
รวม	30.369	89			

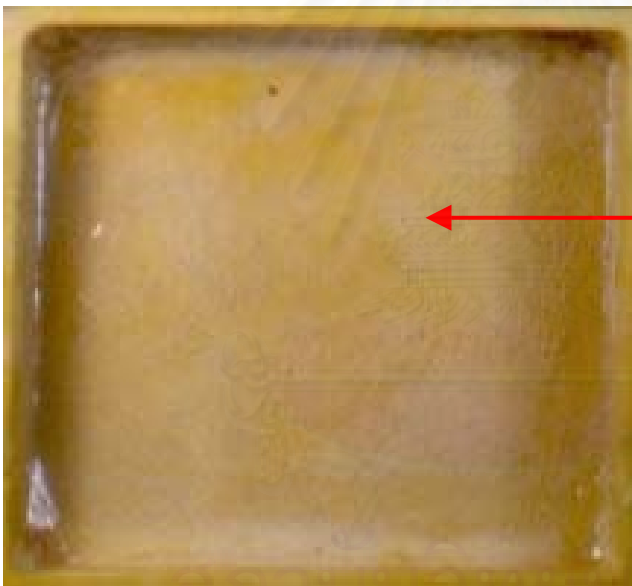
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

อภิปรายผลการทดลอง ข้อเสนอแนะ และสรุปผลการทดลอง

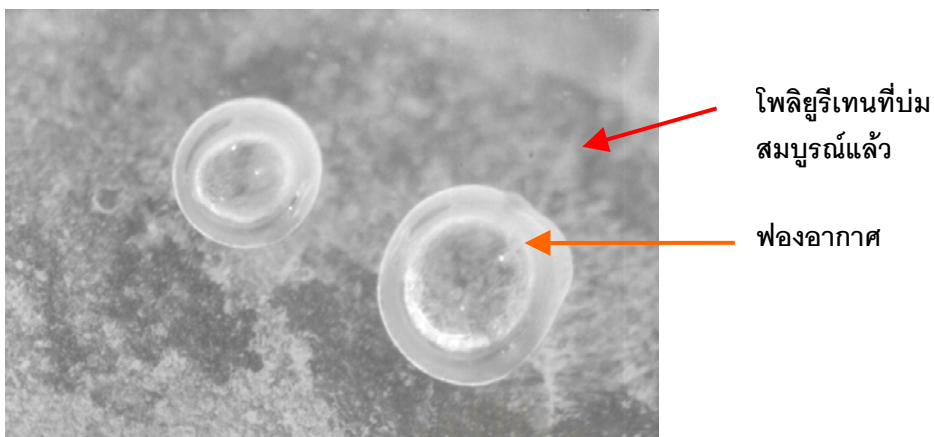
อภิปรายผลการทดลอง

การเตรียมเบ้ายิปซัม โดยการทาด้วยสารคั้นกลางแล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ยิปซัมแห้ง เพราะจากวิจัยนำร่องเพื่อหาวิธีการขึ้นรูปแผ่นโพลียูรีเทนจากโพลียูรีเทนเหลว พบว่าเมื่อเทโพลียูรีเทนเหลวลงในเบ้ายิปซัมที่ไม่ผ่านการอบด้วยความร้อนจะเกิดรูพรุนเล็กๆ กระจายในเนื้อโพลียูรีเทนที่บ่มตัวสมบูรณ์แล้วดังรูปที่ 18 และเมื่อนำไปส่องด้วยกล้องกำลังขยาย 70 เท่า จะปรากฏดังรูปที่ 19



ฟองอากาศในเนื้อของแผ่น
โพลียูรีเทนที่บ่มตัวสมบูรณ์
แล้ว

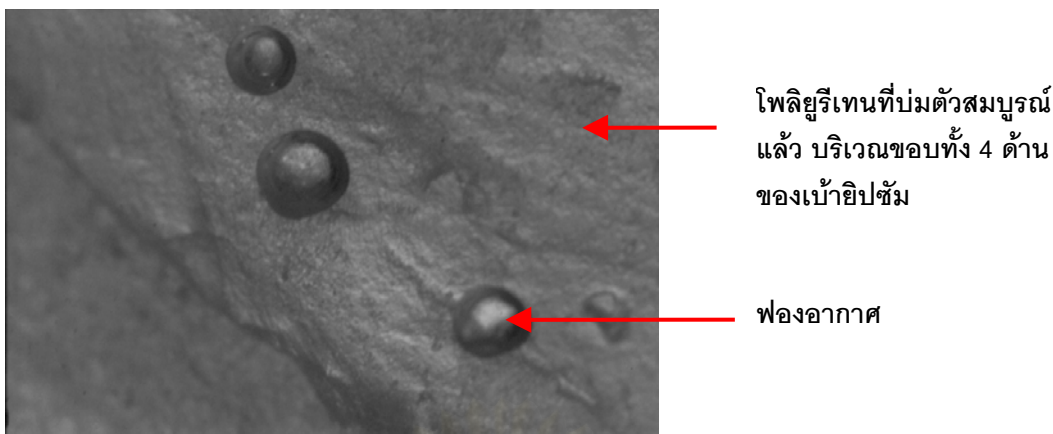
รูปที่ 18 แสดงฟองอากาศกระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อของแผ่น โพลียูรีเทนที่บ่มตัวสมบูรณ์แล้ว



รูปที่ 19 ภาพกำลังขยาย 70 เท่า ของฟองอากาศที่กระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อของแผ่นโพลียูรีเทนที่บ่มตัวสมบูรณ์แล้ว

และถ้าทาสารคั่นกลางให้ทั่วบนเบ้ายิปซัมแต่ไม่ได้นำเข้าตู้อบและปล่อยให้สารคั่นกลางแห้ง ณ อุณหภูมิห้อง เมื่อเทโพลียูรีเทนเหลวลงเบ้ายิปซัมดังกล่าวแล้วนำเข้าตู้อบสิ่งที่ปรากฏขึ้นคือ แผ่นโพลียูรีเทนจะถูกดันให้ลอยขึ้นจากเบ้ายิปซัมเป็นหย่อมๆ ซึ่งเกิดจากการดันของไอน้ำที่ระเหยหลุดออกจากเนื้อยิปซำนั่นเอง ดังนั้นวิธีการขึ้นรูปแผ่นโพลียูรีเทนที่ได้ผลและเหมาะสมจึงน่าจะเป็นไปตามวิธีที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อวิธีการเตรียมขึ้นทดสอบ แต่อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะขึ้นรูปด้วยวิธีการอบ หรือไม่อบเบ้ายิปซัม ณ บริเวณขอบโดยรอบของเบ้ายิปซัมจะพบฟองอากาศในเนื้อของแผ่นโพลียูรีเทน เสมอ ดังรูปที่ 20 เพราะโพลียูรีเทนที่ใช้ในการวิจัยนี้ประกอบด้วยพรีโพลิเมอร์ ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลไฮดรอกไซด์ที่จะทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศเกิดเป็นหมู่เอมีโนและเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้บริเวณที่หนาๆจะเกิดเป็นฟอง ดังนั้นหากต้องการขึ้นรูปแผ่นโพลียูรีเทนที่มีความหนามากกว่า 1 มิลลิเมตร จำเป็นต้องขึ้นรูปโดยการบ่มทีละชั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 20 ภาพกำลังขยาย 70 เท่า ของฟองอากาศที่กระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อของแผ่นโพลียูรีเทนที่บ่มตัวสมบูรณ์แล้วและมักจะมีความหนามากกว่า 1 มิลลิเมตรซึ่งพบได้ที่บริเวณขอบทั้ง 4 ด้านของเบ้ายิปซัม

ซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิด ไตรอะซีทอกซีไซเลน (triacetoxysilane) ซึ่งสามารถบ่มตัวเมื่อสัมผัสกับความชื้น ณ อุณหภูมิห้อง⁴⁵ ส่วนไพโรเมอร์ 1205 เป็นสารเชื่อมที่มีอีพอกซีเป็นองค์ประกอบ ซึ่งคุณสมบัติของอีพอกซี⁵²⁻⁵⁴ คือสามารถเชื่อมวัสดุ 2 ชนิด ที่ต่างกันได้ โดยอีพอกซีสามารถเชื่อมวัสดุเข้าด้วยกันโดยไม่ต้องอาศัยความดัน หรือการเพิ่มอุณหภูมิ ดังนั้นอีพอกซีจึงสามารถใช้เป็นสารเชื่อมระหว่างกับโพลียูรีเทนเหลวที่บ่มตัวสมบูรณ์กับซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ ชนิดไตรอะซีทอกซีไซเลนได้ จึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการปรับปรุงประติสัมพันธ์อวัยวะเทียม เพราะการประติสัมพันธ์อวัยวะเทียมด้วยวิธีการของ Udagama คือใช้แผ่นโพลียูรีเทนสำเร็จรูป บนที่ฐานของซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ ซึ่งวิธีการดังกล่าวค่อนข้างยุ่งยากเพราะจะต้องใช้เครื่องขึ้นรูปสูญญากาศ (vacuum former) เพื่อขึ้นรูปแผ่นโพลียูรีเทนบนชั้นหล่อพูน แล้วจึงนำแผ่นโพลียูรีเทนดังกล่าวไปคลุมบนชั้นหล่อหลัก ก่อนที่จะอัดทับด้วยซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ ซึ่งเมื่อได้ชั้นอวัยวะเทียมแล้วมักจะประสบปัญหาคือ เกิดรอยพับย่นของแผ่นโพลียูรีเทน ซึ่งจะทำให้เป็นจุดเริ่มร่อนหลุดของการเชื่อมยึดระหว่างแผ่นโพลียูรีเทนกับชั้นซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ และรอยพับย่นยังทำให้ชั้นอวัยวะเทียมไม่แนบสนิทกับผิวหนังของผู้ป่วย แต่การขึ้นรูปแผ่นโพลียูรีเทนเหลว เพื่อประติสัมพันธ์อวัยวะเทียมมีข้อดีคือ ลดขั้นตอนในการทำงานคือไม่ต้องทำชั้นหล่อพูน ลดเครื่องมือขึ้นรูปสูญญากาศ ลดการเกิดรอยพับย่นของแผ่นโพลียูรีเทน เพราะแผ่นโพลียูรีเทนถูกขึ้นรูปบนชั้นหล่อหลักโดยตรง

จากการวิจัยนำร่องที่ใช้แผ่นพลาสติกขนาด $6 \times 6.5 \times 0.5$ เซนติเมตร (กว้าง \times ยาว \times หนา) เป็นแม่พิมพ์สำหรับสร้างเบ้ายิปซัม และใช้ปริมาณโพลียูรีเทนเหลวหนัก 20 กรัม ซึ่งเมื่อทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง โพลียูรีเทนจะเกิดการบ่มตัวสมบูรณ์ เป็นแผ่นที่

มีความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงเหลือพื้นที่ความหนาของเบ้ายิปซัม 4 มิลลิเมตร สำหรับเป็นที่อยู่ของซิลิโคน อีลาสโตเมอร์

เมื่อนำชิ้นทดสอบที่ใช้สารยึดที่เป็น ไรพอกซี และ ไรพอกซีที่ละลายในสารละลายโทลูอิน ไปทดสอบโดยเครื่องวัดคอลลอยด์ พบว่าเมื่อเครื่องที่ใช้จับชิ้นทดสอบเริ่มเคลื่อนที่ทั้งแผ่นโพลียูรีเทน และชิ้นซิลิโคน อีลาสโตเมอร์จะเริ่มยืดออก ต่อมาจะเกิดการรอยฉีกขาดในเนื้อซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ (cohesive failure) โดยมีเนื้อซิลิโคนส่วนใหญ่ยึดติดกับ ไรพอกซีที่ยึดอยู่กับแผ่นโพลียูรีเทน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ไรพอกซี สามารถยึดซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ชนิด ไตรอะซีทอกซีไซเลน ให้ยึดติดกับแผ่นโพลียูรีเทนได้ แต่เนื่องด้วยวิธีการเตรียมชิ้นทดสอบในวิจัยนำร่องนั้น ชิ้นซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ มีความหนาเพียงแค่ 4 มิลลิเมตร ซึ่งน้อยไป จึงไม่สามารถทนแรงดึงที่จะเอาชนะต่อแรงยึดที่เกิดจากการใช้ ไรพอกซีได้ ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงได้เพิ่มความลึกของเบ้ายิปซัมให้เป็น 10 มิลลิเมตร เมื่อโพลียูรีเทนขนาดน้ำหนัก 20 กรัม บ่มตัวสมบูรณ์ แล้วจะเหลือความลึกของเบ้ายิปซัมอีก 9 มิลลิเมตร สำหรับเป็นที่อยู่ของซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ซึ่งจากการวิจัยครั้งนี้สามารถวัดค่าแรงยึดระหว่างแผ่นโพลียูรีเทน กับซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ได้ คือ ชิ้นทดสอบเกิดการฉีกขาดระหว่างรอยต่อ (adhesive failure) ของวัสดุทั้ง 2 ชนิด

จากการทดสอบแรงดึงเมื่อใช้สารยึดเป็น ไซพรเมอร์ 1205 ไรพอกซี และ ไรพอกซีที่ละลายในโทลูอิน (2:1) ได้รูปกราฟที่กำหนดให้แกนตั้งเป็นค่าแรงดึงที่ใช้ลอควัสดุทั้ง 2 ชนิดออกจากกัน มีหน่วยเป็นนิวตัน ส่วนในแกนนอนคือระยะทางของการยึดตัวออกของชิ้นทดสอบระหว่างที่มีแรงมากกระทำมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร พบว่ากราฟที่ได้จากการทดสอบของทั้ง 3 กลุ่มมีลักษณะคล้ายๆ กัน โดยสามารถแบ่งลักษณะของกราฟได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกกราฟที่ได้จะมีค่าแรงดึงค่อนข้างสม่ำเสมอ ช่วงกลางค่าแรงดึงเพิ่มขึ้นจากช่วงแรก และค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และช่วงสุดท้ายค่าแรงดึงจะเพิ่มขึ้นจากช่วงกลางอย่างทันที และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนแผ่นโพลียูรีเทนหลุดออกจากชิ้นซิลิโคน อีลาสโตเมอร์เส้นกราฟจึงจะตกลง สามารถอธิบายลักษณะของกราฟทั้ง 3 ช่วงได้ดังนี้ คือ ช่วงแรกค่าแรงดึงที่เกิดขึ้นเป็นค่าแรงดึงที่ใช้ยึดแผ่นโพลียูรีเทน และชิ้นซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ให้ยึดออก ดังนั้นกราฟที่ปรากฏจึงมีค่าแรงดึงค่อนข้างสม่ำเสมอ เมื่อแผ่นโพลียูรีเทนและ ซิลิโคน ถูกยึดออกจนถึงบริเวณที่มีสารเชื่อมซึ่งเกิดการยึดระหว่างแผ่นโพลียูรีเทน กับ ชิ้นซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ แรงที่ใช้ดึงจึงเป็นแรงที่เกิดจากแรงที่ใช้ยึดวัสดุทั้งสองชนิดรวมกับแรงที่ใช้ลอคแผ่นโพลียูรีเทนออกจากชิ้นซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ดังนั้นจึงทำให้กราฟในช่วงกลางมีค่าแรงดึงสูงขึ้นจากช่วงแรก และเมื่อชิ้นทดสอบถูกดึงห่างออกจากกันเรื่อยๆ ทั้งแผ่นโพลียูรีเทน และชิ้นซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ จะเริ่มมีความตึงตัวมากขึ้น ซึ่งจะต้องใช้แรงดึงมากขึ้น จึงทำให้เกิดกราฟในลักษณะช่วงสุดท้าย ดังนั้นจึงได้กำหนดค่าของแรงดึงที่จะนำมาใช้วิเคราะห์ทางสถิติ โดยใช้ค่าแรงดึงที่อยู่ในช่วงระยะทางของการยึดออกของชิ้นทดสอบระหว่าง 25 มิลลิเมตร ถึง 75 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นกราฟที่มีลักษณะอยู่ในช่วงกลางนั่นเอง

จากตารางแสดงค่าแรงดึงสูงสุดบางช่วงของลำดับชั้นทดสอบมีค่าเท่ากันเช่นลำดับชั้นทดสอบที่ 1 ถึง 3 ของตารางที่ 1 หรือลำดับชั้นทดสอบที่ 11 ถึง 13 ของตารางที่ 3 ปรากฏการนี้อาจอธิบายได้ว่าลำดับของชั้นทดสอบจะอยู่ต่อเนื่องกันบนแผ่น โพลียูรีเทนที่มีความหนาเท่ากันจึงทำให้ได้ค่าแรงดึงสูงสุดเท่ากันนั่นเอง

ส่วนการวิเคราะห์หาสารหลักในไพรเมอร์ 1205 นั้นสามารถทำได้โดยวิธี เอฟทีไออาร์ (FTIR) จะได้กราฟดังรูป 10 และเมื่อนำกราฟไปจับคู่ใน สเปกตรอล ไลบรารี (spectral library) พบว่าเป็น สารจำพวก อีพอกซี เรซิน ที่ละลายใน บิวทิลไกลคอล อะซิเตท (butylglycol acetate) ส่วนการวิเคราะห์โพรพอกซีด้วยวิธี FTIR ได้กราฟดังรูป 11 และ เมื่อจับคู่ใน สเปกตรอล ไลบรารี พบว่าเป็น สารจำพวก อีพอกซี เรซิน เช่นกัน และเมื่อนำสารบ่ม (hardener) ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีเดียวกันได้กราฟดังรูป 12 พบว่าเป็นสารที่มีหมู่เบนซีนริงเป็นหลัก ซึ่งด้วยสาเหตุนี้เองที่ทำให้โพรพอกซีที่บ่มตัวสมบูรณ์แล้วมีความแข็งกระด้าง^{48,52,54} ดังนั้นหากจะพัฒนาให้ โพรพอกซี มีความอ่อนนุ่ม ไม่แข็งกระด้างเมื่อบ่มตัวสมบูรณ์แล้วก็สามารถทำได้โดยเปลี่ยนตัวสารบ่มให้มีหมู่ functional เหมือนเดิม แต่เปลี่ยนจากโครงสร้างที่เป็น เบนซีนริง ให้เป็น โครงสร้างที่เป็นเส้นตรง

จากผลของการวิจัยนี้อาจ กล่าวได้ว่าไพรเมอร์ 1205 และโพรพอกซี เป็นสารเชื่อมยึด (coupling agent) ที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถเชื่อมระหว่างแผ่น โพลียูรีเทน ให้ยึดกับซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ได้ทั้งๆ ที่ ซิลิโคนอีลาสโตเมอร์ มีคุณสมบัติเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งอาจอธิบายได้ว่าอธิบายได้ว่า อีพอกซี เรซิน มีคุณสมบัติเป็น coupling agent⁵³ โดยอาจจะเกิดการยึดทั้งทางเคมีและทางกล โดยทางเคมีก็คือ อีพอกซี เรซิน มี bifunctional group โดยแขนข้างหนึ่งจะเกิดพันธะเคมีกับโพลียูรีเทน ส่วนอีกข้างหนึ่งจะเกิดพันธะเคมี กับ ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ส่วนแรงยึดทางกลคือ เกิดการกระจายและแทรกซึม (diffusion) ของสายโซ่โมเลกุลของอีพอกซี เรซิน เข้าไปในโพลียูรีเทน และซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ในวิจัยนักร้องพบว่าเมื่อละลายโพรพอกซีในสารละลายโทลูอิน ในอัตราส่วนตั้งแต่ 1 : 1 ไปจนถึง 1 : 8 พบว่าไม่เกิดการยึดกัน ระหว่างแผ่นโพลียูรีเทน กับชั้นซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ซึ่งอาจเป็นเพราะปริมาณของโพรพอกซี มีน้อยเกินไปที่จะใช้เป็นสารเชื่อมยึดนั่นเอง

ข้อเสนอแนะ

ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นประเภท ไตรอะซีทอกซี ไซเลนซึ่งซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ที่ใช้ในการผลิตอวัยวะเทียมมีอยู่หลายประเภทจึงน่าที่จะได้มีการศึกษา โดยการใช้ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ชนิดอื่นๆ ต่อไป การทำสารเชื่อมไม่ว่าจะเป็น ไพรเมอร์ 1205 หรือ โพรพอกซี ลงบนแผ่นโพลียูรีเทน ด้วยวิธีการเช็ดด้วยผ้าก๊อชชุบสารเชื่อมอาจจะทำให้ได้ความหนาของสารเชื่อมไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งชั้นทดสอบซึ่งจะมีผลต่อค่าแรงดึงที่ทำให้แผ่นโพลียูรีเทน ลอกออกจาก

ลิโคน อีลาสโตเมอร์ได้ ดังนั้นวิธีการที่จะทาสารยึดลงบนแผ่นโพลียูรีเทนให้ได้ ความหนาที่สม่ำเสมอทั้งหมดทั้งชิ้นทดสอบจึงน่าที่จะได้มีการศึกษาและพัฒนาต่อไป

การที่อีพอกซี เรซิน สามารถเชื่อมแผ่นโพลียูรีเทน กับ ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ประเภทไดอะอะซีทอกซี ไซเลน ได้ ควรจะได้มีการศึกษาที่ผิวหน้าระหว่างโพลียูรีเทนกับอีพอกซี และผิวหน้าระหว่างซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ กับอีพอกซีว่าการยึดของวัสดุนั้นเกิดจากพันธะเคมี และหรือเป็นแรงยึดทางกล

สรุปผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาความต้านทานต่อการลอกออกของแผ่นโพลียูรีเทน กับซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เมื่อใช้สารไพรเมอร์ที่พัฒนาขึ้นใหม่ พบว่า ค่าแรงดึงที่ใช้ลอกแผ่นโพลียูรีเทน ออกจากชั้นซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ เมื่อใช้สารเชื่อมชนิดที่เป็นไพรเมอร์ 1205 อีพอกซี และอีพอกซีที่ละลายในสารละลายโทลูอินในอัตราส่วน 2 : 1 ให้ค่าแรงดึงซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์ทางสถิติ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Parel SM. Materials in maxillofacial prosthetics. In: Reisbick MH, editor. *Dental materials in clinical dentistry, Post graduate dental hand book series, volume 11*. Bristol: John Wright • PGS, 1982: 325-63.
2. Chalian VA. Maxillofacial prosthetic materials. In: Smith DC, Williams DF, editors. *Biocompatibility of dental materials*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1982: 247-63.
3. Heller HL, McKinstry RE. Facial materials. In: McKinstry RE, editor. *Fundamentals of facial prosthetics*. Arlington, VA: ABI Professional, 1995: 79-97.
4. Ring ME. The history of maxillofacial prosthetics. *Plast Reconstr Surg* 1991; 87: 174-84.
5. พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์. *พลาสติก*. พิมพ์ครั้งที่ 13. กรุงเทพมหานคร: ป.สัมพันธ์พาณิชย์, 2539: 5-7.
6. Andres CJ, Haug SP, Munoz CA, Bernal G. Effects of environmental factors on maxillofacial elastomers: Parts I-literature review. *J Prosthet Dent* 1992; 68: 327-30.
7. Barnhart GW. A new material and technic in the art of somato prosthesis. *J Dent Res* 1960; 39: 836-44.
8. Bulbulian AH. Facial prosthetics. Illinois, USA.: Charles C Thomas Publisher, 1973: 10-29.
9. Sweeney AB, Fischer TE, Castleberry DJ, Cowperthwaite GF. Evaluation of improved maxillofacial prosthetic materials. *J Prosthet Dent* 1972; 27: 297-305.
10. Schaaf NG. Materials in maxillofacial prosthetics. *Dent Clin North Am* 1975; 19: 347-56.
11. Lewis DH, Cowper DR, Castleberry DJ, Fischer TE. New and improved elastomers for extraoral maxillofacial prostheses [Abstract]. *J Dent Res* 1977; 56(Special Issue A): 174.
12. Lewis DH, Castleberry DJ. An assessment of recent advances in maxillofacial prosthetic materials. *J Prosthet Dent* 1980; 43: 426-32.
13. Cantor R, Webber RL, Stroud L, Ryge G. Methods for evaluating prosthetic facial materials. *J Prosthet Dent* 1969; 23: 324-32.
14. Lontz JF, Schweiger Jw, Burger AW. Modifying stress strain profiles of polysiloxane elastomers for improved maxillofacial conformity [Abstract]. *J Dent Res* 1974 (Special issue): 53: 277.
15. Koran A, Craig RG. Dynamic mechanical properties of maxillofacial materials. *J Dent Res* 1975; 54: 216-21.

16. Firtell DN, Donneau ML, Anderson CR. Lightweight RTV silicone for maxillofacial prostheses. *J Prosthet Dent* 1976; 36: 544-9.
17. Moore DJ, Glaser ZR, Tabacco MJ, Linebaugh MGJ. Evaluation of polymeric materials for maxillofacial prosthetics. *J Prosthet Dent* 1977; 38: 319-26.
18. Gonzales JB. Polyurethane elastomers for facial prosthesis. *J Prosthet Dent* 1978; 39:179-87.
19. Gonzales JB, Chao EYS, An Kai-Nan. On physical and mechanical behavior of polyurethane formulations used for facial prostheses. *J Prosthet Dent* 1978; 39: 307-18.
20. Goldberg AJ, Craig RG, Filisko PE. Polyurethane elastomers as maxillofacial prosthetic materials. *J Dent Res* 1978; 57: 563-9.
21. Craig RG, Koran A, Yu R, Spencer J. Color stability of elastomers for maxillofacial appliances. *J Dent Res* 1978; 57: 866-71.
22. Koran A, Yu R, Powers JM, Craig RG. Color stability of a pigmented elastomer for maxillofacial appliances. *J Dent Res* 1979; 58: 1450-4.
23. Koran A, Powers JM, Lepeak PJ, Craid RG. Stain resistance of maxillofacial materials. *J Dent Res* 1979; 58: 1450-60.
24. Yu R, Koran A. Dimensional stability of elastomers for maxillofacial appliances. *J Dent Res* 1979; 58: 1908-9.
25. Yu R, Koran A, Craig RG. Physical properties of maxillofacial elastomers under conditions of accelerated aging. *J Dent Res* 1980; 59: 1041-7.
26. Yu R, Koran A, Craig RG. Physical properties of a pigmented silicone maxillofacial material as a function of accelerated aging. *J Dent Res* 1980; 59: 1141-8.
27. Kent K, Zeigel RF. Surface topography of silicone rubber prosthetic materials fabricated using conventional processing techniques. *J Prosthet Dent* 1982; 48: 698-702.
28. Udagama A, Drane Jb. Use of a medical grade methyltriacetoxysilane cross-linked silicone for facial prostheses. *J Prosthet Dent* 1982; 48: 86-8.
29. Segall BW, Glassman A. Use of a medical-grade silicone adhesive as a denture liner in the treatment of idiopathic oral mucosa irritation. *J Prosthet Dent* 1982; 47: 85-7.
30. Udagama A, King GK. Mechanically retained facial prostheses : Helpful or harmful. *J Prosthet Dent* 1983; 49: 85-6.

31. Kouyoumdjian J, Chalian VA, Moore BK. A comparison of the physical properties of a room temperature vulcanizing silicone modified and unmodified. *J Prothet Dent* 1985; 53: 388-91.
32. Wolfaardt JE, Chandler HD, Smith BA. Mechanical properties of a new facial prosthetic material. *J Prothet Dent* 1985; 53: 228-34.
33. Bell WT, Chalian VA, Moore BK. Polydimethyl siloxane materials in maxillofacial prosthetics : Evaluation and comparison of physical properties. *J Prothet Dent* 1985; 54: 404-10.
34. Farah JW, Robinson JC, Koran A, Craig RG, Hood JAA. Properties of a modified cross-linked silicone for maxillofacial prostheses. *J Oral Rehabil* 1984; 14: 599-605.
35. Udagama A. Urethane-lined silicone facial prostheses. *J Prothet Dent* 1987; 58: 351-4.
36. Wang R, Collard SM, Lemon J. Adhesion of silicone to polyurethane in maxillofacial prosthesis. *Int J Prosthodont* 1994; 7: 43-9.
37. Taft RM, Cameron SM, Knudson RC, Runyan DA. The effect of primers and surface characteristics on the adhesion in peel force of silicone elastomers bonded to resin materials. *J Prothet Dent* 1996; 76: 515-8.
38. Singer MI, Mitchell DL, Pellew GB. Effect of primers on the bond strength of silicone elastomers and polyurethane. *J Prothet Dent* 1988; 60: 602-5.
39. McMordie R, King GE. Evaluation of primers used for bonding silicone to denture base materials. *J Prothet Dent* 1989; 61: 636-9.
40. Davis BK, Lemon JC. *The effect of various primers on bond strength of polyurethane to silicone*. Thesis M.D. Anderson Cancer Center, University of Texas, 1993.
41. จารูมา ศักดิ์ดี, มัทนา พุกยาพงษ์, นิยม ชำรงค์อนันต์สกุล, ปิยวัฒน์ พันธุ์โกศล. *การศึกษาความต้านทานต่อการลอกออกในการยึดซิลิโคนเข้ากับแผ่นโพลียูรีเทนเมื่อทาสารไพรเมอร์* รายงานการวิจัยทางทันตกรรม (3205-312). คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร: 2539.
42. จารูวรรณ จิตรทองคำโชติ, นรินทร์ รัตนภพ, สิริมา ลิมชัยชนะ, นิยม ชำรงค์อนันต์สกุล, ปิยวัฒน์ พันธุ์โกศล : *การศึกษาความต้านทานต่อการลอกออกในการยึดซิลิโคนเข้ากับโพลียูรีเทนชนิดเหลวเมื่อทาสารไพรเมอร์* รายงานการวิจัยทางทันตกรรม (3205-312), คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร: 2541.
43. Saunders KJ. *Organic polymer chemistry*. London: Chapman and Hall , 1976: 389-411.

44. ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. *โพลีเมอร์เชิงพาณิชย์*. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร: โอเดียนสโตร์, 2526; 348-68.
45. ชลธิชา นุ่มหอม. *โพลีเมอร์*. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร: พรศิวการพิมพ์, 2538: 364-71.
46. Lontz JF. State of the art materials used-for maxillofacial prosthetic reconstruction. *Dent Clin North Am* 1990; 34: 307-25.
47. Kent K, Zeigel RF, Kent K, Frost AL, Schaaf NG. Controlling the porosity and density of silicone prosthetic materials. *J Prosthet Dent* 1983; 50: 230-6.
48. อรุษา สรวารี. *สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแลกเกอร์)*. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539:49-58.
49. ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. *เคมีโพลีเมอร์พื้นฐาน*. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2527: 294-302.
50. ปราณอม ขาวเมฆ : *คู่มือหลักสูตรเข้มข้น การวิเคราะห์โดยใช้ Fourier transform infrared spectrometer*. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539: 3-12.
51. แม้น อมรสิทธิ์, อมร เพชรสม. *หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ*. กรุงเทพมหานคร: ชวนการพิมพ์, 2534:108-92.
52. Lewis AF. Epoxy Resin Adhesives. In: May CA, editors. *Epoxy resins chemistry and technology*, 2nd ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 1988: 653- 718.
53. Garnish EW. Epoxy base adhesives. In: Kinloch AJ, editor. *Structural adhesives developments in resins and primers*. New York: Elsevier Applied Science Publishers. 1986: 57-76.
54. Lee H, Neville K, editors. Handbook of epoxy resins. Chapter 21, *Epoxy resin adhesives*. New York: McGraw-Hill book company, 1967:1-49.

ประวัติเจ้าของวิทยานิพนธ์

นาย นิยม ชำรงค้อนันต์สกุล เกิดเมื่อวันที่ 13 พฤษภาคม 2507 ที่จังหวัด บุรีรัมย์ เริ่มการศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1 ถึง 4 ที่ โรงเรียน อ่าวเคี้ยว ประถมปีที่ 5 ถึง 6 ที่ โรงเรียน เขตการทาง สงเคราะห์ 5 (ไทรคามสิทธิศิลป์) ชั้นมัธยมศึกษาที่ 1 ถึง 6 ที่โรงเรียน สามเสนวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร และเข้าศึกษาที่ คณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เมื่อจบการศึกษาได้เข้ารับราชการเป็นทันตแพทย์ประจำโรงพยาบาลบ้านหมอ อำเภอบ้านหมอ จังหวัดสระบุรี เป็นเวลา 2 ปี จากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อระดับประกาศนียบัตร วิทยาศาสตร์การแพทย์คลินิก สาขาทันตกรรมประดิษฐ์ ที่คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นเวลา 1 ปี และได้กลับไปรับราชการที่สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดสระบุรีเป็นเวลา 1 ปี ก่อนที่จะโอนมารับราชการที่โรงพยาบาล คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จนถึงปัจจุบัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย