

ผลของสารที่บดแสงสีขาวย่างต่างชนิดต่อคุณสมบัติทางกายภาพของโพลีไดเมทิลไซลอกเซน



นางสาว กุสลี ทองปัสสะ


สถาบันวิทยบริการ  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์ ภาควิชาทันตกรรมประดิษฐ์  
คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0510-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF WHITE COLOR OPACIFIERS ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF  
POLYDIMETHYLSILOXANE



MISS KUSSALEE THONGPUSSA

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Dentistry in Prosthodontics

Department of Prosthodontics

Faculty of Dentistry

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0510-5



กุสลี ทองบุสสะ : ผลของสารทึบแสงสีขาวต่างชนิดต่อคุณสมบัติทางกายภาพของโพลีไดเมทิลซิลอกเซน (Effects of white color opacifiers on the physical properties of Polydimethylsiloxane) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ทันตแพทย์ ดร. ปิยวัฒน์ พันธุ์โกศล จำนวนหน้า 84 หน้า. ISBN 974-03-0515-5.

อวัยวะเทียมที่ใช้กับช่องปากและไบหน้ามักมีอายุการใช้งานไม่ยาวนาน ส่วนหนึ่งเนื่องจากเกิดการฉีกขาดและการเสียคุณสมบัติทางกายภาพของโพลีไดเมทิลซิลอกเซน การเติมสารทึบแสงสีขาวลงในเนื้อของวัสดุโพลีไดเมทิลซิลอกเซนอาจเป็นสาเหตุหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบผลกระทบของสารทึบแสงสีขาวต่างชนิดที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพของโพลีไดเมทิลซิลอกเซน

ทำการทดลองวัดสีผิวบริเวณท้องแขนอาสาสมัคร 49 คน เพื่อหาค่าเฉลี่ยความสว่าง-มืดของผิวหน้า ( $L^*$ ) เตรียมกลุ่มทดสอบ 5 กลุ่ม โดยผสมวัสดุโพลีไดเมทิลซิลอกเซน A-2186 เข้ากับสารทึบแสงสีขาว 4 ชนิด คือ สารทึบแสงสีขาวของแฟกเตอร์ ทุ , ดินขาว, ผงสังกะสีออกไซด์ และผงไททานเนียมออกไซด์ตามลำดับ ให้มีค่าความสว่าง-มืด 63.83 แล้วสร้างขึ้นทดสอบรูปดัมเบลกลุ่มละ 15 ชิ้นตามมาตรฐาน ISO 37 เพื่อนำไปวัดค่ากำลังแรงดึงและอัตราส่วนการยืดตัว สร้างขึ้นทดสอบรูปหักมุมกลุ่มละ 10 ชิ้นตามมาตรฐาน ASTM D624 เพื่อวัดค่าความกำลังแรงฉีกและความแข็งผิว เทียบกับกลุ่มควบคุมซึ่งเป็นโพลีไดเมทิลซิลอกเซนที่ไม่ได้ผสมสารทึบแสงสีขาว เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวและทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยแบบวิเคราะห์ของด้นแคน พบว่ากลุ่มทดสอบที่ได้รับการเติมสารทึบแสงสีขาวต่างชนิดมีค่ากำลังแรงดึง อัตราส่วนการยืดตัว และความแข็งผิวแตกต่างกับกลุ่มควบคุม ( $P < 0.05$ ) ส่วนค่ากำลังแรงฉีกไม่พบความแตกต่างทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) ผลการทดลองสรุปได้ว่าสารทึบแสงสีขาวทุกชนิดต่างก็มีผลในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของโพลีไดเมทิลซิลอกเซน และสารทึบแสงสีขาวของแฟกเตอร์ ทุ มีผลเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของโพลีไดเมทิลซิลอกเซนน้อยที่สุด

ภาควิชา ทันตกรรมประดิษฐ์

สาขาวิชาทันตกรรมประดิษฐ์

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4276102232 : MAJOR PROSTHODONTICS

KEY WORD: White color opacifiers/ physical properties/ polydimethylsiloxane/ skin color

**Kussalee Thongpussa : Effects of the white color opacifiers on the physical properties of Polydimethylsiloxane. THESIS ADVISOR : Associate Professor Dr. Piyawat Phankosol , 84 pp. ISBN 974-03-0510-5.**

The silicone facial prostheses usually have a short life expectancy and need to be refabricated. One of the reasons partly is the degradation of the physical properties such as tearing edges and color changes. The white color opacifier which need to be blended within the polydimethylsiloxane material may take a part in this changes. This study was to determine the effects of various kinds of white color opacifiers on the physical properties of the Polydimethylsiloxane.

The palmer side of forearm of 49 randomly selected Thai volunteers were measured with a spectrophotometer to determine the average skin brightness (  $L^*$  ) which exhibited a value of 63.83. The specimens were prepared to achieve the average value of skin brightness by mixing polydimethylsiloxane A-2186 with each of 4 color opacifiers : the Factor II intrinsic coloration, Georgia Kaolin , Zinc oxide powder and Titanium oxide powder. Fifteen dumbbell specimens for each 4 experimental groups and 1 control group were fabricated following the ISO 37 for measuring tensile strength and percent of elongation. Ten specimens for each groups were also fabricated following ASTM D624 for evaluating the Shore A hardness and tear strength. The data was compared and statistically analyzed using One-way Analysis of Variance followed by Duncan 's New Multiple Range Test. It was found that all kinds of the white color opacifiers in this study affected the physical properties of the A-2186 material compared to control group (  $P < 0.05$  ). Factor II intrinsic coloration appeared to be the least affected material.

Department of Prosthodontics

Student's signature.....

Field of study Master of Science ( Prosthodontics )

Advisor's signature.....

Academic year 2001

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลงไม่ได้ หากไม่ได้รับความรู้ คำแนะนำและความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ทนต์แพทย์ ดร.ปิยวัฒน์ พันธุ์โกศล ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รวมทั้ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทนต์แพทย์หญิง จำไพ โจรนกิจ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทนต์แพทย์ ดร.ไพฑูรย์ สังวรินทะ รองศาสตราจารย์ ทนต์แพทย์ ดร.สุนทรา พันธุ์มีเกียรติ ที่กรุณาสละเวลาตรวจสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำอันมีค่าเพื่อปรับปรุงเนื้อหาวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ขึ้น ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ Dr. Gerry Mclaughlin ที่กรุณาอำนวยความสะดวกในการจัดซื้อ และจัดส่งวัสดุที่ใช้ในการทดลองจากสหรัฐอเมริกา คุณสมจิต ชุ่มเมืองเย็น เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการตัดชิ้นทดสอบ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำห้องศูนย์วิจัยทันตวัสดุศาสตร์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิจัย รวมทั้งทนต์แพทย์หญิงพนารัตน์ ขอดแก้ว ผู้ช่วยเหลืออย่างดียิ่งในการสร้างชิ้นทดสอบ

ผู้วิจัยจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณและขอบคุณทุกท่านที่ได้เอ่ยนามและผู้ที่มีส่วนช่วยเหลืออีกหลายท่านที่ไม่ได้ระบุถึง มา ณ ที่นี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญกราฟ.....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย คำถามของการวิจัย.....	1
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.5 ข้อจำกัดของการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. วรรณกรรมปริทัศน์	
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	4
2.2 การพัฒนาซิลิโคน อีลาสโตเมอร์.....	5
2.3 โพลีไดเมทิลไซลอกเซน.....	15
2.4 คุณสมบัติทั่วไปของซิลิโคนและการใช้ประโยชน์.....	16
2.5 คุณสมบัติของโพลีไดเมทิลไซลอกเซน A-2186 .....	20
2.6 การแต่งสีอวยวะเทียม.....	21
2.7 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการมองเห็นสี.....	23
2.8 หลักการวัดสี.....	28

2.9 คุณสมบัติทางกายภาพของอวัยวะเทียม.....	31
<b>3. วิธีดำเนินการวิจัย</b>	
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย .....	36
3.1.1 ขั้นตอนการวัดสีผิว.....	36
3.1.2 ขั้นตอนการผสมสารแต่งสีเพื่อหาอัตราส่วนผสม.....	37
3.1.3 ขั้นตอนการสร้างขึ้นทดสอบ.....	39
3.1.4 การทดสอบความแข็งผิว.....	42
3.1.5 การทดสอบความแข็งแรงจึก.....	43
3.1.6 การทดสอบความแข็งแรงดึงและอัตราส่วนการยืดตัว.....	44
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	45
3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	48
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	48
<b>4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล</b>	
4.1 ผลการทดลอง.....	49
<b>5. สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 อภิปรายผลการวิจัย.....	58
5.2 สรุปผลการวิจัย.....	63
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	64
รายการอ้างอิง.....	65
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	69
ภาคผนวก.....	70



## สารบัญรูป

## หน้า

รูปที่ 1 แสดงโพลีไดเมทิลไซลอกเซน A-2186.....	21
รูปที่ 2 แสดงมิติของสีในแกน L* ,a* และ b*.....	30
รูปที่ 3 แสดงการวัดสีผิวบริเวณท้องแขน.....	37
รูปที่ 4 สารแต่งสีทั้ง 4 ชนิดที่ใช้ทดสอบ.....	37
รูปที่ 5 แสดงการวัดสีวัสดุด้วยเครื่อง อัลตรา สแกน เอกซ์ อี.....	37
รูปที่ 6 แสดงการชั่งน้ำหนักสารที่จะนำไปวัดสี ด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิทัล.....	38
รูปที่ 7 แสดงการต่อภาชนะเข้ากับเครื่องดูดสุญญากาศ.....	39
รูปที่ 8 แสดงมิเตอร์สุญญากาศ.....	39
รูปที่ 9 แสดงภาพแม่แบบหล่อเหล็กไร้สนิม.....	40
รูปที่ 10 แสดงวิธีการปาดวัสดุบนเครื่องสั่น.....	40
รูปที่ 11a แสดงหัวตัดขึ้นทดสอบโลหะ ISO 37.....	40
11b แสดงภาพขณะตัด.....	40
รูปที่ 12a ขึ้นทดสอบความแข็งแรงดึงในแต่ละกลุ่ม.....	41
12b ขึ้นทดสอบความแข็งแรงดึงตามมาตรฐาน ISO 37.....	41
รูปที่ 13a แสดงเครื่องตัดขึ้นทดสอบ.....	41
13b แสดงหัวตัดขึ้นทดสอบรูปหักมุม ASTM D624.....	41
รูปที่ 14a แสดงภาพขึ้นทดสอบความแข็งแรงฉีก.....	42
14b ขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D624.....	42
รูปที่ 15 การทดสอบความแข็งแรงผิว.....	43
รูปที่ 16 แสดงตุ้มกดบนแป้นเครื่องวัดความแข็งแรงผิว.....	43
รูปที่ 17 แสดงการจับขึ้นทดสอบความแข็งแรงดึงให้ตรงกับตำแหน่งที่ทำไว้บนหัวจับขึ้นทดสอบ.....	44
รูปที่ 18 เครื่องวัดสีอัลตราสแกน เอกซ์ อี.....	45
รูปที่ 19 เครื่องทดสอบ ลอยด์ ยูนิเวอร์ซัลรุ่น LR 10K.....	46
รูปที่ 20a เครื่องวัดความแข็งแรงผิวประกอบด้วยขาตั้งรุ่น 471.....	47
20b หัวทดสอบรุ่น 408.....	47

สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่ 21 แสดงเครื่องขังระบบดิจิทัล.....47



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	สัดส่วนของผลผลิตที่ได้จากเมทิลคลอไรด์ทำปฏิกิริยากับซิลิคอนโดยตรง.....	8
ตารางที่ 2	พลังงานพันธะบางพันธะของ ซิลิคอนและคาร์บอน.....	19
ตารางที่ 3	แสดงปริมาณสารแต่งสีแต่ละชนิดที่ต้องใช้ เพื่อให้มีค่าความสว่าง-มืด เท่ากัน.....	38
ตารางที่ 4	แสดงรายละเอียดของผลิตภัณฑ์.....	38
ตารางที่ 5	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของค่าความแข็งผิว.....	50
ตารางที่ 6	แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนค่าความแข็งผิวด้วยแบบทดสอบของดันแคน.....	51
ตารางที่ 7	แสดงค่าเฉลี่ยความแข็งผิว และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	51
ตารางที่ 8	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของกำลังแรงฉีก.....	52
ตารางที่ 9	แสดงค่าเฉลี่ยกำลังแรงฉีก และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	53
ตารางที่ 10	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของค่ากำลังแรงดึง.....	54
ตารางที่ 11	แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของกำลังแรงดึงด้วยแบบทดสอบของดันแคน.....	54
ตารางที่ 12	แสดงค่าเฉลี่ยกำลังแรงดึง และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	55
ตารางที่ 13	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของอัตราส่วนการยืดตัว.....	57
ตารางที่ 14	แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนอัตราส่วนการยืดตัวด้วยแบบทดสอบของดันแคน.....	57
ตารางที่ 15	แสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนการยืดตัว และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	57

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญกราฟ

หน้า

กราฟที่ 1 แสดงปริมาณสารทึบแสงสีขาวยุที่ใช้ในการทำให้วัสดุมีความสว่าง-มืดเท่ากัน.....	49
กราฟที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยความเข้มผิว และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน .....	50
กราฟที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยความกำลังแรงฉีก และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	52
กราฟที่ 4 แสดงค่า เฉลี่ยกำลังแรงดึง และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน .....	54
กราฟที่ 5 แสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนการยืดตัว และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	56



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทำอวัยวะเทียมสำหรับใบหน้ามีลักษณะใส ไม่มีสี ขั้นตอนสำคัญอันหนึ่งในการแต่งสีอวัยวะเทียมให้มีสีเหมือนกับสีผิว คือการเติมสารทึบแสงเพื่อให้วัสดุที่ใช้ในการทำอวัยวะเทียมมีสีขุ่นขึ้นคล้ายกับผิวหนัง การเติมสารทึบแสงจะต้องเติมลงไปเป็นอันดับแรกในปริมาณมากกว่าการเติมสีอื่นที่มีความเข้มข้นของเม็ดสีสูงกว่า รวมทั้งในการแต่งสีอวัยวะเทียมซึ่งมี 2 ขั้นตอน ได้แก่การแต่งสีภายในเนื้อวัสดุในขณะที่วัสดุยังไม่ก่อตัว และการแต่งสีภายนอกหลังจากที่วัสดุก่อตัวแล้ว สารทึบแสงสีขาวเป็นสีที่จำเป็นต้องแต่งเป็นสีภายในเนื้อวัสดุเสมอ โดยทั่วไปการแต่งสีภายในเนื้อวัสดุจะทำให้มีสีคล้ายกับผิวหนังบริเวณที่มีสีอ่อนที่สุดในบริเวณที่จะใส่อวัยวะเทียมเท่านั้น ส่วนสีอื่น ๆ มักมีการเติมเข้ามาภายนอกเพื่อแต่งสีในแต่ละบริเวณ ซึ่งมีความอ่อนเข้มไม่เท่ากัน ดังนั้นการเติมสารทึบแสงที่ต่างกัน โดยที่มีคุณสมบัติและความทึบแสงไม่เท่ากัน ในปริมาณที่ไม่เท่ากัน ในลักษณะที่เป็นสารแขวนลอยในเนื้อวัสดุ น่าจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ทำอวัยวะเทียมต่าง ๆ กัน

#### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อทดสอบว่าสารทึบแสงสีขาวต่างชนิดที่เติมลงในวัสดุที่ใช้ทำอวัยวะเทียมมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของโพลีไคเมธิลไซลอคเซนอย่างไร รวมถึงการเสนอสารทึบแสงสีขาวที่น่าเลือกใช้ตามแนวทางที่วัสดุดังกล่าวไม่มีผล หรือมีผลเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของโพลีไคเมธิลไซลอคเซนน้อยที่สุด

#### คำถามของการวิจัย

สารทึบแสงสีขาว 4 ชนิดที่เติมลงในวัสดุที่ใช้ทำอวัยวะเทียมในขั้นตอนของการแต่งสีในเนื้อวัสดุ (Intrinsic coloration) มีผลกระทบต่อค่าความแข็งผิว (Shore A surface hardness) ค่ากำลังแรงฉีก (Tear strength) กำลังแรงดึง (Tensile strength) และ อัตราส่วนการยืดตัว (Percent of elongation) หรือไม่ อย่างไร

### สมมติฐานของการวิจัย

สมมติฐานว่าง : สารทึบแสงสีขาวทั้ง 4 ชนิดที่เติมลงในโพลีไคเมธิลไซลอคเซน A-2186 ไม่มีผลในการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิว, ค่ากำลังแรงฉีก, ค่ากำลังแรงดึง และอัตราส่วนการยืดตัวของโพลีไคเมธิลไซลอคเซน ( $p > 0.05$ ) {  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_n$ ;  $n = 1-5$  }

สมมติฐานแย้ง : สารทึบแสงสีขาวทั้ง 4 ชนิดที่เติมลงในโพลีไคเมธิลไซลอคเซน A-2186 มีผลในการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งผิว, ค่ากำลังแรงฉีก, ค่ากำลังแรงดึง และอัตราส่วนการยืดตัวของโพลีไคเมธิลไซลอคเซน ( $p \leq 0.05$ ) {  $\mu_1 \neq \mu_n$  อย่างน้อย 1 คู่ }

### ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยโดยการทดลอง ( Experimental research ) ทำการศึกษาผลของการเติมสารทึบแสงชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพของโพลีไคเมธิลไซลอคเซนที่ใช้ทำอวัยวะเทียม ( โพลีไคเมธิลไซลอคเซน A-2186) โดยมี

ตัวแปรอิสระ 1 ตัว ได้แก่ สารทึบแสงสีขาว 4 ชนิด คือ สารทึบแสงสีขาวของแฟกเตอร์ทู ( Factor II intrinsic coloration ) , ดินขาว จอร์เจีย ( Georgia Kaolin ) , ผงสังกะสีออกไซด์ ( Zinc oxide powder ) และ ผงไททาเนียมออกไซด์ ( Titanium oxide powder )

ตัวแปรตาม ได้แก่ ค่าความแข็งผิว ( Shore A surface hardness ) ค่ากำลังแรงฉีก ( Tear strength ) กำลังแรงดึง ( Tensile strength ) และ อัตราส่วนการยืดตัว ( Percent of elongation ) ของโพลีไคเมธิลไซลอคเซนที่ได้รับการเติมสารทึบแสงแต่ละชนิด เทียบกับกลุ่มควบคุมซึ่งเป็นโพลีไคเมธิลไซลอคเซนที่ไม่ได้ผสมสารแต่งสี

### ข้อตกลงเบื้องต้น

หากเกิดข้อผิดพลาด โดยมีการเสียชิ้นทดสอบในแต่ละกลุ่มทดสอบไปไม่เกินกว่า 3 ชิ้น ในหนึ่งกลุ่มทดสอบกำลังแรงดึง และ ไม่เกิน 2 ชิ้นในการทดสอบกำลังแรงฉีก ( ร้อยละ 20 ) ผู้วิจัยจะนำชิ้นทดสอบที่ทำเกินไว้มาเสริมแทน แต่ในกรณีที่มีการเสียหายมากกว่า 3 ชิ้น จะทำการสร้างทดแทนชิ้นใหม่ให้มีปริมาณ 15 ชิ้น และ 10 ชิ้นตามลำดับเช่นเดิม

### ข้อจำกัดของการวิจัย

การทดลองนี้ใช้วัสดุวิจัยที่มีราคาสูง ไม่สามารถสร้างขนาดกลุ่มตัวอย่างให้มีจำนวนมากได้ ดังนั้นการหาขนาดของกลุ่มตัวอย่างจึงเป็นการคำนวณจากความเป็นไปได้ จากปริมาณวัสดุที่มี

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากการวิจัยนี้น่าจะเป็นแนวทางในการเลือกใช้สารทึบแสง ที่เหมาะสมโดยมีเกณฑ์ว่าสารที่ดีที่สุดควรเสริมคุณสมบัติของโพลีไคเมธิลไซลอกเซน A-2186 ให้ดีขึ้น , ไม่ควรก่อให้เกิดการลดสมบัติทางกายภาพของโพลีไคเมธิลไซลอกเซน A-2186 หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด นอกจากนี้ น่าจะทำให้ได้อัตราการผสมสารทึบแสงสีขาวโดยประมาณในการทำอวัยวะเทียมในกลุ่มคนไทย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์

### แนวคิดและทฤษฎี

สารทึบแสงเป็นสารแต่งสีชนิดหนึ่งที่ต้องแต่งเป็นสีภายในเนื้อวัสดุเสมอ โดยทั่วไปการแต่งสีภายในเนื้อวัสดุจะทำให้มีสีคล้ายกับผิวส่วนที่มีสีอ่อนที่สุดในบริเวณที่จะใส่อวัยวะเทียมเท่านั้น ส่วนสีอื่น ๆ มักมีการเติมเข้ามาจากภายนอกเพื่อแต่งสีในแต่ละบริเวณซึ่งมีความอ่อนเข้มไม่เท่ากัน ดังนั้นการเติมสารทึบแสงต่างชนิดที่มีคุณสมบัติและความทึบแสงไม่เท่ากัน ในปริมาณต่าง ๆ กัน ในลักษณะที่เป็นสารแขวนลอยในเนื้อวัสดุ รวมทั้งปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นระหว่างสารที่เติม ( Filler ) กับโครงข่ายของสารหลัก ( Matrix ) น่าจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ทำอวัยวะเทียมต่าง ๆ กัน

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นับตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบันวัสดุที่ใช้ในการทำอวัยวะเทียมมีมากมาย ทั้งชนิดที่มีลักษณะแข็ง เช่น โลหะผสมเซรามิค และโพลีเมอร์ชนิดแข็ง และชนิดที่มีลักษณะนิ่มขึ้น เช่น อีลาสโตเมอร์ ได้แก่ ลาเท็กซ์ และพลาสติกซอล ภายหลังจากปี ค.ศ. 1970 วัสดุที่ใช้ทำอวัยวะเทียมได้รับการพัฒนาค้นคว้าและปรับปรุงขึ้นอย่างมาก และได้แบ่งวัสดุที่ใช้ทำอวัยวะเทียมเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. วัสดุที่ใช้เพื่อความสวยงามภายนอก
2. วัสดุที่ใช้ฝังในร่างกาย แบบที่สามารถถอดออกได้
3. วัสดุที่ใช้ฝังในร่างกายถาวร

วัสดุที่จะใช้เพื่อวัตถุประสงค์แต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน สำหรับวัสดุที่ใช้ทำอวัยวะเทียมภายนอกนั้น ควรจะมีคุณสมบัติที่สามารถจะตกแต่งให้มีสีและพื้นผิวที่คล้ายผิวมนุษย์ได้ ก่อให้เกิดความสวยงามคล้ายจริงเพื่อทดแทนอวัยวะที่สูญหายไป นอกจากนี้ยังควรมีคุณสมบัติที่เข้ากับเนื้อเยื่อได้ ไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้ของร่างกายต่ออวัยวะเทียม รวมทั้งมีความแข็งแรงและคงทนต่อการใช้งาน<sup>1</sup> ในปัจจุบันวัสดุที่มีคุณสมบัติดังกล่าว ได้แก่ โพลีเมธิลเมทาคริเลต โพลีไดเมธิลไซลอคเซน และโพลียูรีเทน โดยโพลีไดเมธิลไซลอคเซนหรือซิลิโคน เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมมากที่สุด<sup>2</sup> เนื่องจากมีความสามารถในการยืดหยุ่นดี และสามารถตกแต่งให้มีรูปลักษณะเหมือนอวัยวะข้างเคียงได้ในที่นี้จะกล่าวถึงที่มาของ ซิลิโคน โพลีเมอร์

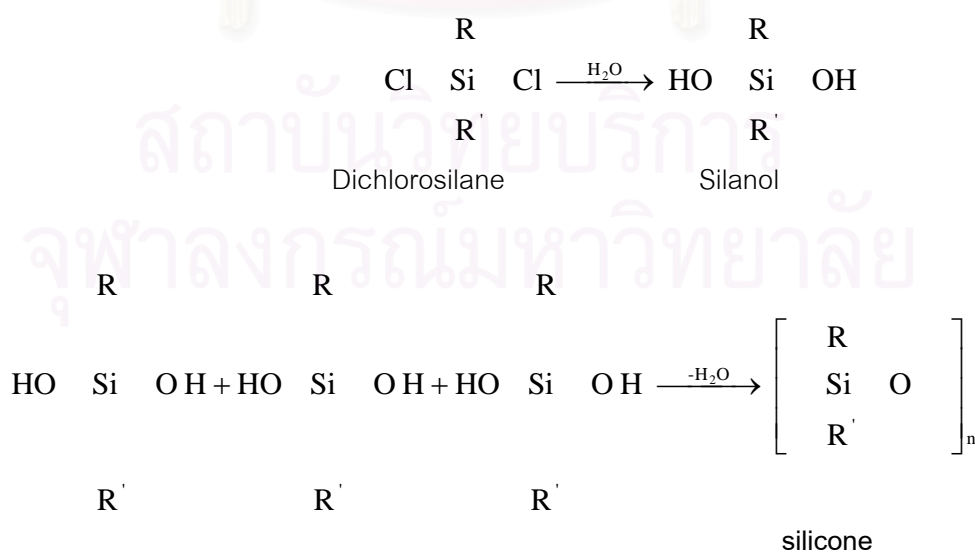


## การพัฒนาซิลิโคน อีลาสโตเมอร์

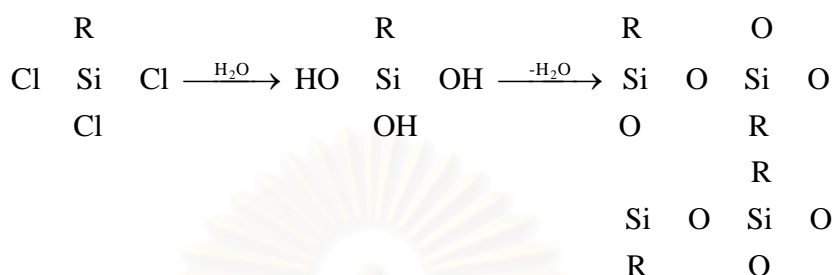
Dumas Friedel และ Grafts เป็นบุคคลกลุ่มแรกที่เตรียมสารประกอบของ ออร์กาโนซิลิคอน (Organosilicon compounds) และต่อมา Kipping ( University Collage , Nottingham สหราชอาณาจักร ) ถือว่าเป็นบุคคลแรกที่ได้ศึกษาและวางรากฐานของเคมีออร์กาโนซิลิคอนในระหว่าง ค.ศ. 1899-1944 แต่งานวิจัยของ Kipping เน้นเฉพาะสารประกอบของซิลิคอนที่ไม่ใช่โพลีเมอร์เพียงเท่านั้น ความสนใจในด้านการพัฒนาซิลิคอนโพลีเมอร์ในเชิงพาณิชย์เริ่มในทศวรรษ 1930 โดยบริษัท Corning Glass Work (USA) และ General Electric Co. สหรัฐอเมริกา เป้าหมายของการวิจัยคือ พยายามประดิษฐ์วัสดุที่สามารถทนความร้อนได้ดีจนพัฒนาซิลิโคนเรซินเป็นผลสำเร็จ ซิลิโคนในเชิงพาณิชย์วางตลาดเป็นครั้งแรกโดยบริษัท Dow Corning Corp. สหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1943 และต่อมาโดยบริษัท General Electric Co. สหรัฐอเมริกา ในปี ค.ศ. 1946<sup>3</sup>

## การเตรียมโมโนเมอร์ในการผลิตซิลิโคน<sup>4</sup>

สารตั้งต้นที่ใช้สำหรับผลิตซิลิโคนคือสารจำพวกคลอโรไฮโดรเจน ซึ่งทำปฏิกิริยากับน้ำได้ไฮโดรเจน (silanol) ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นไม่เสถียรและควบแน่นต่อไปได้ไฮโดรเจนตามต้องการ เช่น ไดคลอโรไฮโดรเจนจะเกิดซิลิคอนที่มีโครงสร้างเชิงเส้นตรงดังนี้



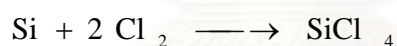
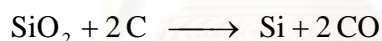
โพลิเมอร์จำพวกนี้เป็นพื้นฐานของซิลิโคนของไหล และซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ส่วนไดรคอลลอโรไซเลน ให้ซิลิโคนที่มีสาขาไซ้และที่มีโครงสร้างเป็นร่างแห เช่น



crosslinked silicone

ซิลิโคนที่มีโครงสร้างข้างต้นนี้เป็นพื้นฐานของซิลิโคนเรซินหรือพลาสติก

อุตสาหกรรมเตรียมคลอโรไซเลน โดยใช้โลหะซิลิคอนและซิลิคอนเตตระคลอไรด์เป็นสารตั้งต้น ซึ่งสารทั้งสองต่างเตรียมจากซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ดังนี้



silicon tetrachloride (tetrachlorosilane)

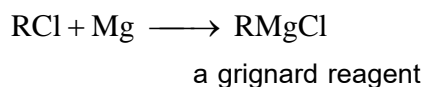
วิธีการเตรียมคลอโรไซเลนมีหลายวิธี ที่สำคัญคือดังนี้

ก. กระบวนการกริกยาร์ด (Grignard process)

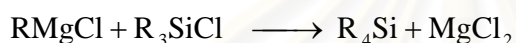
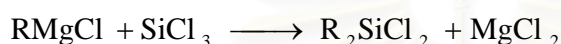
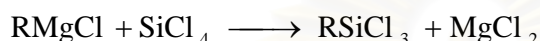
กระบวนการนี้ ใช้สารออร์กาโนแมกนีเซียม เพื่อให้หมู่ออร์กาโนแก่ซิลิคอน



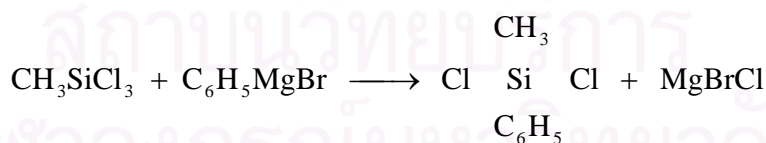
ส่วนสารออร์กาโนแมกนีเซียม (เรียกว่าน้ำยากกริกยาร์ด) เตรียมโดยการเติม อัลคิล เฮไลด์ (ทั่วไปเป็นคลอไรด์) หรือ อาริล เฮไลด์ (ทั่วไปเป็นโบรไมด์) กับผงแมกนีเซียม ที่แขวนลอยในอีเทอร์แห้ง (ทั่วไปเป็นไดเอทิลอีเทอร์) เช่น



เมื่อเติมซิลิคอนเตตระคลอไรด์ ( $\text{SiCl}_4$ ) ให้กับน้ำยากริกยาด์ข้างต้น (ปฏิกิริยาคายความร้อนมากจึงต้องคอยควบคุมอุณหภูมิให้เย็นอยู่เสมอ) จะได้สารออร์กาโนซิลิคอนหลายสาร ซึ่งเกิดจากการแทนที่เป็นขั้นๆ ดังนี้ (ส่วนผลผลิตพลอยได้คือ  $\text{MgCl}_2$  จะตกตะกอนออกมา)

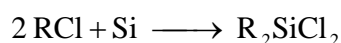


ถึงแม้วิธีนี้จะได้ไซเลนออกมาในรูปของของผสม ปริมาณของแต่ละองค์ประกอบสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมปริมาณของน้ำยากริกยาด์ที่ใช้และสภาวะของปฏิกิริยา ทั่วไปจะได้ไดอัลซิล (หรือไดอาริล) ไดคลอโรไซเลนเป็นผลิตภัณฑ์หลัก ทั้งนี้เนื่องจากผลทางสเตอริก (Steric effect) ช่วยป้องกันการเพิ่มหมู่อินทรีย์ (R) ตัวต่อไป สารต่างๆ ที่เกิดขึ้นสามารถแยกออกจากกันและกันโดยการกลั่นแบบลำดับส่วน กระบวนการกริกยาด์เป็นกระบวนการแรกที่น่ามาใช้ในทางอุตสาหกรรมการเตรียมคลอโรไซเลน แต่ในปัจจุบันได้หันมาใช้กระบวนการโดยตรง เพราะกระบวนการโดยตรงนั้นดำเนินการได้ง่ายกว่า และมีต้นทุนที่ถูกลงกว่า แต่กระบวนการกริกยาด์ก็ยังคงมีความสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้เตรียมออร์กาโนไซเลนที่ไม่อาจเตรียมโดยกระบวนการโดยตรงได้ เช่น เตรียมคลอโรไซเลนที่มีทั้งหมู่อัลซิลและหมู่อาริล ดังนี้



ข. กระบวนการโดยตรง (Direct process)

กระบวนการนี้เปลี่ยนธาตุซิลิคอนเป็นคลอโรไซเลนโดยตรง โดยให้ทำปฏิกิริยากับ อัลซิล หรือ อาริล คลอไรด์ ดังนี้



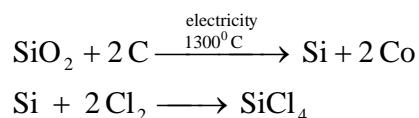
ในทางปฏิบัติ นอกจากจะได้  $R_2SiCl_2$  แล้ว ยังได้คลอโรซิลิโคนไฮโดรเจนอื่นๆ เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ด้วยกระบวนการทั่วไป ผ่านเมทิลคลอไรด์ ( $CH_3Cl$ ) เข้าไปยังของผสมของซิลิคอนและทองแดง (ทำหน้าที่เป็นตัวเร่ง) ที่ 250-280 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ได้จากปฏิกิริยาทั่วไปแสดงในตารางที่ 1 องค์ประกอบเหล่านี้สามารถแยกออกจากกันและกันโดยการกลั่นแบบลำดับส่วน

ตารางที่ 1 สัดส่วนของผลผลิตที่ได้จากเมทิลคลอไรด์ทำปฏิกิริยากับซิลิคอนโดยตรง ( $CH_3Cl + Si$ )

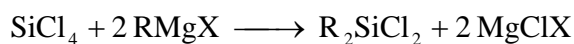
สารประกอบ	จุดเดือด ( $^{\circ}C$ )	เปอร์เซ็นต์
ไดเมทิลไดคลอโรไฮโดรเจน, $(CH_3)_2SiCl_2$	70	75
เมทิลไตรคลอโรไฮโดรเจน $CH_3SiCl_3$	66	10
ไตรเมทิลคลอโรไฮโดรเจน $(CH_3)_3SiCl$	58	4
เมทิลไดคลอโรไฮโดรเจน $CH_3SiHCl_2$	41	6
ซิลิคอนเตตระคลอไรด์	58	ปริมาณเล็กน้อย
เตตระเมทิลไฮโดรเจน $(CH_3)_4Si$	26	
ไตรคลอโรไฮโดรเจน $SiHCl_3$	32	
กากที่มีจุดเดือดสูง	100-200	

### สรุปการเตรียมโมโนเมอร์

วัสดุที่ใช้เตรียมโมโนเมอร์คือโลหะซิลิคอนและเตตระคลอโรไฮโดรเจน ซึ่งสามารถเตรียมได้จาก



ก. จากเตตระคลอโรซิลเลน โดย Grignard reaction



ข. จากโลหะซิลิคอนโดยปฏิกิริยา โดยตรง หรือ “Rochow process”



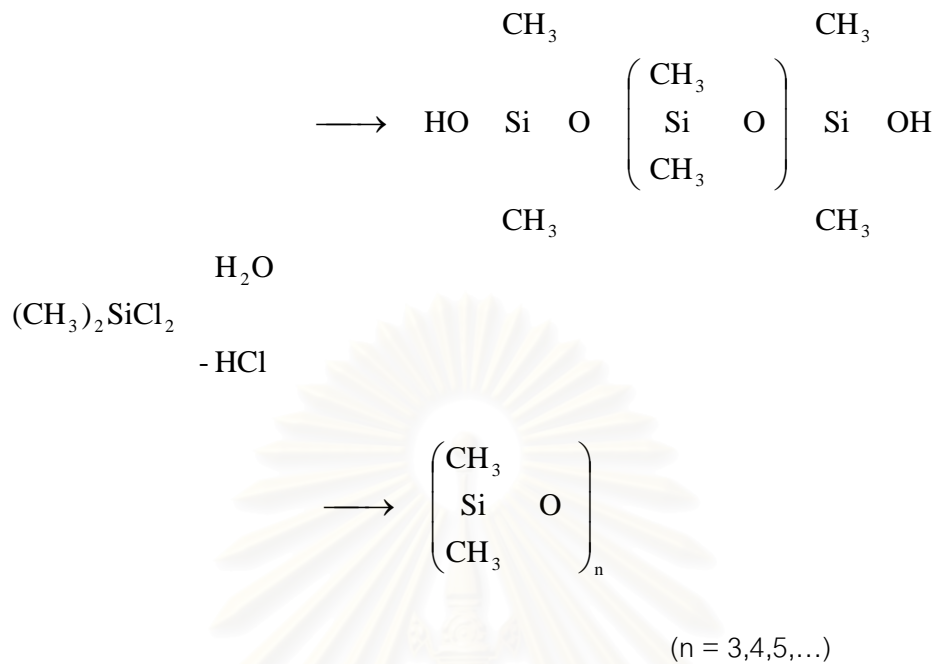
การเตรียมโพลิเมอร์ (Polymerization)

การเตรียมโพลิซิลอกเซน จะเริ่มจากการไฮโดรไลส์สารประกอบคลอโรซิลเลนให้เป็นซิลเลนอลก่อน แล้วจึงเกิดการควบแน่นกลายเป็นโพลิซิลอกเซน ดังนั้นโครงสร้างของซิลอกเซนที่ได้จึงขึ้นกับหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวของคลอโรซิลเลนและสภาวะของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ใช้ ดังแสดงโดยตัวอย่างต่อไปนี้

ก. ไตรเมทิลคลอโรซิลเลน ( Trimethylchlorosilane ) เนื่องจากมีหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวเพียง (Cl) หมู่เดียว ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการควบแน่นหลังปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจึงเป็นเพียงไดเมอร์ คือ เฮกซาเมทิลไดซิลอกเซน ดังนี้

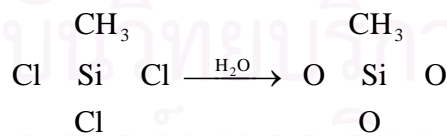


ข. ไดเมทิลไดคลอโรซิลเลน ( Dimethyldichlorosilane ) เนื่องจากมีหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัว (Cl) อยู่สองหมู่ ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารนี้จึงเป็นของผสมของโพลิเมอร์เชิงเส้นตรงและวงแหวน

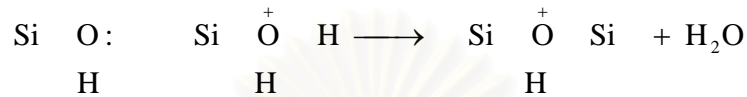
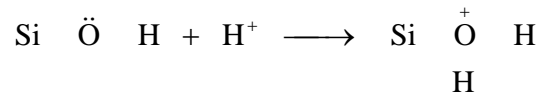


สัดส่วนของโพลิเมอร์ไซตรงกับวงแหวน จะขึ้นอยู่กับสถานะของปฏิกิริยาเช่นถ้าใช้น้ำอย่าง เดี่ยวจะได้ โพลิเมอร์ไซตรง 50-80เปอร์เซ็นต์ และโพลิเมอร์วงแหวน 50-20 เปอร์เซ็นต์ และถ้าใช้ กรดซัลฟูริกจะได้โพลิเมอร์ไซตรงเป็นส่วนใหญ่ มีโพลิเมอร์วงแหวนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

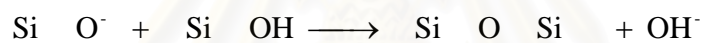
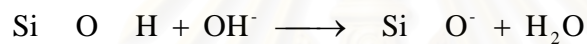
ค.เมทิลไตรคลอโรไซเลน ( Methyltrichlorosilane ) เนื่องจากสารนี้มีหมู่แสดงสมบัติ เฉพาะตัว ( Cl ) 3 หมู่ ไฮโดรไลซิสของสารนี้โดยใช้น้ำเพียงอย่างเดียวจะได้โพลิเมอร์แบบเชื่อมโยงที่มี ลักษณะคล้ายวุ้นหรือเป็นผง



ในทำนองเดียวกัน ถ้าใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ด้วย จะช่วยทำให้เกิดการควบแน่นภายใน โมเลกุลได้สารประกอบแบบวงแหวนด้วยการควบแน่นของไซเลนอลโดยการขจัดโมเลกุลของน้ำ ออกไปสามารถคะตะไลส์ โดยทั้งกรด และเบส และเนื่องจากการเกิดไฮโดรไลซิสของคลอโรไซเลน ( ชั้นแรก ) ได้กรดไฮโดรคลอริกเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ กรดที่เกิดขึ้นนี้จะช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาการควบแน่น เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว กลไกของปฏิกิริยาคือดังนี้



ส่วนปฏิกิริยาการควบแน่นที่มีเบสเป็นตัวเร่ง (Base-catalyse) แสดงได้ดังนี้



นอกจากนี้แล้วปฏิกิริยาการควบแน่นยังสามารถคะตะไลส์โดยสารประกอบของโลหะ เช่น โคบอลท์ แนฟทีเนต (Cobalt naphthenate) หรือสแตนนัสออกโตเอต (Stannous octoate) ได้ด้วย ซิลิโคนที่มีความสำคัญในเชิงพาณิชย์จำแนกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ โพลีเมอร์จำพวกของไหล อีลาสโตเมอร์ และเรซินหรือพลาสติก การเตรียมโพลีเมอร์ เหล่านี้อาศัยอาศัยปฏิกิริยาทั่วไปดังกล่าวมาแล้วข้างต้นเป็นหลัก ต่อไปนี้จะกล่าวถึงการเตรียมโพลีเมอร์ทั้ง 3 ประเภทนี้โดยสังเขป

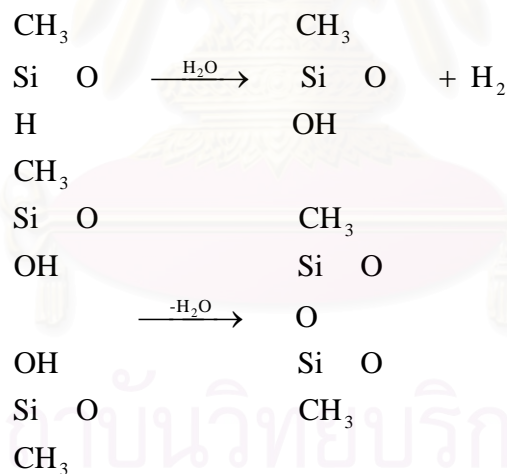
### ก. ซิลิโคนของไหล (Silicone fluids)

องค์ประกอบของซิลิโคนของไหลเป็นโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ประมาณ 4,000-25,000 โพลีเมอร์ที่สำคัญที่สุดคือ โพลีไดเมทิล ซิลอกเซน กระบวนการเตรียมทั่วไปคือ นำไดเมทิล ไดคลอโรไซเลนมาไฮโดรไลส์ อย่างต่อเนื่อง โดยผสมกับกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง ผลผลิตที่ได้อยู่ในรูปของน้ำมันซึ่งแยกออกจากชั้นของน้ำ ผลผลิตที่ได้ในขั้นนี้เป็นของผสมของซิลอกเซนโพลีเมอร์ที่มีความยาวโซ่ขนาดต่างๆกัน และซิลอกเซนแบบวงแหวน (ส่วนใหญ่เป็นเตตระเมอร์ และออกตะเมทิล ไฮโคลเตตระซิลอกเซน) แยกน้ำมันนี้ออกจากน้ำ เติมกรดซัลฟูริกหรือไฮเดียมไฮดรอกไซด์เล็กน้อย แล้วให้ความร้อนที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหลายชั่วโมง ซึ่งในระหว่างให้ความร้อนนี้เติมเฮกซะ

เมทิลไซลอกเซน ที่ทำหน้าที่เป็นตัวหยุดปฏิกิริยาการควบแน่น เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดตามต้องการ เพราะความหนืดแปรผันโดยตรงกับน้ำหนักโมเลกุล แยกของไหลที่ได้ออกจากน้ำแล้วทำให้ตัวเร่งเป็นกลางโดยการเติมเบสหรือกรดแล้วแต่กรณี นำของไหลที่ได้ไปกรอง ทำให้แห้งและให้ความร้อนแบบลดความดันเพื่อขจัดสารที่ระเหยง่ายออกไป

ในกรณีที่ต้องการให้ซิลิโคนของไหลมีเสถียรภาพต่อความร้อนเพิ่มขึ้น มีการเตรียมซิลิโคนที่มีทั้งหมู่เมทิลและฟีนิลในโมเลกุล ซึ่งโดยทั่วไปให้มีหมู่ฟีนิลร้อยละ 10-45 ของหมู่แทนที่ทั้งหมดในโมเลกุล ซิลิโคนชนิดนี้เตรียมจากการนำของผสมของ เมทิลคลอโรไซเลน และฟีนิลคลอโรไซเลน มาทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

ซิลิโคนของไหลที่ต้องการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเส้นใยมีการรวมหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเข้าไปในโซ่ของโพลิเมอร์ด้วย เพื่อจะได้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลได้ผลิตภัณฑ์ที่ถาวร โดยทั่วไปจะให้ของไหลที่เตรียมได้มีพันธะ Si - H ในโมเลกุล โดยการนำเข้าไปยังโซ่ของโพลิเมอร์โดยการเติมเมทิลไดคลอโรไซเลนในกระบวนการโพลิเมอไรเซชันด้วย ซึ่งจะเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลเมื่อเติมเบสและให้ความร้อน ดังนี้



#### ข. ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์

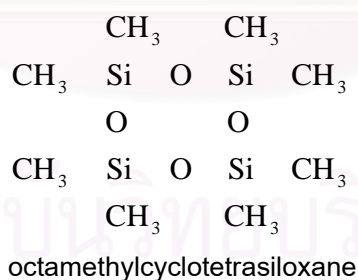
ทำนองเดียวกับซิลิโคนของไหล ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์เป็นโพลิเมอร์เชิงเส้นตรงแต่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่ามาก และทำนองเดียวกับอีลาสโตเมอร์อื่นๆ โพลิเมอร์เชิงเส้นตรงที่ได้ต้องนำไปผ่านกระบวนการทำให้เกิดการเชื่อมโยง (Cross-linked) ระหว่างโมเลกุลเพื่อให้ได้สมบัติที่ดีของ



อีลาสโตเมอร์ ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ที่ใช้งานเอนกประสงค์เป็น โพลีเมอร์จำพวกโพลีไดเมทิลไซลอกเซน อย่างไรก็ตามก็มีการเตรียมอีลาสโตเมอร์ที่ใช้งานจำเพาะอื่นๆ โดยรวมหมู่คุณสมบัติเฉพาะตัวอื่นๆเข้าไปในโซ่ของโพลีเมอร์ด้วย ตัวอย่างของซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ได้แก่ ไวนิลซิลิโคน ฟีนิลซิลิโคน ไดเมทิลซิลิโคน เป็นต้น วัสดุที่ใช้ทำอวัยวะเทียมจัดอยู่ในประเภทนี้ด้วย คือ ไดเมทิลซิลิโคน อีลาสโตเมอร์

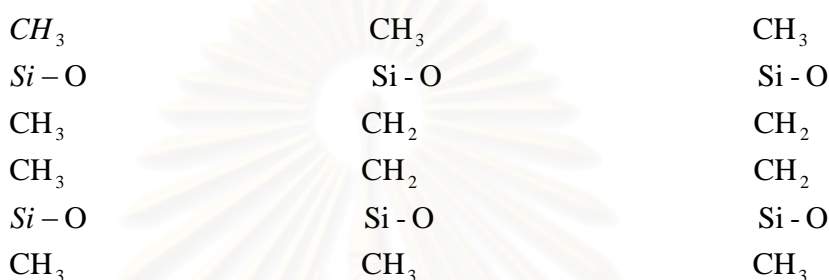
### ไดเมทิลซิลิโคน อีลาสโตเมอร์

ไดเมทิลซิลิโคนที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันเป็นโพลีเมอร์เชิงเส้นตรงที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ประมาณ 300,000 – 700,000 โพลีเมอร์นี้ไม่อาจเตรียมโดยตรงจากการนำไดเมทิลไดคลอโรไซเลนมาไฮโดรไลส์ เพราะการที่จะได้โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากนี้ จะต้องใช้ไซเลน (สารตั้งต้น) ที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก ซึ่งทำได้ไม่ง่ายนักในทางปฏิบัติ (สารปนเปื้อนที่มีหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัว 1 หมู่ ทำให้น้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยต่ำลง ส่วนที่มีหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวมากกว่า 2 หมู่ ทำให้เกิดสาขาโซ่ได้) โพลีเมอร์เชิงเส้นตรงที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากจึงต้องเตรียมโดยวิธีค่อนข้างพิเศษดังนี้ กระบวนการที่ใช้ทั่วไปจะนำไดเมทิลไดคลอโรไซเลนมาละลายในอีเทอร์ แล้วผสมน้ำเข้าไปในปริมาณมากเกินพอเกิดโพลีเมอร์วงแหวนขึ้นก่อนซึ่งก็คือ ออกตะเมทิลไซโคลเตตระไซลอกเซน ซึ่งเป็นเตตระเมอร์ มีโครงสร้างดังนี้



เตตระเมอร์นี้มีจุดเดือด 175 องศาเซลเซียส สามารถแยกออกจากของผสมและทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่น ต่อไปนำเตตระเมอร์นี้ไปโพลีเมอไรซ์ที่ 150-200 องศาเซลเซียส โดยมีไซเดียมไฮดรอกไซด์เล็กน้อยอยู่ด้วย และมีการเติมสารที่มีหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวเพียง 1 หมู่เล็กน้อยเข้าไปด้วย เพื่อควบคุมน้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์ที่ได้ ผลผลิตที่ได้ในขั้นนี้มีลักษณะเป็นขี้ผึ้งเหนียวๆ ยังไม่มีคุณสมบัติของอีลาสโตเมอร์ขั้นต่อไปคือการนำไดเมทิลซิลิโคนที่มีลักษณะเป็นขี้ผึ้งเหนียวๆไปทำให้เกิด

การเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลโดยใช้สารจำพวกเพอร์ออกไซด์อินทรีย์ เช่น เบนโซอิลเพอร์ออกไซด์ หรือ 2, 4-ไดคลอโรเบนโซอิล เพอร์ออกไซด์ ( 2, 4-dichlorobenzoyl peroxide ) และให้ความร้อน อุณหภูมิที่ใช้ทั่วไปคือ 110-175 องศาเซลเซียส ฟรีเรดิคัลที่เกิดจากการแตกสลายโมเลกุลของเพอร์ออกไซด์จะดึงเอาไฮโดรเจนอะตอมจากหมู่เมทิล แล้วเกิดการรวมตัวกันอีกครั้งหนึ่งได้การเชื่อมโยงแบบเอทิลีน ดังนี้



สารในกลุ่มนี้ สามารถนำมาใช้เป็นซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ที่ใช้ในการประดิษฐ์อวัยวะเทียมดังที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะการก่อตัว คือ ชนิดที่ก่อตัวที่อุณหภูมิห้อง (Room temperature-vulcanizing or RTV, LTV) ชนิดที่ก่อตัวด้วยความร้อน (Heat-vulcanizing or HTV)<sup>5,6,7</sup>

### ค. ซิลิโคนเรซินหรือพลาสติก (Silicone resin)

ซิลิโคนเรซิน เป็นโพลิเมอร์ที่มีสาขาไซเตรียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ของไตรคลอโรไซเลน แต่ถ้าใช้ไตรคลอโรไซเลนบริสุทธิ์ ผลผลิตที่ได้มีการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลมากเกินไป แข็งเกินไป ไม่อาจแปรรูปได้ จึงไม่เหมาะสำหรับการใช้งานปกติดังนั้นเพื่อลดปริมาณของการเชื่อมโยง ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทั่วไปจะผสมไตรคลอโรไซเลนเข้าไปด้วย วิธีสะดวกวิธีหนึ่งที่ใช้บอกจำนวนหมู่แสดงสมบัติเฉพาะตัวของผสมคือการใช้ค่า R / Si ซึ่งเป็นอัตราส่วนของจำนวนหมู่อินทรีย์และซิลิคอนอะตอม ดังนั้นไดเมทิลไตรคลอโรไซเลนจะมีค่า R / Si เท่ากับ 2 ในขณะที่เมทิลไตรคลอโรไซเลนมีค่า R / Si เท่ากับ 1 เป็นต้น การเตรียมซิลิโคนเรซินในเชิงพาณิชย์ ทั่วไปใช้ของผสมของโมโนเมอร์ที่มีค่า R / Si เท่ากับ 1.2-1.6 ซิลิโคนเรซินในเชิงพาณิชย์ทั่วไปมีทั้งหมู่เมทิลและหมู่ฟีนิลในโพลิเมอร์การมีหมู่ฟีนิลในร่างแหของเมทิลไซลอคเซนทำให้ทนต่อความร้อนดีขึ้น ความสามารถในการยืดหยุ่นและสมบัติการเข้ากันได้กับสีกที่ดีขึ้นด้วย คลอโรไซเลนที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ เมทิลไตรคลอโรไซเลนฟีนิล ไตรคลอโรไซเลน ไดเมทิลไตรคลอโรไซเลน ไดฟีนิลไตรคลอโรไซ

เลน และ เมทิลฟีนิลไดคลอโรไซเลน ในทางปฏิบัติเลือกใช้โมโนเมอร์ข้างต้นและส่วนผสมที่เหมาะสมตามที่ต้องการกระบวนการเตรียมเรซินทั่วไป นำของผสมของคลอโรไซเลนไปละลายในตัวทำละลายเช่น โทลูอีนหรือไซลีนแล้วเติมน้ำพร้อมด้วยการกวน ถ้าของผสมมีเมทิลคลอโรไซเลนเป็นองค์ประกอบหลัก ปฏิริยาจะเกิดเร็วมากและคายความร้อนมาก จึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิโดยการหล่อเย็นเพื่อป้องกันการเกิดฟุ้ง แต่ถ้าของผสมมีฟีนิลคลอโรไซเลนอยู่มาก ปฏิริยาจะเกิดช้า ดังนั้นทั่วไปอาจต้องเพิ่มอุณหภูมิของปฏิริยาเป็น 70-75 องศาเซลเซียส เพื่อให้มั่นใจว่าปฏิริยาไฮโดรไลซิสเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์หลังปฏิริยาสิ้นสุดลง ปล่อยให้ของผสมทั้งหมดแยกออกเป็นสองชั้น นำชั้นอินทรีย์ไปล้างกรดไฮโดรคลอริกออกจนหมด แล้วกลั่นเอาตัวทำละลายออกไปจนได้สารละลายที่มีของแข็งอยู่ประมาณร้อยละ 80 ในขั้นนี้เพียงร้อยละ 90 ของหมู่ไซเลนอลที่มีอยู่เดิมทั้งหมดได้ควบแน่นและเรซินที่ได้มีหมู่ไซเลนอลอยู่ปลายโซ่ ซึ่งเป็นของผสมประกอบด้วยโพลิเมอร์เชิงเส้นตรง สาขาโซ่ที่เกิดการเชื่อมโยง และโพลิเมอร์แบบวงแหวนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ต่อไปนำสารละลายเรซินนี้ไปให้ความร้อนที่ประมาณ 150 องศาเซลเซียส โดยมีตัวเร่งเช่น ซิงค์ออกไซด์อยู่ด้วย หมู่ไซเลนอลที่เหลือจะเกิดการควบแน่นต่อไปทำให้น้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยของเรซินเพิ่มสูงขึ้นอีกมาก หลังจากนั้นนำไปทำให้เย็นเพื่อยุติปฏิริยาซิลิโคนเรซิน ในเชิงพาณิชย์ทั่วไปมีขายในรูปของสารละลาย เตรียมโดยวิธีการข้างต้น ส่วนการเปลี่ยนเรซินที่ละลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการเชื่อมโยงอย่างเต็มที่ทั่วไปกระทำในขั้นสุดท้าย เมื่อต้องการนำวัสดุนี้ไปใช้งาน โดยการให้ความร้อน และ ใช้ตัวเร่ง เช่น ซิงค์ออกไซด์ โคบอลท์เนฟทีเอต หรือไตรเอทานอลามีน เป็นต้น ซิลิโคนเรซินอาจใช้ผสมกับเรซินอื่นๆ ได้เรซินแบบปรับปรุงแล้ว ( Modified resin ) ซึ่งใช้ประโยชน์เป็นตัวเคลือบผิวเรซินแบบปรับปรุงแล้ว อาจเตรียมได้โดยการนำเรซินสองชนิดมาตีผสมเข้าด้วยกัน หรืออาจทำให้เกิดเป็นโคโพลิเมอร์ก็ได้

### โพลีไดเมทิลไซลอกเซน ( Polydimethylsiloxane )

โพลีไดเมทิลไซลอกเซนเป็นโพลิเมอร์ชนิดหนึ่งในกลุ่มซิลิโคน โพลิเมอร์ ซึ่งมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอน ( Si ) และอะตอมของออกซิเจน ( O ) อยู่สลับกันไปมาโดยอะตอมของซิลิคอนจะมีหมู่อินทรีย์ ( Organic group ) อยู่ด้วย สำหรับโพลีไดเมทิลไซลอกเซนที่ใช้ทำอวัยวะเทียมมีลักษณะเป็น ซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ ( Silicone elastomer ) เป็นโพลิเมอร์เชิงเส้นตรงที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก โดยทั่วไปคือ 300,000-700,000 และเป็นสารที่ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์

(Organic) และสารอนินทรีย์ (Inorganic) เกิดจากการรวมตัวของซิลิกากลายเป็นซิลิกอน หลังจากนั้นซิลิกอนจึงทำปฏิกิริยารวมกับเมทิลคลอไรด์ (Methyl chloride) ได้เป็นไดเมทิล ไดคลอโรไซลอกเซน (Dimethyl dichlorosiloxane) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำแล้ว จะกลายเป็นโพลิเมอร์ที่เป็นของเหลว มีสีใส (Translucent) เปี้ยก (Watery) มีความหนืดต่าง ๆ กัน ขึ้นกับความยาวของสายไซลอกเซนที่เป็นองค์ประกอบ มีชื่อว่า โพลีไดเมทิลไซลอกเซน (Polydimethylsiloxane) หรือที่เรียกกันอย่างแพร่หลายว่า ซิลิโคน (Silicone) ไดเมทิลไซลอกเซนมีสูตรโครงสร้างดังนี้



3

โพลีไดเมทิลไซลอกเซน ที่เป็นของเหลวดังกล่าวจะได้รับการผสมด้วยฟิลเลอร์ ต่างๆ เพื่อเสริมให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันจะทำให้โพลีไดเมทิลไซลอกเซน มีลักษณะหนืดขึ้นคล้ายกับยาง (Rubbery forms) เช่นการเติมสารเสริมสภาพการเป็นยาง (Vulcanizing agents) เพื่อให้โพลีไดเมทิลไซลอกเซนสามารถเปลี่ยนแปลงสภาพจากพลาสติกไปสู่เรซินที่คล้ายยางได้ โพลีไดเมทิลไซลอกเซน ที่เป็นสายยาวมีการเชื่อมไขว้กัน (Cross-linked) ก่อให้เกิดโครงสร้างตาข่ายที่ก่อให้เกิดความทนทานต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต ส่วนปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (Vulcanization) นั้นเกิดขึ้นได้ทั้งขบวนการที่อาศัยความร้อนและไม่ต้องอาศัยความร้อน ขึ้นกับชนิดของตัวกระตุ้นปฏิกิริยา (Catalyst) และชนิดของสารเชื่อมไขว้ (Cross-linking agent) โดยจะเกิดปฏิกิริยารวมตัวของสายซิลิกอนเชื่อมเข้ากับอนุพันธ์ของสารอินทรีย์ (Organic radicals) เกิดสารประกอบที่มีลักษณะเฉื่อย (Inert) จากคุณสมบัติของควอตซ์ ร่วมกับคุณสมบัติยืดหยุ่นได้ จากคุณสมบัติของสารประกอบอินทรีย์ (Organic plastic)<sup>2</sup> นอกจากนี้ยังมีการเติมสารแอดดิทีฟ (Additives) เพื่อแต่งสี และยังมีการเติมสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Anti oxidants) เป็นต้น โพลีไดเมทิลไซลอกเซนสามารถแยกออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ได้แก่ โพลีไดเมทิลไซลอกเซนชนิดที่ก่อตัวภายใต้อุณหภูมิห้อง (Room temperature-vulcanizing-RTV) และโพลีไดเมทิลไซลอกเซนชนิดที่ก่อตัวภายใต้ความร้อน (High temperature-vulcanizing-HTV) ดังนี้

## 1. โพลีไดเมทิลซิลอกเซน ชนิดก่อตัวด้วยความร้อน (High Temperature Vulcanized-Polydimethylsiloxane หรือ HTV -Silicone)

เป็นอีลาสโตเมอร์ที่ก่อตัวด้วยความร้อน ทำในรูปแบบโพลีไดเมทิลซิลอกเซน ชนิดที่เป็นโพลีเมอร์แข็ง เวลาจะนำมาใช้งานต้องใช้เครื่องมือกลึง (Milling) และผสมตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเพอร์ออกไซด์ (Peroxide) เช่น 2,4-ไดคลอโรเบนโซอิล เพอร์ออกไซด์ (2,4-dichlorobenzoylperoxide)<sup>2</sup> และสารแต่งสี พร้อมกับได้รับความร้อนที่ส่งผ่านจากแม่แบบโลหะหล่อ ดังนั้นจึงหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดฟองอากาศขณะผสม โพลีไดเมทิลซิลอกเซน ชนิดนี้จะมีความแข็งแรงฉีกสูงกว่าโพลีไดเมทิลซิลอกเซน ชนิดก่อตัวภายใต้อุณหภูมิห้อง สำหรับคุณสมบัติเรื่องความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (strength) รวมไปถึงความสามารถในการยืดตัว (Elongation) ขึ้นกับปริมาณฟิลเลอร์ (Filler) ที่เติมลงไปในตัว โดยทั่วไปการเติมฟิลเลอร์ในปริมาณมากขึ้น จะทำให้วัสดุแข็งขึ้นและยุบตัวน้อยลง ฟิลเลอร์ที่ใช้ส่วนใหญ่ควรเป็นสารบริสุทธิ์ (pure) อาทิเช่น การเติมสารเมทิลไวนิล (Methylvinyl) หรือ เมทิลฟีนิล ซิลอกซี ลงลงในโพลีไดเมทิลซิลอกเซน เพื่อเพิ่มความนิ่ม (Softness) และเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงฉีก (Tear strength) โพลีไดเมทิลซิลอกเซนชนิดนี้มีข้อดีคือมีความเสถียรภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ มีสีที่คงทน และมีคุณสมบัติเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อร่างกายมนุษย์ (Biologic inertness) แต่ก็ยังมีข้อเสียที่ต้องอาศัยความร้อนสูงเพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยา จึงต้องใช้ร่วมกับแบบโลหะหล่อซึ่งจัดเตรียมได้ยาก และมีราคาแพง ข้อเสียที่สำคัญที่สุดคือมีสีขุ่นด้านไม่มีชีวิตชีวา (Lifeless appearance) ดังนั้นโพลีไดเมทิลซิลอกเซนชนิดนี้จึงไม่ค่อยได้รับความนิยมมากนัก ตัวอย่างของซิลิโคนชนิดนี้ได้แก่ เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4514 (Dimethyl, phenylmethyl and methylvinyl siloxane), เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4515 (Dimethyl and methylvinyl siloxane), เอ็มดีเอ็กซ์ 4-4516 (Dimethyl and methylvinyl siloxane) เป็นต้น

## 2. โพลีไดเมทิลซิลอกเซน ชนิดก่อตัวภายใต้อุณหภูมิห้อง (Room Temperature Vulcanized Polydimethylsiloxane หรือ RTV - Silicone)

เป็นอีลาสโตเมอร์ที่ ก่อตัวภายใต้อุณหภูมิห้องโดยโพลีซิลอกเซนยังคงเป็นโพลีไดเมทิลซิลอกเซน แต่จะมีหมู่ปลายเป็นหมู่ไฮดรอกซิลและมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10,000 -100,000 เกิดการก่อตัวที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้สารเชื่อมขวางเช่น เอทิลออร์โธไซเลน (Ethyl orthosilane) และใช้สแตนนัส ออกโทเอต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือในปัจจุบันนิยมใช้ไตรหรือเตตระอะซีทอกซีไซเลน (Tri or Tetraacetoxysilane) เพื่อให้โพลีเมอร์ที่เตรียมได้มีหมู่ปลายเป็นอะซีทอกซี (Acetoxy) เมื่อเจอความชื้น หมู่อะซีทอกซีจะถูกไฮโดรไลซ์ไปเป็นหมู่ซิลานอล เพื่อจะเกิดการเชื่อมไขว้ต่อไปตัวอย่าง

ของ อาร์ทีวีซิลิโคน ที่ใช้ในงานประดิษฐ์อวัยวะเทียมอาทิเช่น MDX4-4210 (Methylvinyl dimethylsiloxane), Silastic 382 (Polymethylsiloxane), Silastic 891 (เมธิลไตรอะซีทอกซีไซเลน), Silastic 399, A-2186, A 102 เป็นต้น เป็นโพลิเมอร์ที่สร้างขึ้นในรูปแบบของเหลว ได้รับความนิยมในการใช้งานสูง เนื่องจากสะดวกต่อการใช้งาน แต่มีข้อด้อยอยู่ที่ โพลิโดเมธิลไซลอกเซนชนิดนี้ต้องก่อตัวโดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่างโพลิเมอร์และสารกระตุ้นปฏิกิริยาเช่น สแตนเนส ออกโทเอต ในขั้นตอนการผสมนี้อาจทำให้มีโอกาสกักฟองอากาศไว้ในเนื้อวัสดุได้มาก ก่อให้เกิดการฉีกขาดได้ง่ายในบริเวณที่มีฟองอากาศ รวมไปถึงจนถึงการเก็บกักของเสีย และคราบสกปรกจากผิวหนังไว้มากขึ้น ภายหลังจากการใช้งาน นอกจากนั้นโพลิโดเมธิลไซลอกเซนชนิดนี้มีความแข็งแรงดัดไม่สูงนัก อาจจะต้องมีการซ่อมแซมการฉีกขาดที่ขอบบ่อยครั้ง ในบางกรณีมีการเติมผงซิลิกา (Silica) เพื่อเพิ่มความต้านทานแรงดึง แต่พบว่าทำให้โพลิเมอร์มีสีขุ่นขึ้น จนบดบังความสวยงามที่เกิดจากการผสมสีอื่น ๆ ไว้ในเนื้อโพลิเมอร์ (Intrinsic coloration) ภายหลังจากนั้นได้มีการผลิตโพลิโดเมธิลไซลอกเซนชนิดบ่มตัว ภายใต้อุณหภูมิห้องชนิดใส (Dow corning, MDX 4-4210) ซึ่งสามารถสร้างให้เกิดความสวยงามมากขึ้นได้ แต่พบว่าต้องใช้เวลาในการก่อตัวนานขึ้นเป็น 16 ชั่วโมงภายใต้อุณหภูมิห้อง หรือใช้เวลา 50 นาที ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส<sup>๑</sup> แต่การใช้ความร้อนสูงลักษณะดังกล่าว ทำให้มีข้อจำกัดว่า จะต้องใช้ร่วมกับแม่แบบโลหะหล่อเท่านั้น มีผู้รายงานว่าโพลิโดเมธิลไซลอกเซน ชนิดก่อตัวที่อุณหภูมิห้องมีคุณสมบัติไม่แตกต่างกับโพลิโดเมธิลไซลอกเซน ชนิดก่อตัวด้วยความร้อน<sup>๒</sup> โดยพบว่ามีคุณสมบัติด้านความคงตัวของสีที่ดี เข้ากันได้กับเนื้อเยื่อร่างกายมนุษย์ และมีคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีที่มีเสถียรภาพ (Physical and Chemical stability) ภายใต้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาก ๆ นอกจากนั้นวัสดุนี้มีลักษณะเป็นของเหลวใส ง่ายต่อการใช้งาน รวมทั้งไม่ต้องอาศัยอุณหภูมิสูง ๆ ในการเกิดปฏิกิริยา จึงสามารถใช้แม่แบบที่หล่อจากพลาสติกหรือหิน เมื่อเปรียบเทียบแล้วจะเห็นได้ว่าใช้งานง่ายกว่าโพลิโดเมธิลไซลอกเซน ชนิดก่อตัวด้วยความร้อน อย่างไรก็ตามโพลิโดเมธิลไซลอกเซน ชนิดนี้ก็มีข้อที่ฉีกขาดง่ายและยากต่อการแต่งสี ตัวอย่างโพลิโดเมธิลไซลอกเซนในกลุ่มนี้ เช่น MDX4-4210 ซึ่งได้รับการปรับปรุงให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นหลายประการ เช่น มีความแข็งแรงสูงสามารถยึดได้มาก มีความแข็งแรงบริเวณขอบมากขึ้น และสามารถตกแต่งสีได้สวยงามขึ้น นอกจากนี้วัสดุยังมีความแข็งผิวใกล้เคียงกับผิวหนังมนุษย์ด้วย<sup>๒</sup> สามารถใช้ร่วมกับกาวติดผิวหนังหลายประเภท ทำให้วัสดุนี้เป็นที่ยอมรับว่าเหมาะสมสำหรับการใช้งานอย่างมาก อีกทั้งขั้นตอนการใช้งานไม่ยุ่งยาก ภายหลังจากที่ทำความสะอาดแม่แบบหล่อที่ทำจากพลาสติกแล้ว ควรนำแม่แบบไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ประมาณครึ่งชั่วโมง ก่อนที่จะนำมาหล่อแบบ เมื่อใส่โพลิโดเมธิลไซลอกเซนที่ตกแต่งสี

แล้วลงไปแม่แบบแล้ว ควรปิดฝาแล้วยึดให้แน่น แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อีก 1 ชั่วโมง เมื่อเสร็จแล้วจึงนำมาแต่งสีภายนอก ด้วยสีที่ผสมเข้ากับกาวโพลีไดเมทิลไซลอกเซน<sup>9,10</sup>

### คุณสมบัติทั่วไปของซิลิโคนและการใช้ประโยชน์

ซิลิโคน โพลีเมอร์มีสมบัติที่เด่นประการหนึ่งคือมีเสถียรภาพต่อความร้อน (Thermal stability) โดยสามารถนำโพลีเมอร์ไปให้ความร้อนสูงถึง 200 องศาเซลเซียส โดยที่สมบัติทางกายภาพไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เสถียรภาพต่อความร้อนนี้เกิดจากพลังงานพันธะที่ค่อนข้างสูงของโพลีเมอร์ ดังแสดงในตารางที่ 2 จากการที่ซิลิโคนโพลีเมอร์สามารถทนความร้อนได้สูง จึงสามารถนำมาใช้เป็นตัวส่งผ่านความร้อนได้ (Heat-transfer agent)

ตารางที่ 2 พลังงานพันธะบางพันธะของ ซิลิโคนและคาร์บอน

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

จากตารางจะเห็นว่าพลังงานพันธะของ Si - O มีค่าสูงและเสถียรต่อความร้อนมาก แต่พันธะนี้มีสภาพขั้ว (อิออนิก) สูงถึงร้อยละ 51 พันธะนี้จึงสลายลงได้ง่ายหากสัมผัสกับกรดแก่และเบสแก่ นอกจากนี้ซิลิโคนเป็นโพลีเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำเลยเนื่องจากโครงสร้างของโพลีเมอร์ถูกล้อมรอบด้วยอนุพันธ์ของสารอินทรีย์ เป็นเหตุให้ผิวของโพลีเมอร์ไม่เปียกน้ำ แต่มีลักษณะลื่น คล้ายไข ซิลิโคนโพลีเมอร์มีความยืดหยุ่นดี (Exceptional flexibility) แม้จะใช้ที่อุณหภูมิต่ำ เพราะมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพ

แก้ว ( Glass transitional temperature, Tg ) ต่ำคือ Tg -123 องศาเซลเซียส และพบว่าไม่วางไวต่อ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและชีวภาพ (Chemical and Biological inertness ) ไม่กลมกลืนเข้ากับ สารประกอบอินทรีย์ส่วนใหญ่ คือไม่ยึดหรือเชื่อมต่อกับสารอินทรีย์ต่างๆจึงใช้เป็นสารชั้นกลาง มี คุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าจึงใช้ไปใช้ในวงจรไฟฟ้าเพื่อป้องกันการลัดวงจร และมีคุณสมบัติยอมให้ ก๊าซซึมผ่านได้มากจึงใช้ทำเมมเบรนเพื่อประโยชน์ทางการแพทย์เช่นการทำศัลยกรรมปริทันต์ เป็นต้น

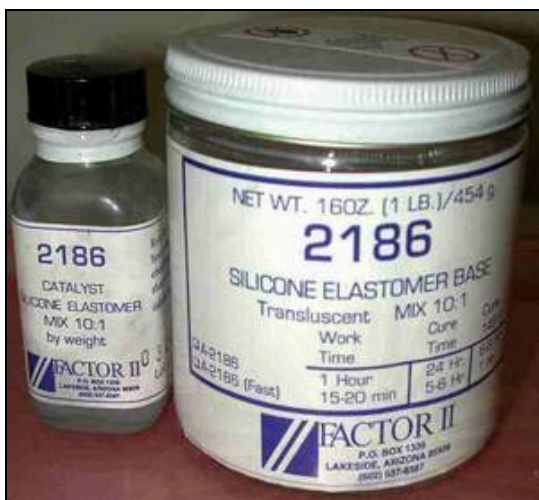
คุณสมบัติของโพลีไคเมธิลไซลอกเซน A-2186

เป็นซิลิโคน อีลาสโตเมอร์ชนิดก่อดำกายใต้อุณหภูมิห้องที่ประกอบไปด้วยส่วนผสม 2 ส่วนคือ สารตั้งต้น และตัวเร่งปฏิกิริยาเพลททินัม ( Platinum Cure system ) มีสีใส มีความถ่วงจำเพาะ 1.12 มีความหนืดของสารตั้งต้น 90,000 cps ความหนืดของตัวเร่งปฏิกิริยา 5,000 cps เมื่อผสมแล้วได้สาร ที่มีความหนืดพอสมควรขนาดที่สามารถใช้วิธีเทลงในแบบหล่อได้ ( Pourable system ) ขณะผสม ต้องระมัดระวังการกักฟองอากาศ รวมทั้งต้องทำการกำจัดฟองอากาศก่อนจะเทลงในแม่แบบหล่อ โดยการดูดฟองด้วยเครื่องดูดสุญญากาศอย่างน้อย 4 ครั้งและทิ้งให้วัสดุที่มีน้ำหนักมากกว่า เนื่องจาก ปรากฏจากฟอง ค่อยๆไหลลงสู่ก้นภาชนะ โดยถือภาชนะต่อกับฟองด้วยเครื่องดูดสุญญากาศนาน 3-5 นาที แล้วจึงเทลงในแม่แบบหล่ออย่างระมัดระวังไม่ให้เกิดฟองขึ้นอีก มีระยะเวลาทำงาน (working time) 1 ชั่วโมง ควรผสมโพลีไคเมธิลไซลอกเซน A-2186 ในภาชนะที่ทำจาก แก้ว เหล็กไร้สนิม หรือโพลีโพรพิลีน ( Polypropylene ) ที่แห้งและสะอาด หลังจากทำการอัดแม่แบบแล้ว ต้องทิ้งให้วัสดุก่อตัว สมบูรณ์ภายใต้อุณหภูมิห้อง โดยใช้เวลาข้ามคืน แต่หากจำเป็น ก็สามารถเร่งให้ระยะเวลาสั้นขึ้น โดยเพิ่มอุณหภูมิที่เข้าบ่มให้สูงขึ้น หลังจากก่อตัวแล้วจะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงร่วมกับคุณสมบัติอื่นตาม เอกสารแนบของบริษัทผู้ผลิต ดังนี้

คุณสมบัติของโพลีไคเมธิลไซลอกเซน A-2186

ความแข็งผิว Shore A	25
ความแข็งแรงดึง	900 psi
อัตราส่วนการยืดตัว	650 %
ความแข็งแรงฉีก	90 ppi





รูปที่ 1 แสดงโพลีไดเมทิลซิลอกเซน A-2186

โพลีไดเมทิลซิลอกเซน A-2186สามารถสัมผัสกับวัสดุหลายชนิดโดยไม่เกิดปฏิกิริยาใดๆ ยกเว้น butyl และ chlorinated rubbers และอาจลดการเสียดต่อการไม่เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ โดยการล้าง ภาชนะที่ใช้ผสมด้วยไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ และห้ามใช้สารแต่งสีที่มีองค์ประกอบเป็นน้ำมัน

### การแต่งสีอวัยวะเทียม

สำหรับการตกแต่งสีชิ้นอวัยวะเทียมที่ทำจากโพลีไดเมทิลซิลอกเซนนั้น ควรจะมีการแต่งสีทั้ง ภายในเนื้อวัสดุก่อนที่วัสดุจะก่อตัว (Intrinsic coloration) และตกแต่งสีเพิ่มภายนอกหลังจากที่วัสดุ ก่อตัวสมบูรณแล้ว (Extrinsic coloration) โดยเริ่มจากการตกแต่งสีในเนื้อวัสดุให้เหมือนกับผิวหนัง บริเวณที่สีอ่อนที่สุดในบริเวณที่จะใส่อวัยวะเทียม การตกแต่งสีบริเวณอื่น ๆ ให้เข้มขึ้นหรือมี ลักษณะเฉพาะเช่น ฝ้า ฝ้า หรือกระนั้น สามารถทำได้ทั้งจากการตกแต่งภายในวัสดุหรือภายนอก แต่ พบว่าการแต่งจากภายนอกจะง่ายกว่า<sup>2</sup> แต่พบว่ามีความคงทนน้อยหลุดลอกได้ง่าย สำหรับสีพื้นหรือสี บริเวณที่อ่อนที่สุดนั้นเพื่อให้ง่ายและประหยัดเวลาขึ้น ได้มีผู้แนะนำให้ทำตัวอย่างสีโพลีไดเมทิลซิลอก เซนขึ้น<sup>1</sup> เพื่อนำมาเลือกให้เข้ากับสีผิวที่อ่อนที่สุดของผู้ป่วย คล้ายกับการเลือกสีฟันโดยใช้แบบสี ตัวอย่าง ทำได้โดยผสมโพลีไดเมทิลซิลอกเซน MDX 4-4210 เข้ากับสีต่าง ๆ เป็นตัวอย่างสี 12 สี พบว่าในทุกตัวอย่างสีจะต้องมีสารทึบแสงเป็นองค์ประกอบทั้งสิ้นในช่วง 0.2917 ถึง 0.5834 กรัม อย่างไรก็ตามการทดลองนี้ไม่สามารถคำนวณหาสัดส่วนการผสมสารแต่งสีได้ เนื่องจากไม่มีการระบุ ปริมาณโพลีไดเมทิลซิลอกเซน MDX 4-4210 ที่ใช้ การเติมสารทึบแสงสีขาวนี้จะผสมลงไปเป็นอันดับ แรก มีจุดประสงค์สำคัญในการทำวัสดุซึ่งเดิมมีสีใส มีสีขุ่นทึบขึ้นคล้ายกับผิวหนัง จะเห็นได้ว่าองค์ ปริมาณของสารทึบแสงจะมีได้ต่าง ๆ กันตามลักษณะผิวผู้ป่วย หลังจากผสมสารทึบแสงจนได้ความ

สว่าง ทึบเทาที่ต้องการแล้ว จึงค่อยเติมสีอื่น ๆ ลงไป ก่อนจะนำไปอบให้วัสดุแข็งตัว ภายหลังจากที่วัสดุก่อตัวได้รูปร่างแล้ว จึงทำการตกแต่งสีเพิ่มเติมตามลักษณะผิวของผู้ป่วยโดยการการตกแต่งสีภายนอกซึ่งมีอยู่หลายวิธี เช่นวิธีการสักสีเข้าไปในเนื้อวัสดุ<sup>12</sup> (Tattooing method) โดยสีที่ใช้เป็นสีน้ำมัน (Artist oil paint) บรรจุในเครื่องสัก โดยจะสักสีลงไปบนเนื้อวัสดุลึกประมาณ 1-2 มิลลิเมตร วิธีนี้มีข้อดีที่สีจะคงตัวอยู่ได้นาน เนื่องจากสีฝังลึกอยู่ในเนื้อวัสดุ ข้อดีอีกประการหนึ่งคือ ไม่จำเป็นต้องมีการทาสีผสมกาวโพลีไดเมทิลไซลอกเซนทับไปบนพื้นผิวของอวัยวะเทียมที่ได้รับการตกแต่งให้มีลายคล้ายกับผิวหนังโดยรอบอวัยวะเทียมนั้น ดังนั้นลวดลายที่ตกแต่งไว้จะคงชัดเจนสวยงาม อย่างไรก็ตามวิธีนี้ต้องอาศัยความชำนาญของทันตแพทย์ผู้ทำและต้องมีอุปกรณ์พิเศษ นอกจากนี้วิธีสักสี อาจใช้วิธีทาสีที่ผสมกับกาวโพลีไดเมทิลไซลอกเซนลงบนอวัยวะเทียม วิธีนี้ไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์พิเศษจึงสามารถทำได้โดยสะดวก แต่การทาสีซ้อนทับกันหลายชั้นอาจก่อให้เกิดปัญหาเสถียรภาพและความสวยงาม เนื่องจาก

รายละเอียดบนพื้นผิวของอวัยวะเทียมถูกลบเลือนไป

สำหรับสีที่ใช้ผสมในอวัยวะเทียมนั้น ควรจะมีคุณสมบัติที่ให้สีคงทนไม่ว่าจะเป็นการแต่งสีภายในหรือภายนอกเนื้อวัสดุ รวมทั้งไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ทำอวัยวะเทียม เมื่อชิ้นอวัยวะเทียมนั้นถูกใช้งานภายใต้แสงแดดหรือสิ่งแวดล้อม<sup>13</sup> แต่เรื่องนั้นยังคงเป็นเพียงคุณสมบัติในอุดมคติเพราะมักพบเสมอว่าอวัยวะเทียมมักจะมีสีเปลี่ยนไปเมื่อใช้งานได้เพียงระยะเวลาสั้น ๆ สาเหตุของการเปลี่ยนสีของอวัยวะเทียมส่วนหนึ่งอาจมาจากความไม่เสถียรของเม็ดสีชนิดต่าง ๆ ที่นำมาเติมลงในอวัยวะเทียม Mc Laren<sup>14</sup> กล่าวไว้ว่า สีแห่งเป็นสีที่นำมาเติมในอวัยวะเทียมโดยไม่ได้ละลายเข้ากับเนื้อวัสดุ แต่ยังคงแขวนลอยเป็นเม็ดสีขนาดเล็กละเอียด ในขณะที่สีละลายนั้นจะละลายเข้ากับเนื้อวัสดุหรือพาหะ (Vehicle) แล้วจึงให้สีปรากฏ สีนั้นบ้างก็เป็นสีที่ได้จากสารประกอบตามธรรมชาติเท่านั้น บ้างก็เป็นสีที่ได้จากการผสมของสารประกอบอินทรีย์ร่วมกับสารประกอบอนินทรีย์ อาทิเช่น สี Raw sienna ที่เดิมมีองค์ประกอบหลักเป็นดินเหนียวที่ผสมเข้ากับออกไซด์ของเหล็ก (Iron oxide) ในขณะที่สี Raw umber มีองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกัน แต่เพิ่มมีกาไนสเข้าไปเป็นต้น มีผู้คาดว่าสีที่มีต้นกำเนิดจากสารประกอบอินทรีย์จะเสื่อมสลายเมื่อถูกแสงอัลตราไวโอเล็ตได้มาก จากการศึกษานี้ของ Mayer<sup>15</sup> พบว่า จากจำนวนสีที่ใช้กันอยู่กว่า 109 สี มี 46 สีที่มีต้นกำเนิดมาจากสารประกอบอินทรีย์โดย 45 สี มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนสีเมื่อถูกแสง (Light fastness)<sup>11</sup> ชั้นที่ 1 (Light fastness I) อีก 1 สี มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนสีเมื่อถูกแสงที่ชั้นที่ 2 (Light fastness II) ส่วนสีที่มีต้นกำเนิดจากสารประกอบอินทรีย์อีก 63 สีนั้น มีความต้านทานต่อการเปลี่ยนสีเมื่อถูกแสงอยู่ในชั้นที่ 1-3 โดยมี 48 สีอยู่ในชั้นที่ 1 อีก 11 สีอยู่ในชั้นที่ 2 และ 4 สีอยู่ในชั้นที่ 3 ซึ่งเป็นชั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงสีมากที่สุด สี 4 สีนี้ได้แก่ Hooker's green 8, Naphthol red 17,

Red 83 และ Naphthol amine (red 146) โดยมีเกณฑ์ในการประเมินคุณสมบัติด้านความต้านทานของการเปลี่ยนสีของเม็ดสีเมื่อถูกแสง ดังนี้

ความต้านทานระดับ I ( Light fastness I )	→ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสี	$\Delta E \leq 4$
ความต้านทานระดับ II ( Light fastness II )	→ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสี	$4 < \Delta E \leq 8$
ความต้านทานระดับ III ( Light fastness III )	→ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสี	$8 < \Delta E \leq 16$
ความต้านทานระดับ IV ( Light fastness IV )	→ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสี	$16 < \Delta E \leq 24$
ความต้านทานระดับ V ( Light fastness V )	→ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสี	$\Delta E > 24$ <sup>16</sup>

จากการทดสอบที่ผ่าน ๆ มาจะเห็นได้ว่าการที่สีของอวัยวะเทียมมีการเปลี่ยนแปลงไปนั้น เกิดจากทั้งการเปลี่ยนสีในตัววัสดุที่ทำให้อวัยวะเทียม<sup>17</sup> รวมไปถึงการเปลี่ยนสีของเม็ดสีที่ใช้เติมแต่งด้วยสาเหตุส่วนหนึ่งเชื่อว่าเกิดจากการสัมผัสกับแสง ดังนั้นได้มีการเติมสารดูดแสงอัลตราไวโอเล็ตชื่อการค้า UV-5411 (Spectra-sorb UV-5411; American Cyanamid Co.) ลงในโพลีโดเมทิลไซลอกเซน MDX 4-4210 และ Type A Medical adhesive ซึ่งผสมดินขาว (Kaolin) ร้อยละ 10 และสีน้ำมันต่าง ๆ โดยทำการเติมสารดูดแสงอัลตราไวโอเล็ต ในระดับต่าง ๆ กันได้แก่ร้อยละ 0.1 ถึง ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ใส่ UV-5411 เมื่อทำการวัดสีของชิ้นตัวอย่างภายหลังจากที่ได้เก็บตัวอย่างภายใต้สถานการณ์เร่งอายุ และสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอก ชิ้นตัวอย่างยังคงมีการเปลี่ยนสี โดยสารดูดแสง UV-5411 ไม่ช่วยลดการเปลี่ยนสี<sup>18</sup> นอกจากผลของแสงจะมีอิทธิพลสำคัญต่อการเปลี่ยนสีของอวัยวะเทียมแล้ว สิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ที่มีผลได้แก่เวลาที่ผ่านไป ความชื้นในอากาศ และสภาพแวดล้อม สภาพอากาศที่เป็นพิษและเจือปนด้วยฝุ่นละอองและก๊าซต่าง ๆ รวมทั้งอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงด้วย นอกจากนี้การดูแลรักษา การใช้กาบ การทำความสะอาด รวมทั้งการใช้เครื่องสำอางบนอวัยวะเทียมล้วนมีผลเสริมให้เกิดการเปลี่ยนสีในอวัยวะเทียมได้ด้วย<sup>19-20</sup>

### ปัจจัยที่ทำให้เกิดมองเห็นสี

การมองเห็นสีเกิดได้เนื่องจากมีปัจจัย 3 อย่างคือ แหล่งกำเนิดแสง วัตถุที่มีสี และสายตาของมนุษย์ โดยแสงสว่างที่ส่องกระทบวัตถุที่มีสีจะสะท้อนเข้าตา และไปกระตุ้นให้เกิดการทำงานของเซลล์บนเรตินา ซึ่งประกอบด้วย เซลล์รูปแท่ง ( Rods ) ที่มีความไวต่อแสง แต่ไม่ก่อให้เกิดสีสัน และเซลล์รูปโคน ( Cones ) ที่มีความไวต่อแม่สีแสง ทั้ง 3 คือ แดง เขียว และน้ำเงิน โดยจะส่งสัญญาณไปยังสมองเพื่อแปลหรือวิเคราะห์สี

## 1. แหล่งกำเนิดแสง ( Light Source )

แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการมองเห็นมี 2 แหล่ง คือ แหล่งกำเนิดแสงจากธรรมชาติ และแหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์

### 1.1 แหล่งกำเนิดแสงจากธรรมชาติ

เช่น แสงแดด ก่อนที่จะผ่านมายังโลก จะเกิดการกระเจิงของแสง ( Scattering ) หรือถูกดูดกลืนบางส่วนด้วยชั้นของบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก เช่น ไอน้ำ หรือโอโซน เป็นต้นจากนั้นจึงส่องผ่านมายังโลก แสงแดดซึ่งเป็นสีขาวเมื่อผ่านปริซึม จะแยกออกเป็นแถบสีที่มองเห็นได้ต่าง ๆ กัน ( Visible light ) โดยมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400 ถึง 700 นาโนเมตร แต่ละความยาวคลื่นจะมีสีต่างกัน ดังนี้

ความยาวคลื่น	400-430	นาโนเมตร	เป็นแสง	สีม่วง	
“	“	430-460	“	“	สีน้ำเงิน
“	“	460-500	“	“	สีเขียวแกมน้ำเงิน
“	“	500-530	“	“	สีเขียว
“	“	530-570	“	“	สีเขียวกอมเหลือง
“	“	570-590	“	“	สีเหลือง
“	“	590-620	“	“	สีส้ม
“	“	620-700	“	“	แดง

แสงแดดตามธรรมชาติจะมีการกระจายพลังงาน ( Spectral power distribution ) แตกต่างกันไปตามสภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศ ฤดู และช่วงเวลา ดังนั้นการมองเห็นสีจากแหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติ ในช่วงเวลา ภูมิประเทศ ภูมิอากาศ ฤดูที่ต่างกัน ก็จะทำให้มองเห็นสีได้ต่างกันไป

### 1.2 แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ มีอยู่หลายแบบได้แก่

### ก. หลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ ( Incandescence lamp )

แหล่งกำเนิดแสงไฟประเภทนี้ เกิดจากการให้ความร้อนแก่โลหะทองเหลือง จนกระทั่งสัมผัสไม่ได้เนื่องจากมีรังสีอินฟราเรดออกมา หลังจากให้ความร้อนขึ้นเรื่อยๆ โลหะทองเหลืองจะคุ้แดงตื้นๆ จากนั้นจะเปลี่ยนเป็นสีแดงสด สีเหลือง และสีฟ้าตามลำดับ สีที่เปล่งออกมาขึ้นกับอุณหภูมิของโลหะในขณะนั้น กล่าวคือความยาวของคลื่นแสงจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของโลหะสูงขึ้น ดังนั้นการกระจายพลังงานของแสงจากหลอดไฟอินแคนเดสเซนต์ จะขึ้นกับอุณหภูมิของโลหะที่สูงขึ้น

### ข. หลอดไฟทังสเตน ( Tungsten Filament Lamp )

แหล่งกำเนิดแสงไฟประเภทนี้ เกิดจากการให้ความร้อนแก่ลวดทังสเตนโดยผ่ากระแสไฟฟ้าเข้าไปในหลอดแก้วที่บรรจุก๊าซเฉื่อย หรือลดความดันอากาศลงเพื่อให้ลวดทังสเตนเกิดออกซิเดชั่น น้อยที่สุด การให้ความร้อนแก่ลวดทังสเตนนี้ จะทำให้เกิดการกระจายพลังงานของแสงออกมาตลอดความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตรที่มีการกระจายพลังงานอย่างสม่ำเสมอ แสงจากหลอดไฟทังสเตนจะมีสีเหลืองกว่าแสงแดดตอนกลางวัน จึงอาจทำให้มองเห็นสีของวัสดุต่างกันได้

### ค. หลอดไฟทังสเตน- ฮาโลเจน ( Tungsten – Halogen Lamp )

แหล่งกำเนิดแสงไฟประเภทนี้ มีข้อดีกว่าหลอดไฟทังสเตนแบบเดิม กล่าวคือหลอดไฟทังสเตนเมื่อได้รับความร้อน จะเกิดไอระเหยไปจับที่ผนังด้านในของหลอดแก้ว ทำให้หลอดดำขึ้นเรื่อยๆ และมีความสว่างลดลงหลังการใช้งานไปนานๆ แต่เมื่อมีก๊าซพวก ฮาโลเจน เช่น ไอโอดีน หรือ โบรมีน อยู่ในหลอดไฟเป็นปริมาณเล็กน้อย ก็จะช่วยจับกับไอระเหยของทังสเตน เกิดเป็น ทังสเตนเฮไลด์ แทนที่จะไปจับที่ผนังหลอดไฟ และ เมื่อ ทังสเตนเฮไลด์มากระทบกับลวดทังสเตน ทังสเตนเฮไลด์ก็จะแยกตัว โดยทังสเตนก็ไปเกาะที่ไส้หลอด ส่วนฮาโลเจนก็กลายเป็นก๊าซไหลเวียนอยู่ในหลอดแก้ว ทำให้หลอดไฟมีอายุการใช้งานนานขึ้น แสงจากหลอดไฟทังสเตน- ฮาโลเจนจะมีการกระจายพลังงานอย่างต่อเนื่อง

### ง. หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ ( Fluorescence Lamp )

พลังงานของหลอดไฟ ฟลูออเรสเซนต์ เกิดจากไอปรอทที่แผ่รังสีในช่วงความยาวคลื่นพลังงานแสงที่มองเห็นได้ (Visible) และรังสี อัลตราไวโอเล็ตที่มองไม่เห็น (non-visible ultraviolet) โดยพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่นบางช่วงจะส่องผ่านผงฟลูออเรสเซนต์ที่ผนังด้านในของหลอดออกไป ในขณะที่เดียวกับรังสี อัลตราไวโอเล็ตที่เกิดขึ้นจะถูกผงฟลูออเรสเซนต์ดูดไว้ แล้วปล่อยพลังงานออกมาในช่วงพลังงานแสงที่มองเห็นได้เป็นแถบสเปกตรัมต่อเนื่อง ทำให้เกิดการเรืองแสง

หลอดไฟ ฟลูออเรสเซนต์ที่มีอยู่ในทางการค้ามีหลายชนิดด้วยกัน โดยจะมีการเกิดแถบสเปกตรัมแตกต่างกัน ขึ้นกับชนิดของฟลูออเรสเซนต์ที่เคลือบอยู่ด้านในของหลอด เช่น เมทัล ทังสเตตส์ (Metal tungstates) , ซิลิเกตส์ (Silicates) , บอเรตส์ (Borates) ฮาโลฟอสเฟต (Halophosphate) เป็นต้น ถ้าใช้ฮาโลฟอสเฟต ก็จะมีการปล่อยพลังงานออกมาในช่วงของแสงสีเหลือง-เขียว แต่จะมีปริมาณของสีแดงต่ำมาก

#### จ. หลอดไฟ ซีโนอนอาร์ค (Xenon Arc Lamp)

หลอดไฟ ซีโนอนอาร์ค ให้แสงโดยการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซ ทำให้เกิดแสงที่มีพลังงาน อยู่ในช่วงระหว่างช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต และรังสีอินฟราเรด และเมื่อใช้ที่กรองแสงลดรังสีอัลตราไวโอเล็ตอย่างสม่ำเสมอ และใช้ที่กรองความร้อนลดความเข้มของรังสีอินฟราเรดให้ต่ำลง จะทำให้หลอดไฟ ซีโนอนอาร์คเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีการกระจายของพลังงานใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานของ CIE D65 หรือแสงแดดตอนกลางวันมากที่สุด นอกจากนั้นหลอดไฟ ซีโนอนอาร์ค สามารถให้แสงกระพริบ มีข้อดีที่แสงกระพริบจะมีความเข้มของแสงสูงในระยะสั้น ทำให้ขึ้นตัวอย่างที่ทำการวัดสีไม่ร้อนมากจนเกินไปจนเกิดการเปลี่ยนสี

## 2. วัตถุมีสี (Color object)

เมื่อแสงส่องกระทบวัตถุ จะเกิดปรากฏการณ์ ดังนี้

### 2.1 Specular Reflection

เป็นปรากฏการณ์ การสะท้อนแสงของวัตถุที่มีความเงามัน ซึ่งปรากฏการณ์นี้ จะเกิดกับวัตถุที่มีพื้นผิวมีความมัน (Opaque Metal)

## 2.2 Diffuse Reflection

เป็นปรากฏการณ์ การสะท้อนแสงของวัสดุที่มีพื้นผิวไม่เรียบ ไม่มีความเงามัน เช่น วัสดุสิ่งทอ การมองเห็นสีของวัสดุลักษณะดังกล่าว จะเกิดขึ้นเมื่อแสงส่องผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุนั้น แล้วเกิดการกระเจิงของแสง ( Scattering ) ขึ้นในวัสดุสิ่งทอที่มีอนุภาคของสีข้อมอยู่ จากนั้นอนุภาคของสีจะดูดกลืนแสงบางช่วงคลื่นไว้ และสะท้อนแสงบางช่วงคลื่นออกมา ทำให้เกิดการมองเห็นสีต่างๆกันตามความยาวคลื่นที่สะท้อนออกมา

## 2.3 Diffuse Transmission

เป็นปรากฏการณ์ที่แสงส่องผ่านวัตถุที่มีความโปร่งแสง ( Translucent materials ) และมีพื้นผิวไม่เรียบ หรือแสงส่องผ่านวัตถุที่มีความโปร่งใส ( Transparent materials ) และเกิดการกระเจิงของแสงที่พื้นผิวนั้น

## 2.4 Regular Transmission

เป็นปรากฏการณ์ที่แสงส่องผ่านทะลุผ่านวัตถุที่มีความโปร่งใส เช่นกระจกหรือสารละลายสีข้อม เป็นต้น

## 3. ผู้สังเกตการณ์ ( Observer )

ผู้สังเกตการณ์เป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งในการวัดสี เมื่อแสงส่องผ่านกระทบวัตถุแล้วสะท้อนเข้าตามนุษย์ ที่ตาบริเวณเรตินาจะมีส่วนไวต่อแสงแตกต่างกันอยู่ 2 ชนิดคือ ส่วนที่แยกความสว่าง - มืด เรียกว่า เซลล์รูปแท่ง ( Rods ) และส่วนที่สามารถแยกสีได้เรียกว่า เซลล์รูปโคน ( Cones ) ซึ่งสามารถแบ่งได้อีกเป็นส่วนที่ไวต่อ แสงสีแดง เขียว และ น้ำเงิน โดยแสงจะไปกระตุ้นเซลล์รูปโคน ให้ส่งสัญญาณผ่านเส้นประสาทไปยังสมอง

## หลักการวัดสี<sup>21</sup>

โดยทั่วไปมนุษย์จะระบุลักษณะสีของวัตถุที่มองเห็นเป็น 3 ลักษณะ คือ Hue Value และ Chroma โดยที่ Hue หมายถึง สีที่ปรากฏให้เห็น เช่น สีแดง เขียว น้ำเงิน เป็นต้น ส่วน Value หมายถึง ความสว่างของสี Chroma หมายถึง ความเข้มหรือความบริสุทธิ์ของสี อย่างไรก็ตามพบว่าการระบุลักษณะสีของวัตถุขึ้นเดียวกันที่มนุษย์มองเห็นนั้นมีความหลากหลายขึ้นกับ ประสบการณ์ การฝึกฝน เพศ อายุ อารมณ์ และ สิ่งแวดล้อมในการมองเห็น ดังนั้น รวมทั้งสายตามนุษย์มีความสามารถในการมองเห็นสี และความแตกต่างของสีได้ไม่เท่ากัน ตามมนุษย์จะปรับตัวให้เข้ากับสีที่ใกล้เคียงกันได้ง่ายมาก นอกจากนั้นความสามารถในการมองเห็นสียังขึ้นกับแสงที่ส่องผิวหน้า และขึ้นกับมุมที่สายตามองผิวหน้าของวัตถุมีสี ตามมนุษย์ไม่สามารถบันทึกค่าหรือบอกค่าที่แน่นอนว่าสีของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร หรือสีเดิมเป็นอย่างไร ซึ่งจุดอ่อนดังกล่าวทำให้ไม่สามารถสื่อผลของสีให้ตรงกันได้นั้นจึงมีการจัดลำดับหรือการวัดสี ให้สามารถสื่อความหมายได้ตรงกันในระดับสากล<sup>22,23</sup> ระบบการวัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ได้แก่

### 1. ระบบ Munsell

ระบบนี้ได้ถูกพัฒนา โดย Albert H. Munsell ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1905 ก่อนที่จะมีการนำเครื่องวัดสีมาใช้ในการวัดสี ในระบบนี้มีการจัดเรียงแผ่นกระดาษให้มี Hue value และ Chroma เรียงกัน โดยมีค่าตัวเลขเรียงกันตามลำดับ แม้ว่าจะสามารถสื่อความหมายของสีได้ดีขึ้น แต่ยังคงมีลักษณะที่อาศัยความนึกคิด ประสบการณ์ของผู้มองแต่ละคน ( subjective ) ดังนั้นอาจทำให้มีการบอกลักษณะสีที่ต่างกันได้

### 2. ระบบ CIE

ระบบ CIE พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1931 เมื่อสถาบัน Commission Internationale de l' Eclairage (CIE) ได้เห็นความจำเป็นที่จะต้องมีการวัดสีที่ไม่ต้องอาศัยความนึกคิด ประสบการณ์ของบุคคล โดยทำการวัดสีออกมาเป็นตัวเลข ในรูปค่า X ซึ่งบอกความเป็นสีแดงของวัสดุ Y ซึ่งบอกความเป็นสีเขียวของวัสดุ Z ซึ่งบอกความเป็นสีน้ำเงินของวัสดุ แต่ค่า X Y Z นั้นไม่สามารถโยงไปสู่ค่า Hue value และ Chroma ได้ จึงต้องนำไปแปลงโดยเข้าสมการ



$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

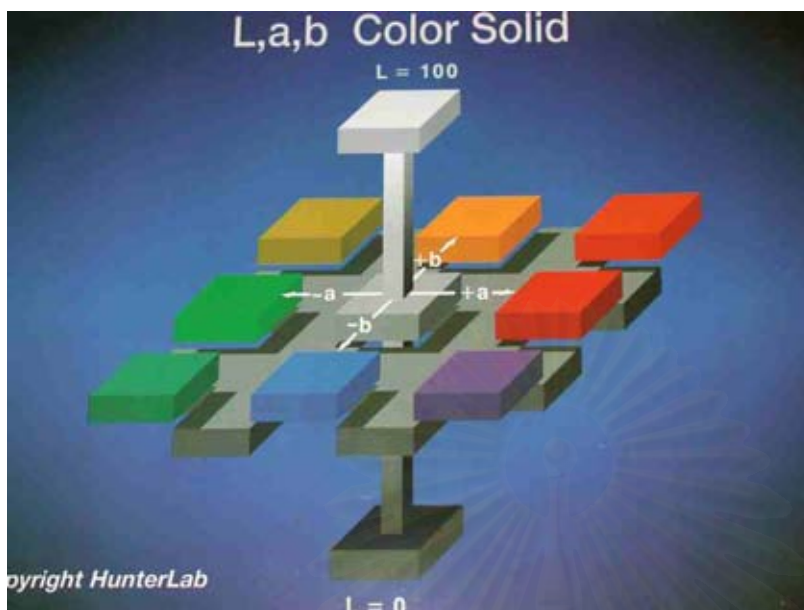
$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

ค่า  $x$   $y$   $z$  ที่คำนวณได้นี้สามารถบอกได้เฉพาะ ค่าhue และค่า chroma เท่านั้นไม่สามารถบอกค่า ปริมาณความคลาดเคลื่อนหรือความแตกต่างของสีได้

### 3. ระบบสี CIE L\* a\* b\*

มีการพัฒนาระบบสี CIE ให้สามารถบอกความแตกต่างของสีได้ โดยคิดค้นสมการใหม่ที่บอกความแตกต่างของสีได้อย่างสม่ำเสมอ เรียกว่า สมการ CIELAB1976 ซึ่งมีลักษณะ ของมิติสี ดังรูปที่ 2 โดย L\* ใช้กำหนดค่าความสว่าง-มืด มีค่าในระหว่าง 0 ถึง 100 โดยค่า 0 หมายถึงสีดำสนิท ส่วน 100 หมายถึงสีขาวสนิท ส่วน a\* ใช้กำหนดค่าความมีสีแดงหรือเขียว โดยค่า a\* เป็น + หมายถึงวัตถุ มีสีออกแดง ส่วน a\* เป็น - หมายถึงวัตถุมีสีออกเขียว ส่วน b\* ใช้กำหนดค่าความมีสีเหลืองหรือน้ำเงิน โดยค่า b\* เป็น + หมายถึงวัตถุมีสีออกเหลือง ส่วน b\* เป็น - หมายถึงวัตถุมีสีออกน้ำเงิน โดยค่า a\* และ b\* มีค่าระหว่าง +80 ถึง -80

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2 แสดงมิติของสีในแกน  
L ,a และ b

ในระบบนี้เราจะวัดสีออกมาเป็นตัวเลขได้ แต่การใช้ประโยชน์จากการวัดสีออกมาเป็นตัวเลขที่แท้จริงคือ การวัดความแตกต่างของสีตัวอย่างที่ต้องการทดสอบกับตัวอย่างมาตรฐานออกมาในรูปตัวเลข ซึ่งคำนวณค่าความแตกต่างของสีกับตัวอย่างมาตรฐานได้จาก

$$\Delta E^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$$

เมื่อ  $\Delta E^*$  หรือ  $\Delta E^*$  คือความแตกต่างของสี ที่คำนวณมาจาก

$\Delta L^*$  ซึ่งหาจากค่า  $L^*$  ของตัวอย่างทดสอบ -  $L^*$  ของตัวอย่างมาตรฐาน

$\Delta a^*$  ซึ่งหาจากค่า  $a^*$  ของตัวอย่างทดสอบ -  $a^*$  ของตัวอย่างมาตรฐาน

$\Delta b^*$  ซึ่งหาจากค่า  $b^*$  ของตัวอย่างทดสอบ -  $b^*$  ของตัวอย่างมาตรฐาน

ดังนั้นการใช้เครื่องวัดสีในการบอกความแตกต่างของสีตัวอย่างกับมาตรฐาน หรือใช้ในการระบุสีเป็นตัวเลขจึงมีผลในการควบคุมคุณภาพ และเพิ่มความแม่นยำในการสร้างผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีมาตรฐานและน่าเชื่อถือ โดยทั่วไปความแตกต่างของสีที่ ( $\Delta E^*$ ) ที่ทางอุตสาหกรรมให้การยอมรับจะมีค่าประมาณ 1-2 หน่วย แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นกับสีและทิศทางการเปลี่ยนแปลงของสีด้วย เช่น สีแดงสดที่มีค่าความแตกต่างของสี  $\Delta E^* = 1.0$  เท่ากับความแตกต่างในสีเทาอ่อน สายตามนุษย์จะมองเห็นความแตกต่างของสีเทาอ่อนได้มากกว่าความแตกต่างของสีแดง นั่นคือสายตามนุษย์ไม่สามารถบอกได้ว่าสี

แดงนั้นมีความแตกต่าง หรือในบางครั้งอาจจะระบุความแตกต่างได้มากกว่า 1-2 หน่วยขึ้นกับความจำเป็นในการใช้งาน

### คุณสมบัติทางกายภาพของอวัยวะเทียม

นอกจากคุณสมบัติเรื่องสีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับความสวยงามของอวัยวะเทียม เรายังต้องการให้อวัยวะเทียมมีความคงทนแข็งแรงต่อการใช้งานซึ่งจะต้องมีการใส่และดึงถอดออกทุก ๆ วัน อวัยวะเทียมจึงควรมีคุณสมบัติที่ยืดหยุ่นได้ดีโดยไม่เปลี่ยนรูปร่างถาวร ในขณะที่เดียวกันต้องนิ่มคล้ายกับผิวหนังมนุษย์ วัสดุประเภทโพลีไคเมธิลไซลอกเซนจึงเป็นวัสดุที่ดีที่สุดเหมาะกับการใช้งานในลักษณะนี้ อย่างไรก็ตามอวัยวะเทียมที่ใช้งานไปได้ระยะหนึ่งจะมีการฉีกขาด โดยเฉพาะตามขอบ<sup>24,25</sup> และเป็นเหตุสำคัญอันหนึ่งที่ทำให้ให้อวัยวะเทียมมีอายุการใช้งานสั้นลง นอกเหนือไปจากการเปลี่ยนสีและการเปลี่ยนแปลงในรอยแผล จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง ในปี 1972 ได้มีรายงานการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่ใช้ทำอวัยวะเทียม เพื่อเป็นแนวทางการทดสอบวัสดุและพัฒนาข้อต่อของวัสดุต่าง ๆ ทำให้สามารถกำหนดคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งานคร่าว ๆ ได้ คุณสมบัติที่ทดสอบนี้รวมไปถึงการทดสอบความหนัก, ความแข็งผิวของวัสดุ ( Shore A hardness test ) ความแข็งแรงดึง และความแข็งแรงฉีก<sup>26</sup> Koran และ Craig<sup>27</sup> ได้ทดสอบวัสดุ 3 กลุ่ม 6 ชนิด ที่ใช้กันอยู่ขณะนั้น ได้แก่ โพลีไวนิลคลอไรด์ โพลียูรีเทน และโพลีไคเมธิลไซลอกเซน พบว่าโพลีไคเมธิลไซลอกเซนชนิดกอดตัวภายใต้อุณหภูมิห้องมีคุณสมบัติความยืดหยุ่น (Dynamic resilience) ดีที่สุด ในปี 1977 Moore และคณะ<sup>28</sup> ได้ทำการสำรวจตลาดเพื่อหาวัสดุใหม่ ๆ ที่จะมาใช้ทำอวัยวะเทียม จากบริษัทและสถาบันที่เกี่ยวข้อง โดยพบว่าวัสดุที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงคุณสมบัติในอุดมคติ ที่ควรจะนำมาทดสอบเทียบกับวัสดุที่มีใช้อยู่ โดยได้นำเสนอวิธีสร้างขึ้นทดสอบเป็นลักษณะคล้ายวงแหวนรูปอักษรโอ ( O-ring ) เพื่อทดสอบหาค่าความแข็งแรงดึงของวัสดุต่าง ๆ โดยได้อธิบายว่าวิธีการทำขึ้นตัวอย่างนี้คล้ายกับวิธีที่ใช้ทำอวัยวะเทียม อีกทั้งขั้นตอนอย่างลักษณะนี้ไม่ต้องใช้หิวจับพิเศษที่จะใช้จับที่ปลายขึ้นทดสอบด้วย จากการทดสอบพบว่า MDX 4-4210 เป็นวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติเหนือว่าวัสดุที่ใช้อยู่เดิมโดยมีความแข็งแรงฉีกสูงและยังมีคุณสมบัติยืดหยุ่นตัวดี (Flexible) รวมทั้งมีความแข็งแรงบริเวณขอบสูงด้วย แต่พบว่าการทดสอบในลักษณะนี้ไม่เป็นที่นิยมมากนัก ในปี 1979 Yu และ Koran<sup>29</sup> ได้ทดสอบความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรของวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ โพลีไคเมธิลไซลอกเซน, โพลีไวนิลคลอไรด์และโพลียูรีเทน ก่อนและหลังจากทำการทดลองเร่งอายุวัสดุ (Accelerated aging) พบว่าโพลีไคเมธิลไซลอกเซนมีมิติที่เสถียรที่สุด โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวรภายหลังจากทำการเร่งอายุ 900 ชั่วโมงน้อยที่สุด ประมาณ ร้อยละ

0.22-0.26 ในขณะที่โพลีไวนิลคลอไรด์มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากกว่า และในวัสดุจำพวกโพลียูรีเทนมีการเสื่อมสภาพ ( Disintegrated ) หลังจากทดสอบไปเพียง 600 ชั่วโมง เช่นเดียวกับการทดลองของบุคคลกลุ่มเดิมในปี 1980<sup>30</sup> พบว่าภายหลังจากทำการเร่งอายุ โพลียูรีเทนมีการเสื่อมสภาพที่ 600 ชั่วโมง วัสดุอื่น ๆ ที่ทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพไม่มากนัก โดยวัสดุที่มีคุณสมบัติคงตัวที่สุดได้แก่ MDX 4-4210 หลังจากนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบวัสดุ MDX 4-4210 เพิ่มโดยการเติมสี แล้ววัดคุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าภายหลังจากการเติมสีและทำการเพิ่มอายุ 900 ชั่วโมง พบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลน้อย<sup>31</sup> วัสดุชนิดนี้จึงเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่น่าใช้ที่สุด ในขณะที่ Lewis และ Castleberry ได้ทำการสำรวจวัสดุใหม่ที่ใช้ทำอวัยวะเทียม และได้นิยามถึง วัสดุในอุดมคติ<sup>13</sup> ในขณะที่ Craig Koran และ Yu ได้ทำการพิจารณาคุณสมบัติต่าง ๆ ที่มีอยู่และสรุปพ้องต้องกันว่า วัสดุโพลีไดเมทิลไซลอกเซนที่ก่อตัวภายใต้อุณหภูมิห้อง MDX 4-4210 มีคุณสมบัติเหมาะกับการใช้งานที่สุด<sup>32</sup> แม้ว่าจะมีผู้เสนอวัสดุใหม่เช่น เมทิล ไตรอะซีโทกซี ไฮเลน ครอสลิงค์ ( Methyl triacetyloxy silane cross-linked ) ใช้ร่วมกับโพลีไดเมทิลไซลอกเซนที่ก่อตัวที่อุณหภูมิห้อง A-102<sup>33</sup> และไอโซไซไฟโรน โพลียูรีเทน<sup>34</sup> และได้รายงานวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติบางประการที่เหนือกว่า MDX 4-4210 แต่ก็ยังไม่เป็นที่นิยมใช้ ในปี 1985 Wolfaardt, Chandler และ Smith<sup>35</sup> ได้รายงานถึงวัสดุจำพวกโพลีไดเมทิลไซลอกเซนตัวใหม่คือ Cosmesil เทียบกับวัสดุจำพวกโพลีไดเมทิลไซลอกเซนที่ใช้กันอยู่ 2 ชนิดคือ Silastic 382 และ MDX 4-4210 ในการทดลองนี้ได้ทดสอบ Cosmesil ความแข็ง-ความนุ่มที่ระดับต่าง ๆ พบว่าเมื่อทดสอบ Cosmesil ที่ผสมให้นุ่มมีคุณสมบัติดีกว่าวัสดุอื่น ๆ โดยมีความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีก และอัตราส่วนการยืดตัวสูงสุด รวมทั้งมีความแข็งแรงผิวต่ำกว่า MDX 4-4210

ในช่วงปี 1987 เป็นต้นมา การศึกษาได้หันมาพัฒนาวัสดุที่มีอยู่แล้ว โดยผสมกับวัสดุอื่น ๆ Farah และคณะ<sup>36</sup> ได้ทดลองผสมวัสดุ MDX 4-4210 เข้าไป Medical adhesive type A โดยหวังผลเพื่อให้วัสดุนุ่มและยืดหยุ่นมากขึ้น และเสนอวิธีในการผสมวัสดุทั้งสองอย่างนี้ ในอัตราส่วนต่าง ๆ และได้วัดคุณสมบัติทางกายภาพเช่น ความแข็งแรง, ความแข็งแรงฉีกและความสามารถในการยืดสูงสุด ( Maximum Elongation ) พบว่า ความแข็งแรงจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ MDX 4-4210 ความแข็งแรงฉีก จะมากที่สุดเมื่อใช้ MDX 4-4210 น้อยที่สุดในอัตรา 80 ต่อ 20 ส่วน และค่าความสามารถในการยืดสูงสุด จะมีค่าเป็น 2 เท่าเมื่อใช้ medical adhesive type A 100% เทียบเมื่อใช้ในอัตราส่วน 60:40 และอย่างละครึ่ง ในปีเดียวกัน Udagama<sup>37</sup> ได้เสนอวิธีการเชื่อม โพลีไดเมทิลไซลอกเซน เข้ากับแผ่นโพลียูรีเทน ทั้งนี้มุ่งหวังที่จะแก้ข้อด้อยของโพลีไดเมทิลไซลอกเซน ที่มักไม่ติดกับกาว มีขอบที่ไม่ค่อยแข็งแรง และยังพบว่าโพลีไดเมทิลไซลอกเซนมักจะมีผิวเป็นรูพรุน มักจะเก็บกัก

สะสมเชื้อราได้มาก ดังนั้นจึงได้นำแผ่นโพลีเอธิลีนซึ่งมีลักษณะใส, มีความแข็งแรงฉีกสูง ขึ้นรูปได้ (Moldability) และเข้ากันได้กับการติดผิวหนังชนิดมีน้ำเป็นตัวละลาย พบว่าเมื่อใช้แผ่นโพลีเอธิลีนเชื่อมกับโพลีไคเมธิลไซลลอกเซนชนิดก่อดำภายใต้อุณหภูมิห้อง medical Adhesive type A โดยอาศัยสารปรับสภาพ S-2260 (Primer -2260) ให้ผลการยึดติดที่ดีที่สุด พื้นผิวของแผ่นโพลีเอธิลีนไม่มีเชื้อราขึ้น รวมทั้งอวัยวะเทียมสามารถใช้งานได้นาน ข้อเสียของโพลีเอธิลีนมีเพียงอย่างเดียวคือมีการเปลี่ยนสีออกเหลือง หลังจากใช้งานไปประมาณ 9-12 เดือน ในปี 1992 ยังได้มีการทดสอบโพลีไคเมธิลไซลลอกเซนอีก 2 ชนิด คือ MDX 4-4210 เทียบกับ A-2186 โดยทำการทดสอบคุณสมบัติ 4 อย่าง ที่ใช้ทดสอบอวัยวะเทียมเสมอ เนื่องจากมีคุณสมบัติตรงกับการใช้งานของอวัยวะเทียม ได้แก่ ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) อัตราส่วนความยืดหยุ่น (Elongation) ความแข็งแรงฉีก (Tear strength) และความแข็งผิว (Surface hardness) พบว่า A - 2186 มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงฉีก ความแข็งแรงดึงและอัตราส่วนความยืดหยุ่นสูงกว่า MDX 4-4210 พร้อมกันนั้นยังมีผิวที่นุ่มกว่า MDX 4-4210 ด้วย จากคุณสมบัติที่เหนือกว่านี้ ทำให้ A - 2186 มีความคงทนบริเวณขอบสูงขึ้น ทำให้สามารถลดความหนาบริเวณขอบลงได้ ดังนั้นอวัยวะเทียมจะสามารถมีขอบที่กลมกลืนไปกับอวัยวะข้างเคียง ดูสวยงามเป็นธรรมชาติขึ้นด้วย<sup>38</sup> ในปีเดียวกัน Andres และคณะได้เสนอรายงานวิจัย 4 เรื่อง ประกอบด้วยวรรณกรรมปริทัศน์ที่แสดงผลของสิ่งแวดล้อมต่อวัสดุที่ใช้ทำอวัยวะเทียม<sup>39</sup> และยังได้รายงานการสำรวจความนิยมต่อวัสดุที่ใช้ทำอวัยวะเทียม ตลอดจนระบบการแต่งสีที่นิยมใช้ รวมถึงความคิดเห็นต่อลักษณะที่ควรมีของวัสดุในอนาคต พบว่าทันตแพทย์ส่วนใหญ่นิยมใช้โพลีไคเมธิลไซลลอกเซนชนิดก่อดำภายใต้อุณหภูมิห้องในการทำอวัยวะเทียม และนิยมการแต่งสีภายในเนื้อวัสดุ โดยใช้เม็ดสีจากธรรมชาติ (Dry earth pigment) หรือสีน้ำมันรวมทั้งใช้เส้นใยสี (Rayon fiber) และใช้ดินขาว (Kaolin) เป็นสารทึบแสง (Opacifier)<sup>40</sup>

นอกจากนี้ยังได้รายงานการทดสอบ คุณสมบัติของวัสดุ 5 ชนิด ได้แก่ Silastic 4-4210, Silastic 4-4515, Medical Adhesive type A (A-891), Epithane 3 ซึ่งเป็น โพลีเอธิลีน และวัสดุใหม่ 2 ชนิด คือ A2186 และ A102 โดยทำการทดสอบคุณสมบัติทั้ง 4 เช่นเดิมพบว่าไม่มีคุณสมบัติเทียบเคียงคุณสมบัติในอนาคต วัสดุ A-2186 เป็นวัสดุที่มีที่แข็งแรงเท่าเทียมกับวัสดุ Silastic4-4210, Silastic4-4515 ซึ่งมีความแข็งแรงมากที่สุด<sup>41</sup>

นอกจากนั้น Andres และคณะยังได้ทำการทดสอบ ถึงวัสดุทำอวัยวะเทียมที่ได้รับการผสมสีชนิดต่าง ๆ แล้วเป็นชุดการทดลองอีกชุดหนึ่งในปี 1999 โดยในส่วนของ 1 ได้ทดสอบถึงผลของสีที่ใช้ผสมต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ทำอวัยวะเทียม<sup>42</sup> เนื่องจากจากปัญหาที่อวัยวะเทียมมีการใช้งานสั้นกว่าความต้องการ นั่นคือประมาณ 6 เดือนเท่านั้น โดยสาเหตุของการจำกัดอายุการใช้

งานสืบเนื่องมาจากการเปลี่ยนสี และการเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพดังที่กล่าวมา ในการทดลองนี้ จึงต้องการหาอิทธิพลของสีที่ใช้ผสมว่าเกี่ยวเนื่องกับการเสื่อมของอวัยวะเทียมหรือไม่อย่างไร จากการทดลองจะแสดงให้เห็นได้ว่าโพลีไดเมทิลซิลอกเซนทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ทดสอบได้แก่ Silastic Medical adhesive type A, Silastic 4-4210 และ Silicone A-2186 ถูกนำมาผสมกับสารแต่งสี 5 ชนิด ได้แก่ เม็ดสีจากธรรมชาติ ( Dry earth pigment ) , เส้นใยเรยอน ( Rayon fiber ) สีน้ำมัน ( Artist's oil paints), ดินขาว (Kaolin) และเครื่องสำอางเหลว ( Liquid cosmetic ) เทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผสมสี และได้ทำการวัดคุณสมบัติทั้ง 4 เช่นเดิม พบว่าเมื่อทดสอบความแข็งแรง พบว่าการเติมสารแต่งสีใดมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรง ยกเว้นเมื่อเติมเครื่องสำอางเหลวลงในโพลีไดเมทิลซิลอกเซน A-2186 เป็นที่น่าสังเกตว่า เส้นใยแต่งสีเรยอนเพิ่มความแข็งแรงของโพลีไดเมทิลซิลอกเซน Medical adhesive type A , Silastic 4-4210 และ A-2186 ถึงร้อยละ 19 ส่วนดินขาวก็เพิ่มความแข็งแรงของ Silastic 4-4210 ร้อยละ 19 และเพิ่มความแข็งแรงของ A-2186 ร้อยละ 36 ด้วย ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นกับอวัยวะเทียม ในเรื่องความแข็งแรงจึงพบว่า การเติมสีน้ำมันมีผลเพิ่มความแข็งแรงของ Medical adhesive type A อย่างไรก็ดีวัสดุนี้มีค่าความแข็งแรงดิ่ง น้อยกว่าวัสดุอีก 2 ชนิด ในเรื่องความแข็งแรงดิ่ง พบว่าการเติมสีใด ๆ ลงใน Medical adhesive type A มีผลลดค่าความแข็งแรงดิ่งลงตั้งแต่ร้อยละ 346 ถึง ร้อยละ 66 และการเติมสีไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงดิ่งของ A - 2186 และ Silastic 4-4210 ในเรื่องอัตราการยึดตัวพบว่าการเติมเส้นใยเรยอนลดอัตราการยึดตัวของ medical adhesive type A ร้อยละ 26.6 และลดอัตราการยึดตัวของ Silastic 4-4210 กว่าร้อยละ 20 การเติมสีลักษณะต่าง ๆ ไม่มีผลต่อการยึดตัวของ A-2186 จากการทดลองนี้สรุปได้ว่าสีที่มีลักษณะเป็นของแข็ง ได้แก่ เม็ดสีจากธรรมชาติ ดินขาวและเส้นใยเรยอน มีลักษณะเป็นของแข็งแขวนลอยอยู่ในเนื้ออวัยวะเทียมโดยไม่ได้เกิดพันธะใด ๆ กับโพลีไดเมทิลซิลอกเซนที่มีลักษณะเป็นโครงข่าย ( Matrix ) ที่มีคุณสมบัติหลากหลายขึ้นอยู่กับสารเติมแต่ง ( Inorganic filler ) ซึ่งส่วนใหญ่คือ ซิลิกา ที่เชื่อมอยู่กับโครงข่าย เป็นออร์กาโนซิลอน ( Organosilane ) ดังนั้นการเติมสารใด ๆ ที่เป็นสารแขวนลอยที่ไม่สามารถเกิดพันธะกับโครงข่ายได้ จึงลดคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุลง ในส่วนที่ 2 ได้ศึกษาผลของสิ่งแวดล้อมที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ได้รับการเติมแต่งสีข้างต้น<sup>43</sup> โดยทำการทดสอบคุณสมบัติทั้ง 4 อย่าง โดยวัดค่าความแข็งแรงและความแข็งแรงดิ่งโดยใช้ ชิ้นตัวอย่างรูปร่างกางเกง ( Trouser-shaped specimens ) และวัดค่าความแข็งแรงดิ่งและค่าอัตราส่วนการยึดตัว โดยใช้ชิ้นตัวอย่างรูป ดัมเบลล์ ( Dumbbell-shaped specimen ) พบว่าการผสมวัสดุเติมแต่งสีมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ผู้เขียนสรุปโพลีไดเมทิลซิลอกเซนไม่ใช่วัสดุที่คงตัว ( Stable ) การเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพเกิดขึ้นทั้งชิ้นทดสอบที่เติมสีและที่ไม่ได้เติมสีซึ่งได้รับการเก็บในภาชนะ

และวางในที่มีด ในส่วนที่ 3 ได้รายงานถึงผลของสภาพแวดล้อมต่อการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดกับวัสดุที่เติมสีและไม่ได้เติมสี รวมทั้งผลของระยะเวลาต่อสีของวัสดุดังกล่าวด้วย<sup>44</sup> โดยทำการทดสอบความทึบแสง ( Optical density ) ด้วยเครื่อง Optical Densitometer และวัดการเปลี่ยนแปลงของสีโดยใช้ผลของเวลาที่ผ่านไป และผลของการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกต่อเนื่องกันนาน 6 เดือน มีผลต่อชั้นทดสอบที่ได้รับการแต่งสีด้วยวัสดุต่าง ๆ และชั้นทดสอบที่ไม่ได้รับการเติมแต่งสี

จะเห็นได้ว่ามีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่ออายุการใช้งานของอวัยวะเทียมตั้งแต่วัสดุที่ใช้ทำอวัยวะเทียม , สีแวดล้อม, กาลเวลา, รวมไปถึงจนถึงสารที่เติมลงไปเพื่อความสวยงาม ในอดีตที่ผ่านมา มีผู้ทำการทดลองเรื่องสีที่นำไปผสมซึ่งได้แก่ สีน้ำมัน เม็ดสีที่ได้จากธรรมชาติ หรือสีที่ได้จากเครื่องสำอางเหลว แต่มีรายงานน้อยมากที่รายงานถึงผลของการเติมสารทึบแสงสีขาว ซึ่งเป็นสีที่มีความจำเป็นอย่างยิ่ง ที่จะต้องผสมในวัสดุทำอวัยวะเทียมเสมอ เพื่อให้เกิดจากลักษณะความทึบแสงเหมือนผิวหนังมนุษย์ โดยจะต้องทำการผสมสารทึบแสงนี้ก่อนที่จะผสมสีอื่น ๆ เสมอโดยจะต้องผสมสารทึบแสงนี้ในปริมาณที่มากพอสมควร เพื่อให้เหมาะกับผิวหนังผู้ป่วย ในการทดลองนี้ จะได้ทำการศึกษาผลของสารทึบแสง 4 ชนิด ที่ใช้ผสมลงในอวัยวะเทียม เพื่อให้ได้ความทึบแสงเท่ากับค่าเฉลี่ยของค่าความสว่าง - มีด (  $L^*$  ) ในคนไทยจำนวน 49 คน โดยจะรายงานถึงผลของการเติมสารทึบแสงสีขาวชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพของชั้นทดสอบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### ประชากร

ในการศึกษานี้จะทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของโพลีไคเมธิลไซลอคเซนที่ใช้ทำอวัยวะเทียม โดยเลือกใช้วัสดุโพลีไคเมธิลไซลอคเซน A-2186 ทำเป็นชิ้นทดสอบ โดยแบ่งกลุ่มทดลองเป็น 5 กลุ่ม มีชิ้นทดสอบซึ่งใช้ในการทดสอบกำลังแรงดึง , อัตราส่วนการยืดตัว กลุ่มละ 15 ชิ้น ชิ้นทดสอบซึ่งใช้ในการทดสอบกำลังแรงฉีกและ ความแข็งแรง กลุ่มละ 10 ชิ้น แบ่งเป็นกลุ่มทดลอง 5 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มควบคุม 1 กลุ่ม และกลุ่มทดลอง 4 กลุ่ม ที่ได้รับการเสริมด้วยวัสดุแต่งสี คือสารทึบแสงทั้ง 4 ชนิด แล้ววัดค่าตัวแปรที่ต้องการทดสอบ 4 ตัวคือ ค่าความแข็งแรง, กำลังแรงฉีก, กำลังแรงดึงและอัตราส่วนการยืดตัว , โดยได้ข้อมูลจากการวัดในระดับ ratio scale

#### ระเบียบวิธีวิจัย

##### วัสดุและวิธีการทดสอบ

#### ขั้นตอนการวัดสีผิวเพื่อหาค่าเฉลี่ย

ทำการวัดค่าความสว่างมืดของผิวหนังคนไทยโดยเฉลี่ย ที่ได้จากการวัดจากผิวหนังบริเวณท้องแขนในอาสาสมัครคนไทย จำนวน 49 คน โดยใช้เครื่องเทียบสีอัลตราสแกน เอกซ์ อี ( UltraScan XE ,Hunter Associates Laboratory, Inc, Virginia) ทำการวัดที่บริเวณท้องแขนเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีเม็ดสีเมลานินน้อย ทำให้มีค่าความสว่าง - มืด ที่ใกล้เคียงกันในหมู่ประชากรมากที่สุด โดยทำการวัด 3 บริเวณ ตำแหน่งที่ 1 เริ่มวัดบริเวณที่ห่างจากข้อมือเป็นระยะประมาณ 2 นิ้ว ตำแหน่งที่ 2 และ 3 ห่างออกไปจากตำแหน่งเดิม ตำแหน่งละ 1 นิ้วตามลำดับ ดังรูปที่ 3 โดยพยายามหลีกเลี่ยงบริเวณที่มีไฝฝ้า หรือแผลเป็น ซึ่งได้ค่าความสว่าง-มืด (  $L^*$  ) อยู่ในช่วงระหว่าง 55.17 ถึง 70.13 และมีค่าเฉลี่ย ความสว่าง-มืด เท่ากับ 63.83 ดังรายละเอียดในภาคผนวก





รูปที่ 3 แสดงการวัดสีผิวบริเวณท้องแขน

### ขั้นตอนการผสมสารแต่งสีเพื่อหาอัตราส่วนผสม

นำโพลีโดเมธิลไซลออกเซน A-2186 ( Factor II, Inc, Lakeside , Arizona ) มาผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ในอัตราส่วน 10 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักระบบดิจิตอล หลังจากนั้นจึงแบ่งวัสดุมาผสมเข้ากับสารทึบแสงทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ สารทึบแสงสีขาวของ Factor II ( Factor II Intrinsic coloration), ดินขาว จอร์เจีย ( Georgia kaolin ), ผงสังกะสีออกไซด์ ( zinc oxide ) และผงไททาเนียม ออกไซด์ ( Titanium oxide ) ดังแสดงในรูปที่ 4 ตามลำดับจุดบันทึกอัตราส่วนผสมสารแต่ละชนิดตามน้ำหนัก และทำการสุ่มตักตัวอย่างจากกระดาดผสมเพื่อทดสอบค่าความสว่าง-มืด ( $L^*$ ) โดยใช้เครื่องเทียบสีเป็นระยะๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 เพื่อให้มีค่าความสว่าง-มืด ( $L^*$ ) เท่ากับค่าเฉลี่ย ในการสุ่มแต่ละครั้งจะตักวัสดุปริมาณ 4.5 กรัมเท่าๆกัน ใส่ลงในถ้วยกลมใส ไม่มีสี ดังแสดงในรูปที่ 6 เมื่อได้ค่าความสว่าง-มืด ( $L^*$ ) เท่ากับ  $63.83 \pm 1$  ที่ต้องการแล้ว จึงนำมาคำนวณหาอัตราส่วนในการผสมสารแต่ละชนิดเข้ากับโพลีโดเมธิลไซลออกเซน A-2186 ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่4 สารแต่งสีทั้ง 4 ชนิดที่ใช้ทดสอบ รูปที่5 แสดงการวัดสีวัสดุด้วยเครื่อง อัลตรา สแกน เอกซ์ อี



รูปที่ 6 แสดงการชั่งน้ำหนักสารที่จะนำไปวัดสี ด้วยเครื่องชั่งระบบดิจิทัล

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณสารแต่งสีแต่ละชนิดที่ต้องใช้ เพื่อให้มีค่าความสว่าง-มืด เท่ากับ  $63.83 \pm 1$

ชนิดของสาร	ปริมาณวัสดุ A-2186 (กรัม)	ปริมาณสารทึบแสง (กรัม)
สารทึบแสงสีขาวของ Factor II	100 ( $\pm 0.05$ )	0.454
ดินขาว	100 ( $\pm 0.05$ )	0.977
ผงสังกะสีออกไซด์	100 ( $\pm 0.05$ )	0.374
ผงไททาเนียม ออกไซด์	100 ( $\pm 0.05$ )	0.310

ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดของผลิตภัณฑ์

ชนิดของผลิตภัณฑ์	ผู้ผลิต
โพลีไดเมทิลซิลอกเซน A-2186	Factor II Inc, Lakeside , Ariz
สารทึบแสงสีขาวของ Factor II	Factor II Inc, Lakeside , Ariz
ดินขาว จอร์เจีย	Factor II Inc, Lakeside , Ariz
ผงสังกะสีออกไซด์ (BP)	องค์การเภสัชกรรม, กรุงเทพฯ
ผงไททาเนียม ออกไซด์ (USP)	Merk ,Inc Germany

### ขั้นตอนการสร้างขึ้นทดสอบ

ในการสร้างขึ้นทดสอบนำวัสดุ A-2186 มาผสมกับ Catalyst ในอัตราส่วน 10 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก ใช้วัสดุ 85 กรัม ผสมเข้ากับตัวเร่งปฏิกิริยา 8.5 กรัม แล้วนำผงสารทึบแสงสีขาวมาเติมตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ ในขั้นตอนการผสมต้องพยายามหลีกเลี่ยงการทำให้เกิดฟองอากาศให้มาก อย่างไรก็ตามฟองอากาศเป็นจำนวนมากต้องถูกกำจัด โดยการแบ่งวัสดุทั้งหมดออกเป็น 5 ส่วน นำไปใส่ลงในกล่องทรงกลม ที่ผลิตจาก โพลีโพรพิลีน (Polypropylene) ซึ่งไม่เกิดปฏิกิริยากับวัสดุ โพลีดีเมทิลไซลอคเซน A-2186 ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต

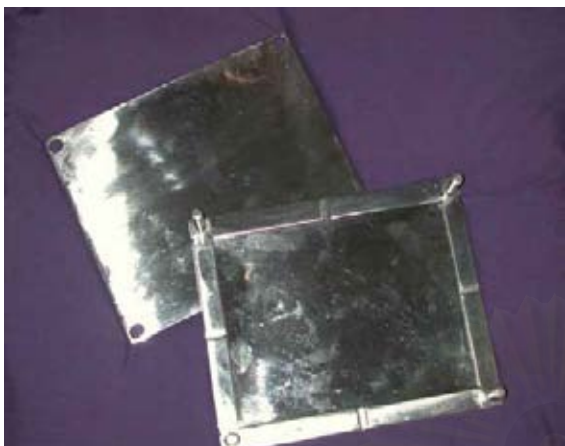


รูปที่ 7 แสดงการต่อภาชนะเข้ากับเครื่องดูดสุญญากาศ



รูปที่ 8 แสดงมิเตอร์สุญญากาศ

นำกล่องที่บรรจุวัสดุต่อเข้ากับท่อของเครื่องดูดสุญญากาศที่ประดิษฐ์ขึ้น ( รูปที่ 7 และ 8 ) โดยให้ความดันในกล่อง เท่ากับ 50 เซนติเมตรปรอททำการดูดอากาศกล่องละ 4 ครั้ง นานครั้งละ 1 นาที แล้วนำวัสดุที่ได้เติมสารทึบแสงและผ่านเครื่องดูดสุญญากาศแล้ว เทลงในแม่แบบหล่อเหล็กไร้สนิม ( Stainless steel flask ) ขนาด 17x13 เซนติเมตร หนา 3 มิลลิเมตร (รูปที่ 9) โดยปาดวัสดุที่ละชั้นบางๆ โดยใช้พายผสมเหล็กไร้สนิมให้เรียบบนเครื่องสั่น ( Vibrator ) เพื่อช่วยไล่ฟองอากาศ ในขณะที่ปาดต้องพยายามหลีกเลี่ยงการก่อให้เกิดฟองอากาศมากที่สุด (รูปที่ 10) หากยังคงมีฟองอากาศหลงเหลืออยู่ ใช้เข็มปลายแหลมเพื่อกำจัดฟองอากาศให้มากที่สุด



รูปที่ 9 แสดงภาพแม่แบบหล่อเหล็กไร้สนิมขนาด

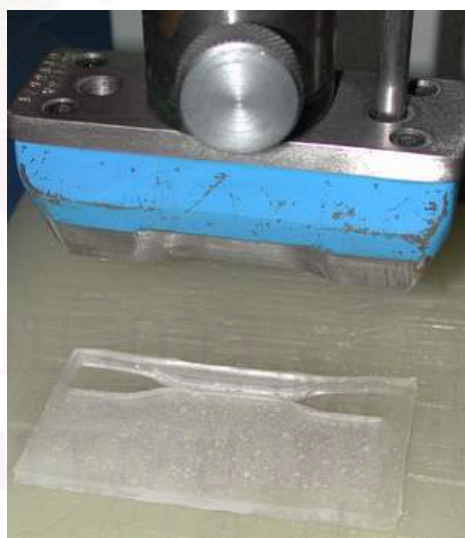


รูปที่ 10 แสดงวิธีการปาดวัสดุบนเครื่องสั้น

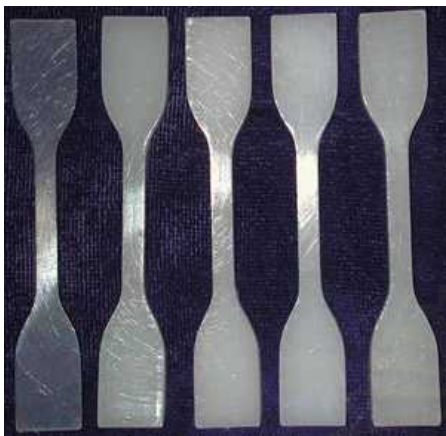
หลังจากวัสดุก่อตัวสมบูรณ์ จึงนำแผ่นโพลีไธเมทิลไซลออกเซน ที่ได้กลุ่มละ 1 แผ่นไปตัดด้วยหัวตัดขึ้นทดสอบโลหะ ( Die cutter) โดยพยายามหลีกเลี่ยงบริเวณที่มีฟองอากาศตกค้าง ( รูปที่ 11a,11b ) เพื่อให้ได้ชิ้นทดสอบรูปดัมเบล ( Dumbbell specimens)ที่ปราศจากฟองอากาศ และนำมาทดสอบหาค่ากำลังแรงดึง ( Tensile strength ) และค่าอัตราส่วนในการยืดตัว ( Percent of Elongation ) ตามมาตรฐาน ISO 37<sup>45</sup> ( รูปที่ 12a,12b ) จำนวนกลุ่มละ 15 ชิ้น



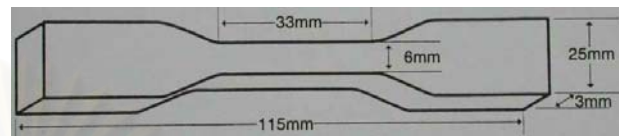
รูปที่ 11a แสดงหัวตัดขึ้นทดสอบโลหะ ISO 37 แบบที่ 2



รูปที่ 11b แสดงภาพขณะตัด



รูปที่ 12a ชิ้นทดสอบในแต่ละกลุ่ม



ISO 37 แบบที่ 2

รูปที่ 12b ชิ้นทดสอบกำลังแรงดึงตามมาตรฐานISO 37

การเตรียมชิ้นทดสอบกำลังแรงฉีก ทำได้โดยการเตรียมวัสดุด้วยวิธีการเดียวกับการทดสอบค่ากำลังแรงดึง แต่นำมาตัดด้วยหัวตัดโลหะ เพื่อให้ได้ชิ้นทดสอบชนิดหักมุม ( Angle test pieces) ตามมาตรฐาน ASTM D624<sup>47</sup> (รูปที่ 13a, 13b) จำนวนกลุ่มละ 10 ชิ้น



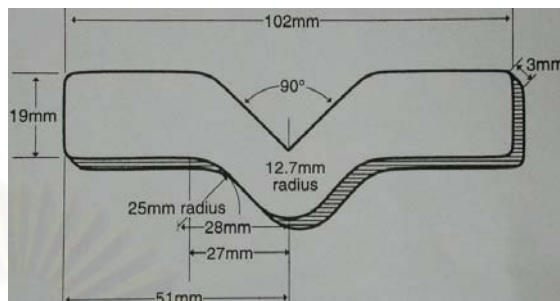
รูปที่ 13a แสดงเครื่องตัดชิ้นทดสอบ



รูปที่ 13b แสดงหัวตัดชิ้นทดสอบรูปหักมุม ASTM D624



รูปที่ 14a แสดงภาพชิ้นทดสอบกำลังแรงฉีก



รูปที่ 14b ชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D624

### ขั้นตอนการทดสอบ

เมื่อได้ชิ้นทดสอบรูปดัมเบล และชิ้นทดสอบรูปหักมุมแล้ว นำเอาชิ้นทดสอบไปเก็บในกล่องพลาสติกใส แยกตามกลุ่มทดสอบ ไม่ให้สัมผัสความชื้น ตั้งภาชนะทิ้งไว้ในห้องที่มีอุณหภูมิ  $25 \pm 5$  องศาเซลเซียส นาน 2 สัปดาห์ก่อนจะนำมาทดสอบตามที่มาตรฐานกำหนด หลังจากนั้นจึงนำชิ้นทดสอบรูปหักมุมไปทำการวัดค่าความแข็งผิว เสร็จแล้วจึงนำไปทดสอบหาค่ากำลังแรงฉีก ส่วนชิ้นทดสอบรูปดัมเบลให้นำไปวัดค่ากำลังแรงดึง และอัตราส่วนการยืดตัว

### การวัดค่าความแข็งผิว

ทำการวัดโดยใช้เครื่องวัดความแข็งผิว ( Shore Durometer :Type A , Pacific transducer Corp. Los Angeles , CA. ) ตามมาตรฐาน ASTM 2240<sup>47</sup> โดยทำการวัดความแข็งผิวโดยอาศัยชิ้นทดสอบหักมุม (Angle test pieces ) ก่อนที่จะนำไปทดสอบกำลังแรงฉีก ตามวิธีของ Andres และคณะในปี 1999<sup>42,43</sup> โดยอาศัยชิ้นทดสอบ 3 ชิ้น วางซ้อนกัน เพื่อให้ได้ความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร โดยการจัดขึ้นอย่างสุ่ม และวางลงบนฐานเครื่องวัดความแข็งผิว แล้วเคลื่อนฐานขึ้นไปหาหัวกด Shore A ( รูปที่ 15 ) ให้เท้าของเครื่องกดอย่างรวดเร็วให้สัมผัสภายใน 1 วินาที อ่านค่าความแข็งผิว แล้วเคลื่อนไปยังจุดต่อไป โดยแต่ละชิ้นทดสอบ จะทำการวัด 5 จุด แต่ละจุดห่างกัน 12 มิลลิเมตร และห่างจากขอบ 6 มิลลิเมตร หลังจากนั้นจึงดึงชิ้นทดสอบที่อยู่ล่างสุดออก แล้ววางชิ้นใหม่ขึ้นวัด เวียนกันจนครบทั้ง 10 ชิ้น ทำให้ได้ค่าความแข็งผิวเฉลี่ยของชิ้นทดสอบแต่ละชิ้น แล้วจึงนำมาหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มสารทึบแสงแต่ละกลุ่ม



รูปที่ 15 การทดสอบความแข็งผิว



รูปที่ 16 แสดงตุ่มกดบนแป้นเครื่องวัดความแข็งผิว

### การวัดค่ากำลังแรงฉีก

นำชิ้นทดสอบรูปหอกมุมที่ได้ผ่านการวัดความแข็งผิว มาทดสอบกำลังแรงฉีกตามมาตรฐาน ASTM D624 ด้วยเครื่องทดสอบลอยด์ ยูนิเวอร์ซัล (Lloyd Universal Testing machine) รุ่น LR 10K โดยการนำชิ้นทดสอบมาใส่ในหัวจับขึ้นทดสอบแบบหนีบ ในตำแหน่งที่ได้ทำเครื่องหมายไว้ เพื่อให้จับขึ้นทดสอบได้ระยะเท่าๆกันทุกครั้ง โดยมีระยะห่างระหว่างปลายหัวจับขึ้นทดสอบ 65 มิลลิเมตร ในการทดสอบใช้ load cell ขนาด 100 นิวตัน เคลื่อนหัวจับขึ้นทดสอบด้วยความเร็ว 500 เซนติเมตรต่อนาที ตั้งเครื่องให้ระบุค่ากำลังแรงฉีกสูงสุด ค่ากำลังแรงฉีกขณะขาด โดยค่ากำลังแรงฉีกจะคำนวณได้จากสูตร

$$T = F/D$$

เมื่อ T คือ กำลังแรงฉีก

F คือ แรงที่ใช้ในการฉีก

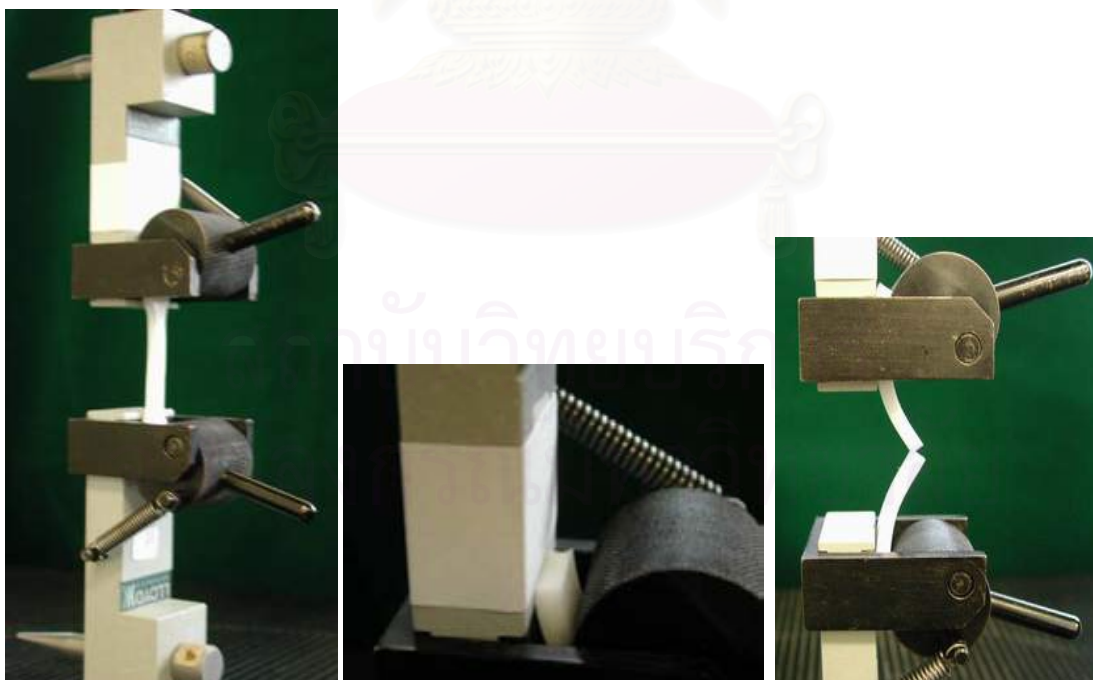
D คือ ความหนาของวัสดุ

### การวัดกำลังแรงดึง และอัตราส่วนการยืดตัว

นำชิ้นทดสอบรูปดัมเบลมาทดสอบกำลังแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบลอยด์ ยูนิเวอร์ซัล (Lloyd Universal Testing machine Lloyd Instrument Ltd., Fareham, Hants.) รุ่น LR 10K โดยการนำชิ้นทดสอบมาใส่ในหัวจับขึ้นทดสอบแบบหนีบ ในตำแหน่งที่ได้ทำเครื่องหมายไว้ ( รูปที่ 17 ) เพื่อให้จับขึ้นทดสอบได้ระยะเท่าๆกันทุกครั้ง โดยมีระยะห่างระหว่างปลายหัวจับขึ้นทดสอบ 35 มิลลิเมตร ในการทดสอบใช้ load cell ขนาด 100 นิวตัน เคลื่อนหัวจับขึ้นทดสอบด้วยความเร็ว 500 เซนติเมตรต่ออนาที ตั้งเครื่องให้ระบุค่ากำลังแรงดึงสูงสุด ค่ากำลังแรงดึงขณะขาด อัตราส่วนการยืดตัวเมื่อทำการดึงขึ้นทดสอบจนขาดแล้วหัวจับขึ้นทดสอบจะเคลื่อนเข้าสู่ตำแหน่งเดิมที่ได้ตั้งค่าไว้ ทำให้ระยะการจับขึ้นทดสอบคงเดิมทุกครั้ง สำหรับค่าอัตราส่วนในการยืดตัวสามารถคำนวณจากสูตร

$$\% \text{Elongation} = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$$

ในที่นี้  $L_0$  จะคงที่ = 35 mm ส่วน  $L$  คือระยะที่วัสดุยืดตัวได้มากที่สุดก่อนขาด



รูปที่ 17 แสดงการจับขึ้นทดสอบกำลังแรงดึงให้ตรงกับตำแหน่งที่ทำไว้บนหัวจับขึ้นทดสอบ



## เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องเทียบสีอัลตราสแกน เอกซ์ ซี (UltraScan XE ,Hunter Associates Laboratory, Inc, Virginia)

เครื่องเทียบสีอัลตราสแกน เอกซ์ ซี เป็นเครื่องมือวัดสีที่เชื่อมโยงเข้ากับโปรแกรม Universal ของไมโครซอฟท์ ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดแสง ชนิด ซีโนนอน ( Pulsed Xenon) และมีความสามารถในการวัดสีของสารที่เป็นของแข็งและของเหลว ผ่านทางรูรับแสงที่สามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสม 2 ขนาดคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ( 25 มิลลิเมตร ) และ 3/8 นิ้ว ( 9.5 มิลลิเมตร ) สามารถวัดสีโดยมีความสามารถในการวัดซ้ำได้ โดยมีความคาดเคลื่อนของ  $\Delta E^*$  เพียง 0.5 ( reproducibility )



รูปที่ 18 เครื่องวัดสีอัลตราสแกน เอกซ์ ซี

2. เครื่องทดสอบ ลอยด์ ยูนิเวอร์ซัล (Lloyd Universal Testing machine รุ่น LR 10K , Lloyd Instrument Ltd., Fareham, Hants.)

เครื่องทดสอบลอยด์ ยูนิเวอร์ซัล เป็นเครื่องมือวัดคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ สามารถในการวัดแรงดึงและแรงกดในช่วง 0.25 นิวตันไปจนถึง 10 กิโลนิวตัน โดยมีตุ้มน้ำหนักหลายขนาดที่สามารถสลับสับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมกับการทดสอบวัสดุแต่ละชนิด โดยมีกลไกการวัดที่ได้มาตรฐาน

ASTM E4 ,BS 1610 1985 Grade 1 และ DIN 51221 ที่มีความคลาดเคลื่อนของการวัดน้อยกว่า ร้อยละ 1 หัวจับขึ้นทดสอบสามารถปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ตั้งแต่ 0.1 ไปจนถึง 500 มิลลิเมตร ต่อนาที มีเครื่องวัดการยืดภายใน ( Internal extensometer ) ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของการวัดน้อยกว่า ร้อยละ 0.5 แต่ก็สามารถต่อเข้ากับเครื่องวัดการยืดภายนอกได้ ( External Extensometer ) ตามความเหมาะสมในการทำงาน



รูปที่ 19 เครื่องทดสอบ ลอยด์ ยูนิเวอร์ซัลรุ่น LR 10K

3. เครื่องวัดความแข็งผิว ( Shore Durometer :Type A, Pacific transducer Corp. Los angeles , CA. )

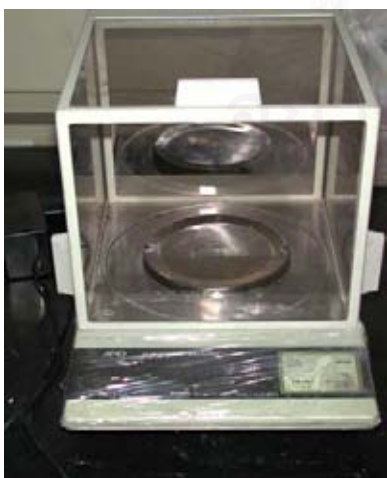
เครื่องวัดความแข็งผิว ชนิด A ใช้วัดความแข็งผิวของยาง และวัสดุที่มีลักษณะคล้ายยาง เช่น อีลาสโตเมอร์ ซิลิโคน และยังสามารถใช้ในวัสดุพอลิพลาสติกนิ่ม หนังสัตว์ เป็นต้น ประกอบด้วยแท่นวางวัสดุพร้อมขาตั้ง รุ่น 471 และ หัวทดสอบความแข็งผิว รุ่น 408 ( Ser 04624 ) ซึ่งมีตุ้มกดรูปโคน ( Conical ) อยู่บนฐานของแป้นกดขนาดกว้าง 1 นิ้ว ยาว 1 นิ้ว สามารถวัดความแข็งผิวได้ตามมาตรฐาน ASTM 2240 ตั้งแต่ 0 ถึง 100 หน่วยโดยมีความคลาดเคลื่อน  $\pm 1$  หน่วย



รูปที่ 20a เครื่องวัดความแข็งผิวประกอบด้วยขาตั้งรุ่น 471      รูปที่ 20b หัวทดสอบรุ่น 408

4. เครื่องชั่งน้ำหนักระบบดิจิทัล ( A&D Co. Ltd. , Japan รุ่น FA-200 Ser.50329540 )

เครื่องชั่งดังกล่าวสามารถวัดน้ำหนักได้ไม่เกิน 210 กรัม มีความละเอียดในการวัดสูงมาก โดยวัดน้ำหนักเบาที่สุดได้ 0.001 กรัม และมีความคลาดเคลื่อนเพียงแค่ 0.001 กรัม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของจานวัด 105 มิลลิเมตร หรือ 4.1 นิ้ว ในขณะที่วัดควรรอให้ตัวเลข จากการวัดหยุดนิ่งโดยใช้เวลาประมาณ 2.5 วินาทีก่อนจึงทำการอ่านค่าน้ำหนัก



รูปที่ 21 แสดงเครื่องชั่งระบบดิจิทัล

### การเก็บรวบรวมข้อมูล

รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการวัด ในลักษณะค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของค่ากำลังแรงดึงสูงสุด ( Maximum tensile strength ) , อัตราส่วนการยืดตัว ( Percent of elongation ) , ค่ากำลังแรงฉีกสูงสุด ( Maximum tear strength ) และ ความแข็งผิว ( Shore A surface hardness ) โดยนำเสนอในรูปแบบตารางและแผนภูมิรูปแท่ง

### การวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากการวัด ในลักษณะที่มีกลุ่มตัวแปรอิสระมากกว่าสองกลุ่ม ซึ่งเป็นอิสระต่อกันด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว ( One - way Analysis of Variance :ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และทำการเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยแบบทดสอบของดันแคน (Duncan 's New Multiple Range test ) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS ( SPSS for windows version 10.5 )

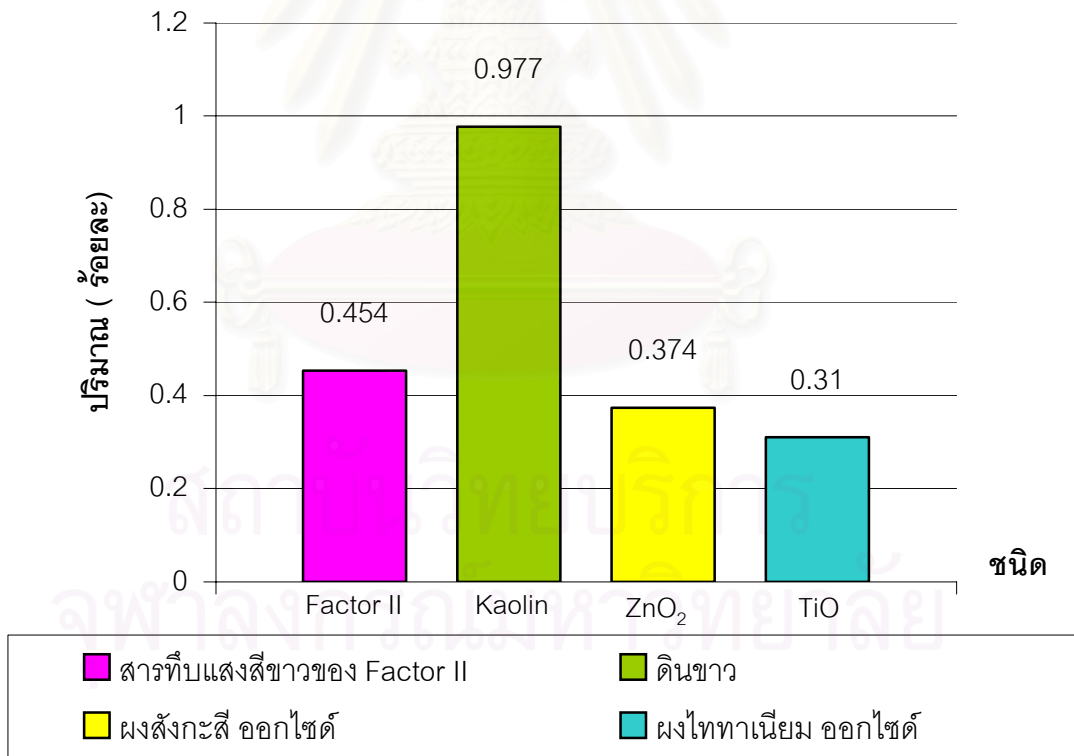
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

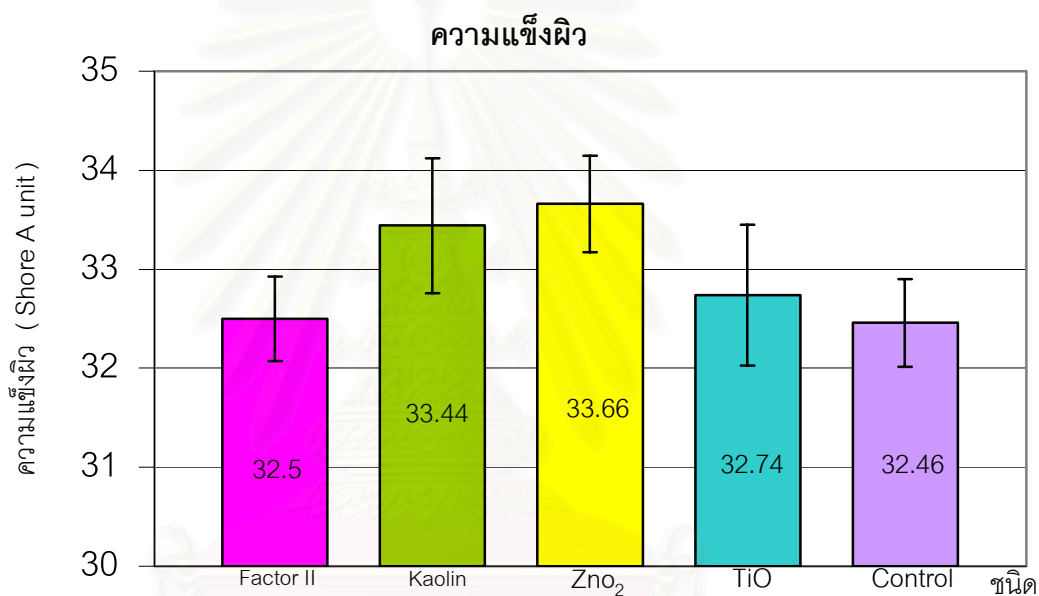
#### ผลการทดลอง

ผลการวัดสีผิวของกลุ่มอาสาสมัครคนไทยจำนวน 49 คน ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของความสว่าง-มืด 63.83 และได้ใช้ค่าเฉลี่ยดังกล่าวเป็นค่าพื้นฐานในการผสมสารแต่งสีขาวทั้ง 4 ชนิด ให้มีความสว่าง-มืด  $63.83 \pm 0.5$  พบว่าจะต้องเติมสารในอัตราส่วนโดยน้ำหนักไม่เท่ากัน คือ จะต้องเติมดินขาวเป็นปริมาณมากที่สุดร้อยละ 0.977 รองลงมาได้แก่สารทึบแสงสีขาวของ Factor II ร้อยละ 0.454 สังกะสี ออกไซด์ ร้อยละ 0.374 และไททาเนียม ออกไซด์ ร้อยละ 0.31 ตามลำดับ ดังกราฟที่ 1 ดังนั้นการเลือกใช้สารแต่งสีแต่ละชนิดจะก่อให้เกิดปริมาณสารแขวนลอยในเนื้อวัสดุไม่เท่ากัน



กราฟที่ 1 แสดงปริมาณสารทึบแสงสีขาวที่ใช้ในการทำให้วัสดุมีความมืด-สว่างเป็น  $63.83 \pm 0.5$

ผลการวัดค่าความแข็งผิวของของกลุ่มทดสอบมีค่าดังแสดงในกราฟที่ 2 เมื่อทำการทดสอบทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างกันในระหว่างกลุ่มทดสอบดังแสดงในตารางที่ 5 เมื่อทำการทดสอบต่อโดยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยแบบทดสอบของด้นแคน พบว่ากลุ่มควบคุมมีความแข็งผิวต่ำที่สุด ไม่แตกต่างจากกลุ่มทดสอบที่ได้รับการเติมสารที่บแสงสีขาวของ Factor II และไททาเนียม ออกไซด์ ส่วนกลุ่มทดสอบที่ได้รับการเติม สังกะสี ออกไซด์ และดินขาวมีค่าความแข็งผิวไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่มีค่าสูงกว่ากลุ่มแรกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 6 และ 7



■ สารที่บแสงสีขาว FactorII   ■ ดินขาว   ■ สังกะสี ออกไซด์   ■ ไททาเนียม ออกไซด์   ■ กลุ่มควบคุม

กราฟที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยความแข็งผิว ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของค่าความแข็งผิว

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	12.304	4	3.076	9.710	.000
Within Groups	14.256	45	.317		
Total	26.560	49			

ตารางที่ 6 แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนของค่าความแข็งแรงด้วยแบบทดสอบของดินแดน

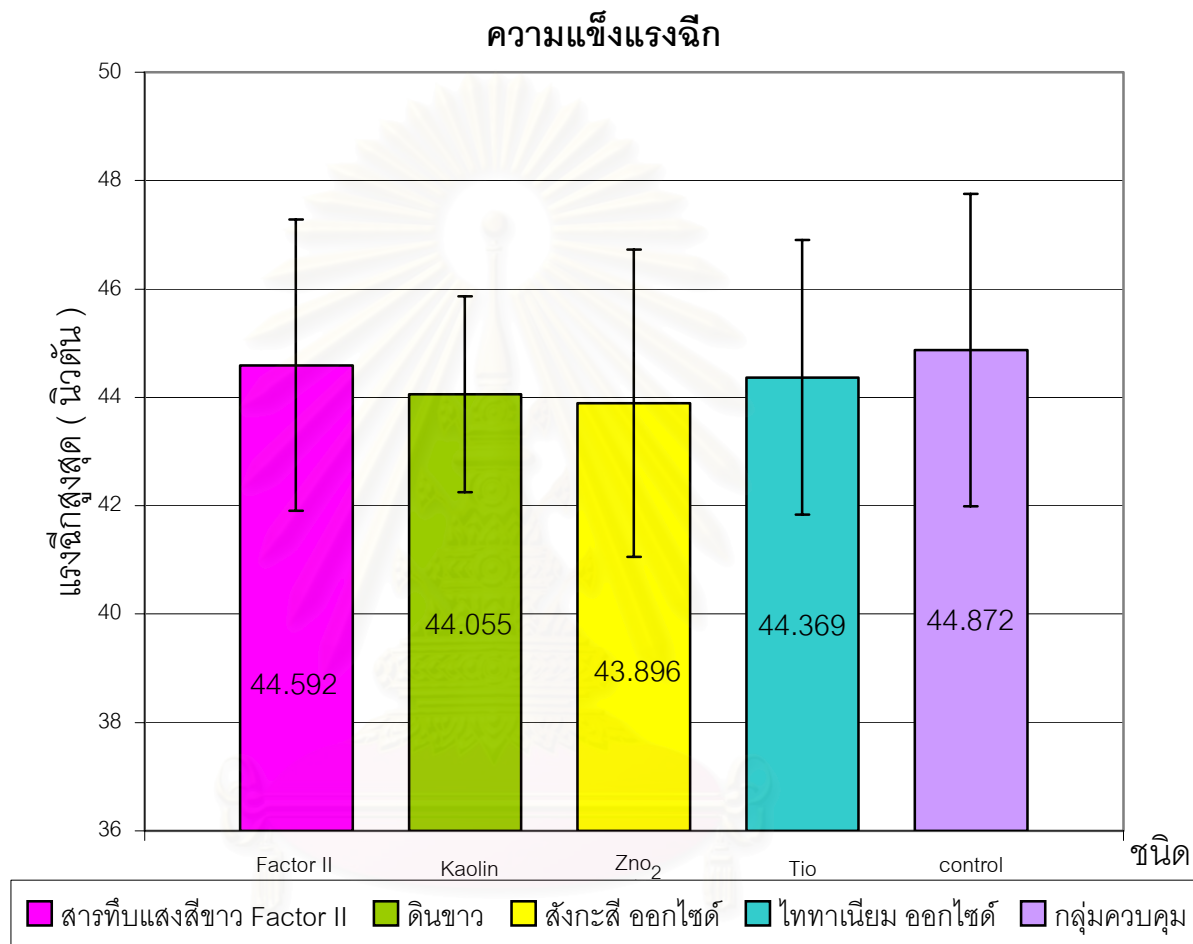
ชนิด	N	Subset for alpha = .05	
		1	2
กลุ่มควบคุม	10	32.460	
สารทึบแสง Factor II	10	32.500	
ไททาเนียม ออกไซด์	10	32.740	
ดินขาว	10		33.440
สังกะสีออกไซด์	10		33.660
Sig.		.301	.387

ตารางที่ 7 แสดงค่าเฉลี่ยความแข็งแรง และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เส้นประแสดงว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มทดสอบไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ชนิด	กลุ่มควบคุม	สารทึบแสง Factor II	ไททาเนียม ออกไซด์	ดินขาว จอร์เจีย	สังกะสี ออกไซด์
ค่าเฉลี่ย	32.46	32.5	32.74	33.44	33.66
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.44	0.42	0.71	0.68	0.49
ความแตกต่าง ของค่าเฉลี่ย	-----	-----	-----	-----	-----

ในการทดสอบความแข็งแรงฉีกพบว่ามีค่าความแข็งแรงฉีกดังแสดงในกราฟที่ 3 และเมื่อทำการทดสอบทางสถิติพบว่าไม่มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในระหว่างกลุ่มทดสอบ (  $P > 0.05$  ) ดังแสดงในตารางที่ 8 และ 9



กราฟที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ยความแข็งแรงฉีก และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 8 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของค่าความแข็งแรงฉีก

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	6.243	4	1.561	.235	.917
Within Groups	299.365	45	6.653		
Total	305.608	49			



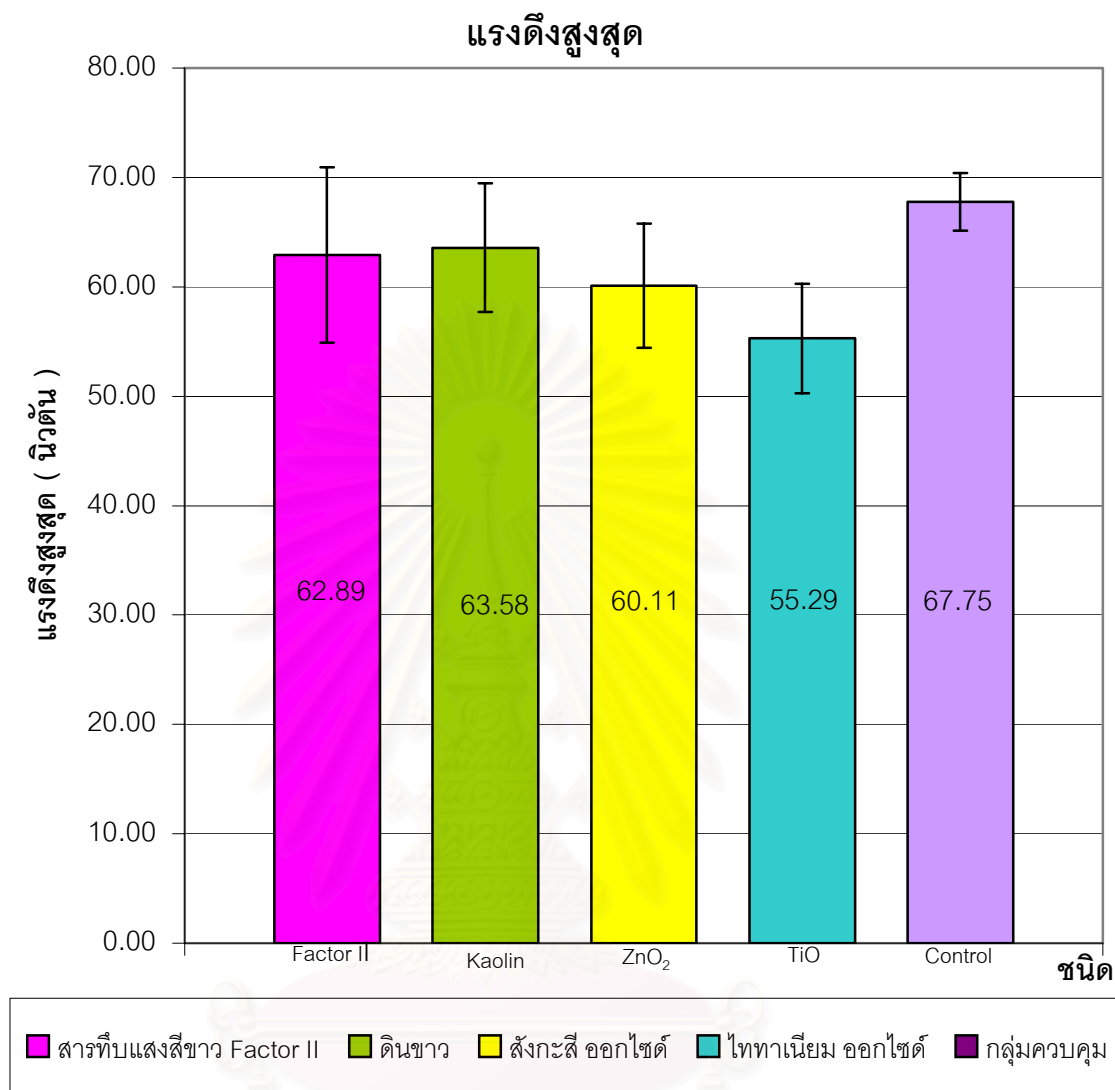
ตารางที่ 9 แสดงค่าเฉลี่ยความแข็งแรงจึก และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เส้นประแสดงว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มทดสอบไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ชนิด	สังกะสี ออกไซด์	ดินขาว จอร์เจีย	ไททาเนียม ออกไซด์	สารทึบแสง Factor II	กลุ่มควบคุม
ค่าเฉลี่ย	43.90	44.06	44.37	44.59	44.87
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	2.83	1.81	2.53	2.69	2.88
ความแตกต่าง ของค่าเฉลี่ย	-----	-----	-----	-----	-----

ผลการทดสอบกำลังแรงดึงมีค่าดังแสดงในกราฟที่ 4 จากการทดสอบทางสถิติพบว่าค่ากำลังแรงดึงในแต่ละกลุ่มทดสอบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ดังรายละเอียดในตารางที่ 10 เมื่อทำการทดสอบโดยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยแบบทดสอบของดันแคน พบว่าค่ากำลังแรงดึงของกลุ่มควบคุมมีค่าสูงที่สุด แตกต่างจากกลุ่มทดสอบทั้ง 4 กลุ่ม ค่ากำลังแรงดึงของกลุ่มทดสอบที่ได้รับการเติมดินขาว สารทึบแสงสีขาวของ Factor II และ สังกะสีออกไซด์ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่มีความแตกต่างจากกลุ่มทดสอบที่ได้รับการเติมไททาเนียม ออกไซด์ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีค่ากำลังแรงดึงต่ำที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 11 และ 12

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



กราฟที่ 4 แสดงค่าเฉลี่ยกำลังแรงดึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 10 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของค่ากำลังแรงดึง

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1274.252	4	318.563	9.757	.000
Within Groups	2285.540	70	32.651		
Total	3559.792	74			

ตารางที่ 11 แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนค่ากำลังแรงดึงด้วยแบบทดสอบของดันทันแคน

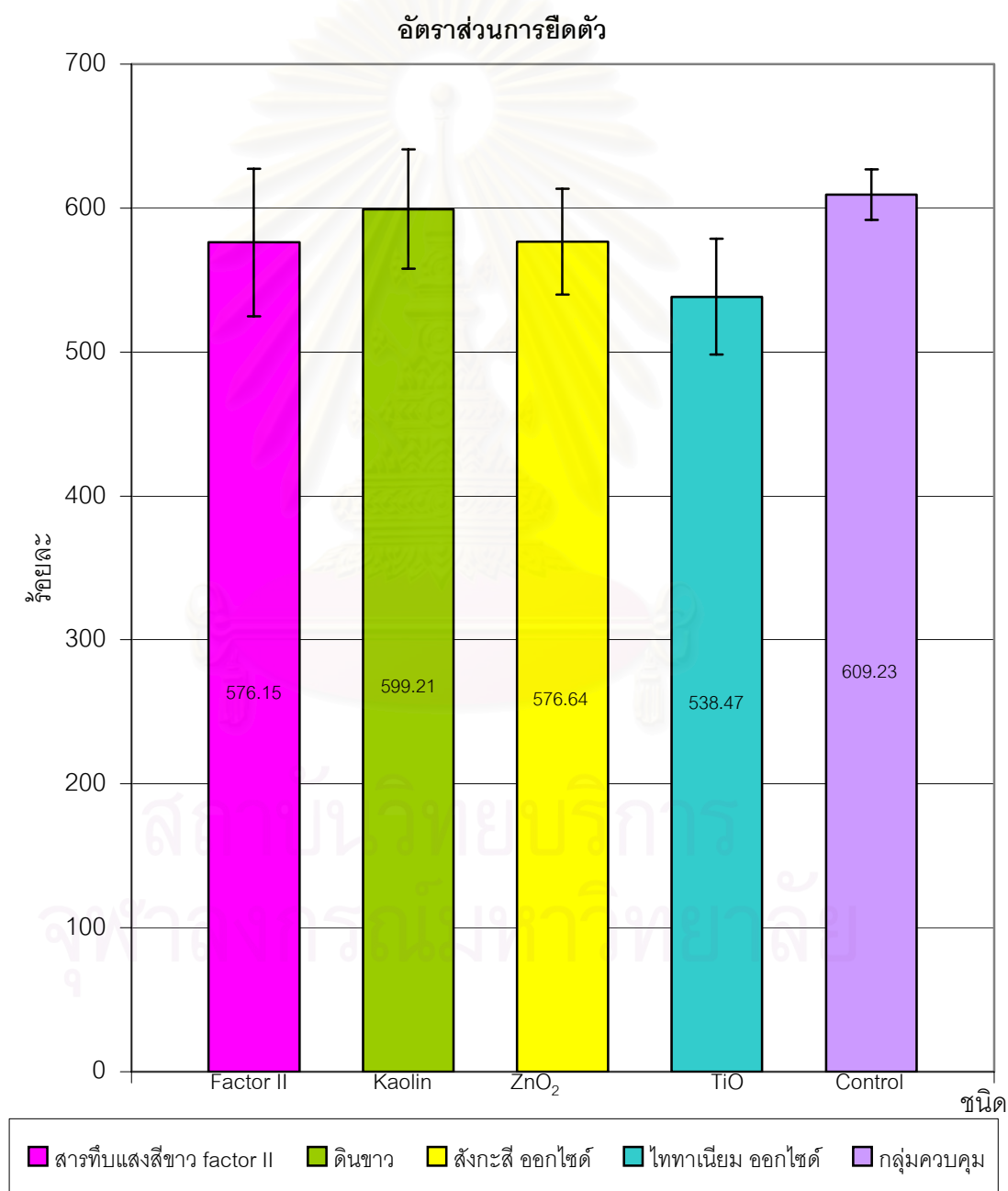
	N	Subset for alpha = .05		
ชนิด		1	2	3
ไททานเนียม ออกไซด์	15	55.2867		
สังกะสี ออกไซด์	15		60.1147	
สารทึบแสง Factor II	15		62.8860	
ดินขาว จอร์เจีย	15		63.5813	
กลุ่มควบคุม	15			67.7507
Sig.		1.000	.121	1.000

ตารางที่ 12 แสดงค่าเฉลี่ยกำลังแรงดึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน  
เส้นประแสดงว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มทดสอบไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ชนิด	ไททานเนียม ออกไซด์	สังกะสี ออกไซด์	สารทึบแสง Factor II	ดินขาว จอร์เจีย	กลุ่มควบคุม
ค่าเฉลี่ย	55.29	60.11	62.89	63.58	67.75
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	5.01	5.69	8.02	5.87	2.64
ความแตกต่าง ของค่าเฉลี่ย		-----	-----	-----	

จากการวัดอัตราส่วนการยึดตัวของกลุ่มทดสอบ พบว่ามีค่าอัตราส่วนการยึดตัวดัง  
แสดงในกราฟที่ 5 และเมื่อนำมาทดสอบทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างทางสถิติระหว่างกลุ่ม  
ทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 13 เมื่อทำการทดสอบโดยการเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยแบบทดสอบ  
ของดันทันแคน จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนการยึดตัวของกลุ่มควบคุมมีค่าสูงสุดต่างจากกลุ่มทดสอบ  
ทุกกลุ่มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติยกเว้นกลุ่มทดสอบที่ได้รับการเติมดินขาว ในขณะที่เดียวกันกลุ่ม

ทดสอบที่ได้รับการเติมดินขาว สารทึบแสงสีขาวของFactor II และผงสังกะสี ออกไซด์มีค่าอัตราส่วนการยึดตัวน้อยลงไปตามลำดับโดยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ส่วนกลุ่มทดสอบที่ได้รับการเติมผงไททาเนียม ออกไซด์ มีอัตราส่วนการยึดตัวต่ำที่สุดและแตกต่างจากกลุ่มอื่นๆอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงในตารางที่ 14 และ 15



กราฟที่ 5 แสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนความยึดตัว และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 13 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวของอัตราส่วนการยึดตัว

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	44617.398	4	11154.349	7.299	.000
Within Groups	106973.736	70	1528.196		
Total	151591.134	74			

ตารางที่ 14 แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนด้วยแบบทดสอบของดันแคนของอัตราส่วนการยึดตัว

	N	Subset for alpha = .05		
BRAND		1	2	3
ไททาเนียมออกไซด์	15	538.4762		
สารทึบแสง Factor II	15		576.1524	
สังกะสี ออกไซด์	15		576.6476	
ดินขาว	15		599.2190	599.2190
กลุ่มควบคุม	15			609.2381
Sig.		1.000	.132	.485

ตารางที่ 15 แสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนการยึดตัว และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เส้นประแสดงว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มทดสอบไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ชนิด	ไททาเนียม ออกไซด์	สารทึบแสง Factor II	สังกะสี ออกไซด์	ดินขาว จอร์เจีย	กลุ่มควบคุม
ค่าเฉลี่ย	538.48	576.15	576.65	599.22	609.24
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	40.32	51.24	36.78	41.54	17.66
ความแตกต่าง ของค่าเฉลี่ย		-----	-----	-----	-----

## บทที่ 5

### อภิปรายผล สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### อภิปรายผลการวิจัย

ในการวิจัยนี้ได้วัดสีผิวของอาสาสมัครคนไทยเพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการผสมสีอวัยวะเทียม โดยใช้เครื่องมือวัดสีอัลตราสแกน เอกซซี ที่มีความละเอียดและแม่นยำสูง ซึ่งได้รับความนิยมใช้ในงานวิจัยและในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิ โรงงานพลาสติก โรงงานกระเบื้อง โรงงานสี เป็นต้น จากการวัดสีดังกล่าวทำให้สามารถผสมสีในการทดลองได้อย่างแม่นยำ และมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการใช้สายตาในการเทียบสี ซึ่งอาจมีความแปรปรวนจากความล้าของสายตาหรืออิทธิพลของแสงภายนอกได้ ในขณะเดียวกันก็ทำให้ทราบค่าเฉลี่ยความสว่าง-มืดของสีผิวกลุ่มตัวอย่างอาสาสมัครคนไทยจำนวน 49 คน อยู่ในช่วงอายุ 18 - 60 ปี ที่มีภูมิลำเนาต่างๆกันทั่วประเทศ ซึ่งปัจจุบันอาศัยอยู่ในกรุงเทพมหานคร กลุ่มตัวอย่างดังกล่าวนี้ประกอบด้วยบุคคล ซึ่งมีสีผิวต่างกันได้แก่ ผิวขาวเหลือง ผิวเหลือง และ ผิวคล้ำ มีความคล้ายคลึงกับกลุ่มคนใช้ส่วนมากที่มาทำอวัยวะเทียม ซึ่งไม่พบว่ามีคนใช้คนไทยที่จะมีสีผิวดำสนิท หรือขาวมากเข้ามารับการทำอวัยวะเทียม

ดังที่ได้ทราบกันว่าการแต่งสีเบื้องต้นของอวัยวะเทียม ทำได้โดยการแต่งสีภายในเนื้อวัสดุ ก่อนที่วัสดุจะก่อตัวเป็นชิ้นอวัยวะเทียม การแต่งสีลักษณะนี้จะแต่งสีให้คล้ายกับบริเวณที่มีสีผิวอ่อนที่สุดในบริเวณที่จะใส่อวัยวะเทียม การวิจัยนี้จึงได้เลือกวัดสีผิวที่ท้องแขนซึ่งเป็นบริเวณที่มีเม็ดสีเมลานินน้อย รวมทั้งไม่ค่อยได้สัมผัสกับแสงแดดโดยตรง ทำให้ผิวบริเวณดังกล่าวเป็นสีผิวที่มีสีอ่อนที่สุดที่ทำการวัดได้สะดวก<sup>50</sup> จากการวัดทำให้ได้ค่าเฉลี่ยความสว่าง-มืด ( Mean L\* ) เป็น 63.89 ซึ่งใช้เป็นค่ากำหนดเบื้องต้นในการผสมสารทึบแสงสีขาวในการทดลอง สารทึบแสงสีขาวเป็นสีพื้นฐานที่มีความจำเป็นต้องผสมเข้าในเนื้อวัสดุก่อน ในการสร้างให้วัสดุโพลีโอดีเมธิลไซลอกเซน ซึ่งมีลักษณะใสกลายเป็นสีขุ่นที่บดแสงขึ้นคล้ายกับผิวหนัง ในขณะที่สีอื่นเช่นเหลือง แดง น้ำเงิน ม่วง เขียว เป็นต้นจะได้รับการแต่งเติมสีตามลงไป เพื่อให้มีสีใกล้เคียงกับสีพื้นฐานของผิวหนังบริเวณที่จะใส่อวัยวะเทียมมากที่สุด แล้วจึงตกแต่งด้วยการแต่งสีภายนอกให้เหมือนกับสีผิวแต่ละบุคคล และแต่ละบริเวณรอบๆอวัยวะเทียม การวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาสารทึบแสงสีขาว ซึ่งได้รับความนิยมใช้อย่างแพร่หลายคือ ดินขาวจอร์เจีย (Georgia kaolin) ซึ่งมีข้อดีที่มีสีขาวปนเหลือง คล้ายกับผิวหนัง แต่พบว่าต้องใช้ดินขาวมากกว่าวัสดุชนิดอื่นถึง 2 เท่า จึงจะให้ค่าความสว่าง - มืด เท่ากับค่าเฉลี่ย ในขณะที่สารทึบแสงสีขาวของ Factor II มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว เมื่อนำมาผสมเป็นปริมาณไม่มาก สามารถทำให้มีค่า

ความสว่าง-มืด เท่าที่ต้องการ นอกจากนั้นสีที่เป็นของเหลวจะผสมให้เข้ากับโพลีไดเมธิลไซลอกเซนที่มีลักษณะเหนียวหนืดได้ง่ายกว่าสีที่เป็นผง สารทึบแสงสีขาวอีก 2 ชนิดที่นำมาทดสอบได้แก่ ไททาเนียม ออกไซด์ และ สังกะสี ออกไซด์ สารทั้งสองชนิดนี้มีลักษณะเป็นผงสีขาว น้ำหนักเบาทำให้การผสมให้เข้ากับโพลีไดเมธิลไซลอกเซนทำได้ง่ายขึ้น สำหรับไททาเนียม ออกไซด์ นั้นเป็นองค์ประกอบในสารทึบแสงสีขาวหลายรูปแบบ เช่นสีน้ำมันสีขาว ที่มักใช้ในการแต่งสีอวัยวะเทียม แต่ในการทดลองนี้ได้เลือกใช้โพลีไดเมธิลไซลอกเซน A-2186 ซึ่งไม่ควรใช้กับสารทึบแสงสีขาวใดๆที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต จึงได้เลือกใช้ไททาเนียม ออกไซด์ ในรูปแบบผง ส่วนสังกะสี ออกไซด์ในรูปแบบผงนั้นก็เป็นสารสีขาวอีกชนิดหนึ่งที่หาได้ง่าย และใช้อยู่เป็นประจำในงานด้านทันตกรรม จากการชั่งสารเมื่อทำการผสมและวัดสี จะเห็นได้ว่า ในการทำให้ขึ้นทดสอบแต่ละชนิดมีค่าความ สว่าง-มืด เท่ากับค่าเฉลี่ย ต้องใช้ปริมาณสารแต่ละชนิดไม่เท่ากัน มีค่าตั้งแต่ร้อยละ 0.31 ถึง 0.977 โดยน้ำหนัก ในปี 1979 Lontz และ Schweiger<sup>48</sup> ได้ทดลองผสมสีภายในเนื้อวัสดุพบว่าต้องใช้สารทึบแสงสีขาว White titania เป็นปริมาณเพียงร้อยละ 0.01 ถึง 0.079 จะเห็นว่าสารทึบแสงสีขาวที่ใช้ในการทดลองนี้ จำเป็นต้องผสมในปริมาณที่มากกว่า แต่ยังคงอยู่ในช่วงร้อยละ 0.2 ถึง ร้อยละ 1<sup>49</sup> ตามที่มีผู้เคยเสนอมา

ในการศึกษานี้ได้ทดลองวิธีที่จะเทโพลีไดเมธิลไซลอกเซน A-2186 โดยไม่ให้มีฟอง เนื่องจากการเกิดฟองในเนื้อของวัสดุจะลดคุณสมบัติทางกายภาพของอวัยวะเทียมลงอย่างมาก โดยได้ประดิษฐ์ถ้วยขนาดเล็กพอเหมาะที่ใช้กับการผสมวัสดุปริมาณไม่มากนัก เพื่อต่อเข้ากับเครื่องดูดอากาศกำลังสูง และได้ทำการดูดกำจัดฟองอากาศ ในเนื้อวัสดุเป็นจำนวน 4 ครั้ง นานกว่า 5 นาที ในขณะที่ดูด วัสดุมีการขยายตัวโดยมีปริมาตรมากกว่าเดิมประมาณ 4-5 เท่า ทำให้ฟองอากาศที่เคยมีขนาดเล็กฟองและแตกออก ทำให้สามารถกำจัดฟองได้มากระดับหนึ่ง หลังจากผ่านเครื่องดูดสูญญากาศแล้วจึงนำมาเทลงในแม่แบบหล่อที่วางอยู่บนเครื่องสั่น โดยเททีละชั้นบางๆ แล้วทำการรีดฟองที่อาจค้างอยู่เข้าไปมาด้วยความระมัดระวัง หากยังมีฟองค้างอยู่ จึงจะทำการเขี่ยฟองออกด้วยเข็มปลายแหลม ด้วยวิธีนี้ให้ผลดีต่อการกำจัดฟองอย่างมาก นอกจากนั้นในการทดลองนี้ได้ใช้การอัดขึ้นตัวอย่างพร้อมกันเป็นแผ่นใหญ่ทั้งกลุ่มแล้วจึงนำไปตัด ดังนั้นจึงสามารถสร้างให้ขึ้นตัวอย่างมีความคล้ายคลึงกันมากกว่าการที่จะสร้างขึ้นตัวอย่างให้เป็นรูปชิ้นงานที่จะทดสอบทีละชิ้น

ในการผสมสารทึบแสงสีขาวต้องใช้ดินขาวเป็นปริมาณมากที่สุด อาจส่งผลให้ ขึ้นทดสอบในกลุ่มดังกล่าวมีค่าความแข็งผิวสูงไม่แตกต่างจากกลุ่มทดสอบที่ผสมผงสังกะสี ออกไซด์ ซึ่งมีค่าความแข็งผิวสูงที่สุด คล้ายกับการทดลองของ Andres และคณะ<sup>42</sup> ที่พบว่า การเติมดินขาวประมาณร้อยละ

0.2 โดยน้ำหนัก ทำให้วัสดุ A-2186 มีค่าความแข็งแรงสูงขึ้นกว่ากลุ่มควบคุมร้อยละ 3.6 ในการทดสอบน้ำหนักกลุ่มควบคุมซึ่งไม่ได้เติมสารทึบแสงสีขาวใดๆเลยมีค่าความแข็งแรงต่ำที่สุดในขณะเดียวกันกลุ่มทดสอบที่ผสมสารทึบแสงสีขาว Factor II และ ผงไททาเนียม ออกไซด์ มีค่าความแข็งแรงไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ในปี 1980 Lewis และ Castleberry<sup>13</sup> ได้ให้นิยามค่าความแข็งแรงในอุดมคติของอวัยวะเทียมให้อยู่ในช่วง 25-35 Shore A unit พบว่าวัสดุในทุกกลุ่มทดสอบในการศึกษานี้ยังอยู่ในช่วงที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม วิทยาการเติมสารทึบแสงสีขาวประเภท ดินขาว จอร์เจีย และผงสังกะสี ออกไซด์ ภายในเนื้อวัสดุส่งผลให้มีความแข็งแรงมากขึ้น

เมื่อนำขึ้นทดสอบมาวัดค่ากำลังแรงฉีก พบว่าทุกกลุ่มมีค่ากำลังแรงฉีกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญสอดคล้องกับการทดลองของ Andres และคณะ<sup>42</sup> แต่จะเห็นว่าค่ากำลังแรงฉีกของกลุ่มทดสอบทุกกลุ่มมีค่าแปรผกผันกับค่าความแข็งแรง คล้ายกับการทดสอบของ Farah และคณะ<sup>36</sup> ซึ่งพบว่าขึ้นทดสอบที่นิ่มกว่าจะมีกำลังแรงฉีกสูงกว่า นั่นคือ กลุ่มควบคุมที่มีความแข็งแรงต่ำที่สุด มีกำลังแรงฉีกสูงที่สุด ซึ่งคุณสมบัติทั้ง 2 อย่างนี้เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอวัยวะเทียม ในขณะที่กลุ่มทดสอบอื่นๆ ที่ได้รับการเติมสารทึบแสงสีขาวมีกำลังแรงฉีกต่ำกว่ากลุ่มควบคุม แต่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ นอกจากนั้นค่าความแข็งแรงที่สูงขึ้นและค่ากำลังแรงฉีกที่ลดลง ยังมีแนวโน้มสัมพันธ์กับปริมาณสารทึบแสงสีขาวที่เติมลงไป ในกลุ่มที่สารทึบแสงสีขาวมากที่สุด คือกลุ่มที่ได้รับการเติมดินขาวปริมาณร้อยละ 0.977 และกลุ่มที่เติมผงสังกะสี ออกไซด์ปริมาณร้อยละ 0.374 โดยน้ำหนัก จะมีค่าความแข็งแรงสูงและค่าแข็งแรงฉีกต่ำ จะมีเฉพาะกลุ่มที่ได้รับการเติมสารทึบแสงสีขาวของ Factor II ที่มีการเติมสารมากเป็นลำดับที่สองรองจากกลุ่มที่เติมดินขาว แต่ยังคงพบว่ามีค่าความแข็งแรงไม่ต่างจากกลุ่มควบคุมและมีค่ากำลังแรงฉีกรองจากกลุ่มควบคุม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่สารทึบแสงสีขาวของ Factor II มีส่วนเหลวเป็นซิลิโคนเหลวและตัวทำละลาย ทำให้สามารถผสมให้เข้ากับโพลีไธเมธิลไซลอกเซนที่มีลักษณะเหนียวได้ดีกว่า และสามารถกลมกลืนเข้ากับโพลีไธเมธิลไซลอกเซนได้ง่าย รวมทั้งการที่เป็นของเหลวอาจทำให้วัสดุนุ่มขึ้น<sup>42</sup> โดยไม่เพิ่มความแข็งแรงของโพลีไธเมธิลไซลอกเซน

กำลังแรงดึงและอัตราส่วนการยืดตัวที่วัดได้จากการทดลองนี้มีความแตกต่างกันในทางสถิติ ในระหว่างกลุ่มที่ทดสอบ พบว่ากลุ่มควบคุมมีกำลังแรงดึงและอัตราส่วนการยืดตัวสูงที่สุดต่างจากกลุ่มอื่นๆอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการเติมสารทึบแสงสีขาวลงในวัสดุโพลีไธเมธิลไซลอกเซนมีผลทำให้คุณสมบัติของวัสดุเปลี่ยนไป พบว่าค่ากำลังแรงดึงของกลุ่มควบคุมมีค่าสูงสุด ต่างจากกลุ่มทดสอบที่เติมดินขาว สารทึบแสงสีขาวของ Factor II และสังกะสี ออกไซด์ ซึ่งมีค่ากำลังแรงดึงไม่แตกต่างกันทางสถิติ



ปัญหาที่มักจะพบในชิ้นอวัยวะเทียมเมื่อผ่านการใช้งานไปช่วงเวลาหนึ่ง คือ การฉีกขาดบริเวณขอบ เนื่องมาจากการถอดและใส่อวัยวะเทียม นอกจากนั้นยังพบว่าชิ้นอวัยวะเทียมมีลักษณะแข็ง ขาดความยืดหยุ่น ทำให้สัมผัสไม่เหมือนกับผิวหนัง จากการทดสอบคุณสมบัติเรื่องกำลังแรงดึงและกำลังแรงฉีก เป็นการทดสอบคุณสมบัติที่สะท้อนให้เห็นว่าวัสดุแต่ละกลุ่มมีความสามารถในการต้านทานแรงการดึง หรือแรงฉีกที่จะเกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานได้มากน้อยเพียงใด วัสดุที่มีค่ากำลังแรงดึงสูงย่อมทนทานต่อการดึงได้ โดยไม่มีการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร ในขณะที่เดียวกันวัสดุที่มีค่ากำลังแรงฉีกสูงน่าจะทนทานต่อแรงบิดหรือฉีก ที่มักจะเกิดในบริเวณขอบซึ่งมีวัสดุบางที่สุดได้ โดยไม่เกิดการฉีกขาดเร็วนัก อย่างไรก็ตามวัสดุประเภทโพลีไคเมธิลไซลอกเซนที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันก็ยังมีข้อจำกัดที่วัสดุมีกำลังแรงดึงและกำลังแรงฉีกไม่สูงมากนัก<sup>2</sup> ดังนั้นการเติมแต่งสารที่บดสลายได้ ลงในเนื้อวัสดุ ไม่ควรมีผลลดกำลังแรงดึงและกำลังแรงฉีกของวัสดุลงอีก แต่จากการทดลองนี้พบว่ากลุ่มควบคุมมีค่ากำลังแรงดึงและกำลังแรงฉีกสูงที่สุด ต่างจากกลุ่มทดสอบอื่นๆ ยกเว้นกลุ่มทดสอบที่เติมดินขาวซึ่งมีค่าอัตราส่วนการยืดตัวไม่ต่างจากกลุ่มควบคุม คุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ต้องการ คือ วัสดุที่ใช้ทำอวัยวะเทียมควรจะมีผิวหนังคล้ายผิวหนัง และคงรักษาความนุ่มไว้ แม้ว่าจะผ่านการใช้งาน แต่มักพบว่าวัสดุจะมีการเสื่อมคุณสมบัติโดยมีลักษณะแข็งขึ้นตามธรรมชาติ ดังนั้นการทดสอบความแข็งผิวจึงแสดงให้เห็นทราบว่าวัสดุที่ได้รับการเติมสารที่บดสลายได้ที่ส่งผลให้ความแข็งแรงผิวสูงกว่ากลุ่มควบคุม ซึ่งในการทดลองนี้กลุ่มควบคุมมีค่าความแข็งแรงผิวต่ำที่สุด วัสดุที่มีความแข็งแรงผิวสูงกว่ากลุ่มควบคุม น่าจะมีแนวโน้มที่อาจจะก่อให้เกิดลักษณะแข็ง ไม่ยืดหยุ่นได้เร็วยิ่งขึ้น ส่วนค่าอัตราส่วนการยืดตัวซึ่งทดสอบพร้อมกับการทดสอบหาลำดับแรงดึงมีความสำคัญในการแสดงว่ากลุ่มทดสอบใดมีความสามารถในการยืดตัวเป็นระยะทางสูงที่สุดก่อนที่จะขาดออก วัสดุโพลีไคเมธิลไซลอกเซน A-2186 ที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นวัสดุที่แสดงพฤติกรรมในรูปแบบของยาง (Elastic) กล่าวคือ วัสดุจะมีการยืดตัวขึ้นโดยสัมพันธ์กับแรงที่ใช้ดึงในลักษณะเส้นตรง เมื่อวัสดุยืดตัวมากที่สุดก็จะขาดออกโดยมีค่าแรงดึงสูงสุดเท่ากับ ค่าแรงดึงสูงสุดก่อนขาด ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายของสภาพการเป็นยาง (Elastic Limit) ในการทำอวัยวะเทียมนั้นมีความต้องการให้วัสดุแสดงพฤติกรรมในรูปแบบของยางในช่วงที่กว้างที่สุด ซึ่งหมายถึงคุณลักษณะที่วัสดุสามารถทนต่อแรงดึงได้สูงที่สุดโดยไม่เปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ทำให้อวัยวะเทียมมีมิติที่มีเสถียรภาพ

จากความจำเป็นในการวัดคุณสมบัติทั้ง 4 อย่างดังกล่าว ทำให้เห็นว่าคุณสมบัติทั้งหมดสะท้อนถึงคุณลักษณะสำคัญที่ควรจะมีในขณะที่ใช้งานจริง เมื่อนำผลการทดสอบการเติมสารที่บดสลายได้ทั้ง 4 ชนิด มาวิเคราะห์ตามแนวทางที่สารที่บดสลายได้ควรจะมีผลให้วัสดุ A-2186 มีคุณสมบัติทั้ง 4

ชนิด แตกต่างจากกลุ่มควบคุมน้อยที่สุด จะเห็นได้ว่าไททาเนียม ออกไซด์นั้นมีผลให้วัสดุมีกำลังแรงดึง และอัตราส่วนการยืดตัวลดลงมากที่สุด แตกต่างจากกลุ่มอื่นๆอย่างมีนัยสำคัญ และสังกะสี ออกไซด์ ซึ่งมีผลให้วัสดุมีความแข็งแรงสูงชันมากที่สุด กำลังแรงฉีกลดลงมากที่สุดแตกต่างจากกลุ่มอื่นๆอย่างมีนัยสำคัญ และยังส่งผลให้มีกำลังแรงดึงลดลงต่างจากกลุ่มควบคุมด้วย ทำให้เห็นได้ว่าไททาเนียม ออกไซด์ และสังกะสี ออกไซด์ไม่น่าจะเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นสารทึบแสงสีขาวในการทำอวัยวะเทียม

เมื่อพิจารณาถึงกลุ่มทดสอบที่ได้รับการเติมดินขาวนั้นถึงแม้ว่าจะมีค่ากำลังแรงดึงรองจากกลุ่มควบคุมและอัตราส่วนการยืดตัวไม่ต่างจากกลุ่มควบคุม ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ต้องการ แต่ก็ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงสูงชันมากต่างจากกลุ่มควบคุม และมีค่ากำลังแรงฉีกค่อนข้างต่ำ แม้ว่าจะไม่แตกต่างจากกลุ่มอื่นๆอย่างมีนัยสำคัญ การที่วัสดุมีความแข็งแรงสูงชันเป็นลักษณะที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในอวัยวะเทียม เนื่องจากอวัยวะเทียมที่ใช้งานไประยะหนึ่งจะมีความแข็งแรงมากขึ้น และสูญเสียความยืดหยุ่นอยู่แล้ว ดังนั้นการเติมดินขาวอาจเป็นเหตุผลส่วนหนึ่งที่ทำให้อวัยวะเทียมมีความแข็งแรงสูงชันเร็วกว่าปกติ ดังนั้นวัสดุที่น่าเลือกใช้ตามผลการทดลองนี้น่าจะเป็น สารทึบแสงสีขาวของ Factor II ซึ่งมีค่าความแข็งแรงไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม ค่ากำลังแรงฉีกรองจากกลุ่มควบคุม ค่ากำลังแรงดึงไม่ต่างจากดินขาวและสังกะสี ออกไซด์ จะมีเพียงค่าอัตราส่วนในการยืดตัวที่ไม่สูงนัก แต่ก็ไม่ต่างจากดินขาวและสังกะสี ออกไซด์ เช่นกัน อย่างไรก็ตามพบว่าวัสดุชนิดใดเลยที่มีคุณสมบัติที่เพิ่มหรือคงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุโพลีไธเมธิลไซลอกเซน A-2186 ได้ จะมีก็เพียงสารทึบแสงสีขาวของ Factor II ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุน้อยที่สุด นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าการเติมสารทึบแสงใดๆ มีผลก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ A-2186 ทั้งสิ้น โดยที่การเติมสารทึบแสงในลักษณะเป็นสารแขวนลอยไม่มีผลในการเสริมให้คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุดีขึ้น อาจเนื่องมาจากการที่วัสดุประเภทโพลีไธเมธิลไซลอกเซนมีลักษณะเฉื่อย สำหรับโพลีไธเมธิลไซลอกเซน A-2186 นั้นสามารถสัมผัสกับวัสดุหลายชนิดโดยไม่เกิดปฏิกิริยาใดๆ ยกเว้น butyl และ chlorinated rubbers ตามข้อแนะนำของบริษัทผู้ผลิต ดังนั้นการเติมสารทึบแสงต่างชนิดที่ใช้ในการทดลองนี้ลงในวัสดุ ไม่น่าจะเกิดปฏิกิริยาที่เชื่อมโยงกับโครงข่ายของโพลีไธเมธิลไซลอกเซน A-2186 ได้

## สรุปผลการวิจัย

การผสมสารทึบแสงสีขาวแต่ละชนิด ในการแต่งสีอวัยวะเทียมมีความจำเป็นในการใช้สารทึบแสงแต่ละชนิดในปริมาณไม่เท่ากันขึ้นกับชนิดของสารที่ใช้ สารทึบแสงสีขาวทุกชนิดมีผลทำให้โพลีไดเมทิลไซลอคเซน A-2186 มีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป ดังนี้

1. กลุ่มทดสอบที่ได้รับการแต่งสีด้วยดินขาวจอร์เจีย และ สังกะสี ออกไซด์ มีค่าความแข็งผิวสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนกลุ่มทดสอบที่ได้รับการแต่งสี ด้วยสารทึบแสงสีขาวของ Factor II และ สังกะสี ออกไซด์ มีค่าความแข็งผิวไม่แตกต่างจาก กลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
2. ค่าเฉลี่ยกำลังแรงฉีกของกลุ่มทดสอบทุกกลุ่มมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ
3. ค่ากำลังแรงดึงของกลุ่มทดสอบที่ได้รับการแต่งสีด้วยไททาเนียม ออกไซด์ มีค่าต่ำที่สุดแตกต่างจากกลุ่มทดสอบที่ได้รับการแต่งสีด้วยสังกะสี ออกไซด์ สารทึบแสงสีขาวของ Factor II และดินขาว จอร์เจีย ซึ่งมีค่ากำลังแรงดึงไม่ต่างกัน กลุ่มควบคุมเป็นกลุ่มที่มีกำลังแรงดึงสูงที่สุด แตกต่างจากกลุ่มทดสอบที่ได้รับการแต่งสีทุกชนิดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
4. อัตราส่วนการยืดตัวของกลุ่มทดสอบที่ได้รับการแต่งสีด้วยไททาเนียม ออกไซด์ มีค่าต่ำที่สุดแตกต่างจากกลุ่มทดสอบที่ได้รับการแต่งสีด้วยสังกะสี ออกไซด์ สารทึบแสงสีขาว Factor II และดินขาว จอร์เจีย ซึ่งมีอัตราส่วนการยืดตัวไม่ต่างกัน กลุ่มควบคุมเป็นกลุ่มที่มีอัตราส่วนการยืดตัวสูงที่สุด แตกต่างจากกลุ่มทดสอบที่ได้รับการแต่งสีทุกชนิดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นกลุ่มที่ได้รับการแต่งสีด้วยดินขาว จอร์เจีย
5. สารทึบแสงสีขาวของ Factor II มีผลเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของโพลีไดเมทิลไซลอคเซนน้อยกว่าสารทึบแสงสีขาวชนิดอื่นที่ทดสอบ

### ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองนี้พบปัญหาในการสร้างชั้นทดสอบให้ปราศจากฟอง จึงได้ค้นคว้าวิธีกำจัดฟองที่อธิบายในขั้นตอนการสร้างชั้นทดสอบ เนื่องจากฟองในเนื้อวัสดุส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุลดลงอย่างมาก ดังจะเห็นจากชั้นทดสอบนำร่องที่ยังไม่สามารถทำให้ปราศจากฟองได้มีคุณสมบัติต่ำกว่าชั้นทดสอบที่ได้ผ่านการกำจัดฟองแล้ว ในการทดสอบนี้ได้ทำการวัดคุณสมบัติของวัสดุหลังจาก เวลาผ่านไป 2 สัปดาห์ เนื่องจากต้องการรู้ผลกระทบจากสารทึบแสงสีขาว โดยไม่มีปัจจัยเรื่องเวลา โดยน่าจะมีการทดสอบผลกระทบจากปัจจัยเรื่องเวลา ของกลุ่มทดสอบที่ได้รับการเติมสารทึบแสงสีขาวของ Factor II และดินขาวจอร์เจีย ซึ่งเป็นสาร 2 ชนิดที่พบว่ามีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุน้อยกว่าชนิดอื่น รวมทั้งหาสารทึบแสงสีขาวชนิดอื่นมาทดสอบเพื่อเปรียบเทียบ นอกจากนี้น่าจะมีการทดสอบการเปลี่ยนสีของชั้นทดสอบในกลุ่มทดสอบเทียบกับการเปลี่ยนสีของกลุ่มควบคุม เมื่อทิ้งให้ชั้นทดสอบอยู่ในสภาวะภายนอกที่สัมผัสกับแสงแดด และความชื้นเป็นระยะเวลาหนึ่งด้วย

## รายการอ้างอิง

1. Barnhart GW. A new material and technique in the art of somato-prosthesis. *J Dent Res* 1960; 9: 636.
2. Beumer III J, Curtis TA, Marunick MT. **Maxillofacial Rehabilitation, Prosthodontic and Surgical Consideration**. St.louis:Tokyo: Ishiyaku EuroAmerica; 1996. p.387-98.
3. Saunder KJ. **Organic polymer chemistry**. London: Chapman and Hall; 1976. p. 389-411.
4. ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. **โพลีเมอร์เชิงพานิชย์**. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร: โอเดียนสโตร์; 2526. หน้า 348-68.
5. Chalian VA. **Maxillofacial prosthetic materials**. In Smith DC, William DF, editors. *Biocompatibility of dental materials*. Boca Raton, Florida: CRC Press; 1982. p. 247-63.
6. Heller HL, McKinsky RE. Facial materials. In : McKinsky RE, editor. **Fundamentals of facial prosthetics**. Arlington, VA: ABI Professional; 1995. p.79-97.
7. Kent K, Zeigel RF, Kent K, Frost AL, Shaff NG. Controlling the porosity and density of silicone prosthetic materials. *J Prosthet Dent* 1983; 50: 230-6.
8. Lontz JF. State -of -the- art material used for maxillofacial prosthetic reconstruction. *Dent Clin North Am* 1990; 34: 307-25.
9. Bartlett SO, Pineda LY, Moore DJ. Surface Characterization of the silicone rubber prosthesis. *J Prosthet Dent* 1971; 25: 69-71.
10. Firtell DN, Bartlett SO. Maxillofacial prostheses : Reproducible fabrication . *J Prosthet Dent* 1969; 22: 247-52.
11. Ducan JD, Rommerdale EH. Base shade determination of a new elastomer for maxillofacial prostheses. *J Prosthet Dent* 1980; 44: 654-5.
12. Schaaf NG. Color characterizing silicone rubber facial prosthesis. *J Prosthet Dent* 1970; 24:198-202.
13. Lewis DH, Castleberry DJ. An assessment of recent advances in external maxillofacial materials. *J Prosthet Dent* 1980; 43: 426-32.
14. McLaren K. **The color science of dyes and pigments** 2<sup>nd</sup> edition. Adam Hilger Ltd.; 1986. p.250.
15. Mayer R. **The artist 's handbook of materials and techniques** 5<sup>th</sup> ed New York: Viking

- Penguin ; 1991. p.126.
16. Standard terminology of appearance. (ATSM E 284-96c). West Conshohocken (PA): American Society for Testing and Materials
  17. Craig RG, Koran A, Yu R, Spencer J. Color stability of Elastomers for maxillofacial appliances. *J Dent Res*1978; 57: 866-71.
  18. Lemon JC, Chambers MS, Jacobsen ML, Powers JM. Color stability of facial prosthesis. *J Prosthet Dent* 1995; 74: 613-8.
  19. Chen MS, Udagama A, Drane JB. Evaluation of facial prosthesis for head and neck cancer patients. *J Prosthet Dent* 1981; 46: 538-54.
  20. Fine L, Robinson JE, Barnhart GW, Karl L. New method for coloring facial prostheses. *J Prosthet Dent* 1978; 39: 643-9.
  21. เพ็ญศรี ทองนพคุณ , ธนญา ตริ่งตราจิตกุล, วินา คุณาวิวัฒน์ . **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ ทฤษฎีการวัดสี**. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว ; 2540. หน้า 1 – 21.
  22. Billmeyer FW, Saltzmann M. *Principle of color Technology* . USA: Interscience publishers ;1981. p. 23.
  23. Clulow FW. *Colour Its Principle and Their Applications* . London : Fountain Press ; 1972. p. 346-60.
  24. Hanson MD, Shipman B, Blomfield JV, Janus CF. Commercial Cosmetics and their role in the coloring of facial prosthesis. *J Prosthet Dent* 1983; 50: 818-20.
  25. Jani RM, Schaaf NG. An evaluation of facial prostheses. *J Prosthet Dent* 1978; 39: 546-50.
  26. Sweeny AB, Fischer TE, Castle berry DJ, Cowperthwaite GF .Evaluation of improved maxillofacial prosthesis materials. *J Prosthet Dent* 1972; 27: 297-305.
  27. Koran A, Craig RG. Dynamic mechanical properties of maxillofacial materials. *J Dent Res*1975; 54: 216-21.
  28. Moore DJ, Glaser ZR, Tabacco MJ, Linebaugh MG. Evaluation of polymeric materials for maxillofacial prosthetics. *J Prosthet Dent* 1977; 38: 319-26.
  29. Yu R, Koran A. Dimensional stability of elastomers for maxillofacial appliances. *J Dent Res* 1979; 58: 1908-9.
  30. Yu R, Koran A. Craig RG. Physical properties of a maxillofacial elastomers under condition of accelerated aging. *J Dent Res* 1980; 59: 1041-2.

31. 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.
32. Craig RG, Koran A, Yu R. Elastomer for maxillofacial application. **Biomaterials** 1980; 1: 112-7.
33. Udagama A, Drance JB. Use of medical-grade methyl triacetoxysilane crosslinked silicone for facial prosthesis **J Prosthet Dent** 1982; 48: 86-7.
34. Tuner GE, Fischer TE, Castleberry DJ, Lemons JE. Intrinsic color of isophorone polyurethane for maxillofacial prosthetics. Part I physical properties. **J Prosthet Dent** 1984; 51: 519-22.
35. Woofaardt JF, Chandler HD, Smith BA. Mechanical properties of a new facial prosthetic material. **J Prosthet Dent** 1985; 53: 228-34.
36. Farah JW, Robinson JC, Koran A, Craig RG. Properties of a modified cross-linked silicone for maxillofacial prostheses. **J Oral Rehab** 1987; 14: 599-605.
37. Udagama A. Urethane lined Silicone facial prosthesis. **J Prosthet Dent** 1987; 58: 351-4.
38. Sanchez RA, Moore DJ, Cruz DL, Chappell R. Comparison of the physical properties of two types of polydimethyl siloxane for fabrication of facial prostheses. **J Prosthet Dent** 1992; 67: 679-82.
39. Andres CJ, Hang SP, Munoz CA, Bernal G. Effects of environmental factors on maxillofacial elastomers part I – Literature review. **J Prosthet Dent** 1992; 68: 327-330.
40. Andres CJ, Hang SP, Brown DT, Bernal G. Effect of environmental factors on maxillofacial elastomers Part II. Report of survey. **J Prosthet Dent** 1992; 68: 519-22.
41. Andres CJ, Hang SP, Munoz CA, Bernal G. Effect of environmental factors on maxillofacial elastomers Part III.-Physical properties. **J Prosthet Dent** 1992; 68:644-51.
42. Haug SP, Andres CJ, Moore BK. Color stability and colorant effect on maxillofacial elastomers. Part I : Colorant effect on physical properties. **J Prosthet Dent** 1999; 81: 418-22.
43. Haug SP, Andres CJ, Moore BK. Color stability and colorant effect on maxillofacial elastomers. Part II : Weathering effect on physical properties. **J Prosthet Dent** 1999; 81: 423-30.
44. Haug SP, Andres CJ, Moore BK. Color stability and colorant effect on maxillofacial

- elastomers. Part III : Weathering effect on color. **J Prosthet Dent** 1999; 81: 431-8.
45. International standard (ISO 37:1994E): Rubber, vulcanized or thermoplastic- Determination of tensile stress-strain properties ; 1994.
46. American National Standards ASTM No 624. Philadelphia: American Society for Testing Materials ; 1981. ( Pt 37 ).
47. American National Standards ASTM No 2240. Philadelphia: American Society for Testing Materials ; 1981. ( Pt 37 ).
48. Lontz JF, Schweigger JF. Maxillofacial restorative material and techniques. **VA Bull Prosth Res** 1979 ; Fall: 240-4.
49. Aina TO, Wright SM, Pullen-Warner E. The reproducing of skin color and texture in facial prostheses for Negro patients. **J Prosthet Dent** 1978; 39: 74-8.
50. Cantor R, Webber RI, Stroud L. Methods for evaluating prosthetic facial materials . **J Prosthet Dent** 1969; 21: 324-32.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Sample	ID	P/F	Product	Operator ID	L*	a*	b*	DE	WI (31.42)	BI (20)
Sample 48										
Sample 49										
Sample 49	B50		Nathawat Pleumsamra		57.03	7.52	18.90			-13.89
Sample 45	B49		Somsak Dejchok		54.71	9.36	19.48			-14.62
Sample 47	Y48		Orasa Suraseang		64.76	5.85	16.25			-7.97
Sample 46	F47		Nichapak Sarasiri		64.61	6.42	18.89			-14.13
Sample 46	Y46		Thana Thanapalin		65.89	5.43	13.92			-1.92
Sample 44	Y45		Kemthong Khunvithay		61.14	6.20	17.30			-10.83
Sample 43	Y44		Prasai Sangachit		61.06	5.79	17.69			-11.63
Sample 42	F43		Chanokpan Sukonpan		68.34	4.04	14.20			-1.78
Sample 41	Y42		Bunmee Pituksa		60.45	7.64	17.66			-11.36
Sample 40	B41		Budsadee Pradupploy		60.71	6.85	18.37			-13.15
Sample 39	Y39		rasmi kumperichaya		64.96	5.69	16.12			-7.62
Sample 38	F38		piyarat piyasathit		66.20	4.63	15.52			-5.74
Sample 37	F37		prapatat pornpongath		69.62	3.78	13.75			-0.02
Sample 36	B36		wariya wontog		64.76	5.31	17.93			-11.94
Sample 35	Y35		ploi yongvanijchit		69.81	3.83	16.55			-7.58
Sample 34	Y34		atalee bijitpan		65.00	5.66	17.91			-11.76
Sample 33	Y33		nawaporn jittapiroms		64.48	4.14	14.68			-4.18
Sample 32	Y32		Penthacha Charoenpan		63.32	6.25	17.69			-11.42
Sample 31	F31		Teera Thammawasi		65.62	4.76	13.64			-1.25
Sample 30	F30		Wimolrat Worasuttaya		66.85	4.31	14.00			-1.49
Sample 29	B29		Jareerat Puntap		59.22	7.62	18.04			-12.33
Sample 28	Y28		NUMFON Kaewpech		66.46	5.64	16.80			-9.24
Sample 27	Y27		Vajara wilairatana		58.85	7.68	18.09			-12.38
Sample 26	Y26		Siripong Sirimongkol		62.38	7.60	17.57			-11.22
Sample 25	Y25		Chakree Ongthiemsak		60.49	6.07	16.08			-7.96
Sample 24	F24		Palawat Laoharungpis		65.46	5.87	16.18			-7.46
Sample 23	Y23		Nuthaya Kotchom		67.72	5.34	18.20			-12.27
Sample 22	Y22		Amolrada Tatiyadamke		65.39	6.44	16.81			-9.10
Sample 21	Y21		Chutima Sukcharoen		54.65	7.28	17.91			-11.97
Sample 20	Y20		Bengapom Phankosol		67.15	5.43	17.50			-10.71
Sample 19	B19		Boonsong Putaphan		59.27	6.66	18.59			-13.29
Sample 18	B18		Chamnan Pocharoen		56.69	8.48	18.63			-13.28
Sample 17	B16		Ballang Tapsen		57.86	8.79	19.41			-14.89
Sample 16	F16		Piyawan Sipung		66.43	4.70	17.80			-11.49
Sample 15	F15		Kannika Jitrong		64.75	6.38	17.50			-10.85
Sample 14	Y14		Sewanee Srichai		61.92	6.52	16.85			-9.56
Sample 13	F13		Janya Surakomponom		66.45	5.01	15.52			-5.65
Sample 12	F12		siripom arunpraditk		64.35	6.24	17.53			-11.23
Sample 11	Y11		Nutpatsorn Chawapano		60.40	7.01	17.23			-10.47
Sample 10	Y10		Nitikam		61.44	7.25	21.02			-18.44
Sample 9	Y9		Supaktra Torteeka		62.87	7.19	17.06			-10.09
Sample 8	F8		Chalearmsak Siriwich		65.47	5.06	14.60			-3.48
Sample 7	F7		Pochanee Verayannont		65.91	6.41	16.56			-8.17
Sample 6	Y6		Ariya Taweerat		64.25	6.48	18.68			-13.66
Sample 5	Y5		Panarat Kodkeaw		65.70	5.01	17.56			-11.08
Sample 4	Y4		Kussalee Thongpussa		67.51	4.49	15.75			-6.26
Sample 3	Y3		Thanawadee Pongsawa		65.32	5.65	17.88			-11.74
Sample 2	Y2		Tatsanee Srisonthon		65.09	6.81	17.37			-10.49
Sample 1	Y1		Anoma Kitkhuntod		64.68	6.52	16.03			-7.57

ตารางแสดงสีผิวของอาสาสมัครคนไทยจำนวน 49 คน

ตารางแสดงการวัดสีกลุ่มทดสอบ

TITANIUM TEST3	titanium oxide	63.69	-1.22	-3.95	44.27
TITANIUM TEST2	titanium oxide	64.41	-1	-2.91	42.14
FAC TEST3	factor II	63.92	-0.86	-3.09	41.91
FAC TEST2	factor II	63.99	-0.96	-2.57	40.48
KAOLIN TEST3	kaolin	63.95	-1.97	-3.38	43.16
KAOLIN TEST2	kaolin	63.19	-2.08	-3.45	42.27
ZINC TEST3	zinc oxide	64.69	-1.07	-6.89	54.91
ZINC TEST2	ZINC OXIDE	64.62	-1.06	-6.1	52.28
TITANIUM TEST1	titanium oxide	63.39	-1.02	-3.69	42.96
FACII TEST1	factor II	64.38	-0.82	-2.69	41.38
KAOLIN PILOT	kaolin	63.74	-2.17	-2.96	41.63
TITANIUM PILOT	titanium oxide	64.32	-1.03	-3.55	43.92
ZINC TEST 1	Zinc oxide 0.35g	64.03	-1.18	-6.81	53.56
ZINC PILOT	zinc oxide	64.33	-0.95	-6.48	52.95
FAC PILOT	factor II	64.79	-0.98	-3.04	43.05
K1PILOT	kaolin	63.94	-1.97	-3.06	42.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ตารางแสดงค่าความแข็งผิว

factor	1	2	3	4	5	mean
1	34	34	30	33	33	32.8
2	32	32	32	31	32	31.8
3	33	33	32	33	31	32.4
4	33	33	32	34	32	32.8
5	31	32	34	32	32	32.2
6	33	32	35	32	31	32.6
7	33	32	34	33	32	32.8
8	35	32	32	34	33	33.2
9	33	34	31	32	32	32.4
10	33	33	32	32	30	32

Zinc	1	2	3	4	5	mean
1	32	32	32	33	34	32.6
2	34	34	33	33	34	33.6
3	34	34	34	34	33	33.8
4	34	34	34	34	35	34.2
5	34	34	35	34	34	34.2
6	33	34	34	34	34	33.8
7	34	33	34	34	34	33.8
8	34	34	33	33	33	33.4
9	33	33	33	33	34	33.2
10	35	34	34	34	33	34

Kaolin	1	2	3	4	5	mean
1	32	33	34	33	32	32.8
2	33	32	31	32	34	32.4
3	32	33	32	33	33	32.6
4	33	33	34	35	34	33.8
5	34	34	34	34	33	33.8
6	33	34	34	34	34	33.8
7	34	34	34	34	34	34
8	35	35	31	34	34	33.8
9	35	34	34	34	35	34.4
10	33	33	33	33	33	33

Titanium	1	2	3	4	5	mean
1	32	32	30	30	33	31.4
2	33	32	33	33	33	32.8
3	33	34	34	34	34	33.8
4	32	33	33	33	33	32.8
5	34	33	31	32	32	32.4
6	32	34	34	31	30	32.2
7	35	32	34	33	33	33.4
8	34	32	32	33	34	33
9	34	32	33	33	35	33.4
10	32	32	33	30	34	32.2

ตารางแสดงค่าความแข็งผิวที่วัดจากหินทดสอบกลุ่มละ 10 ชิ้น ชิ้นละ 5 ตำแหน่ง

### ตารางแสดงค่าความแข็งแรงผิว

control	1	2	3	4	5	mean
1	32	32	33	33	32	32.4
2	33	31	33	32	32	32.2
3	32	32	33	31	34	32.4
4	32	33	33	33	34	33
5	32	33	33	34	34	33.2
6	34	30	33	33	33	32.6
7	32	33	34	32	33	32.8
8	32	33	31	33	32	32.2
9	33	32	30	33	32	32
10	33	33	30	30	33	31.8

ตารางแสดงค่าความแข็งแรงผิวที่วัดจากขั้นตอนทดสอบกลุ่มละ 10 ซีน ซีนละ 5 ตำแหน่ง

ชนิด	สารทึบแสง FactorII	ดินขาว	สังกะสี ออกไซด์	ไททาเนียม ออกไซด์	กลุ่มควบคุม
1	32.80	32.80	32.60	31.40	32.40
2	31.80	32.40	33.60	32.80	32.20
3	32.40	32.60	33.80	33.80	32.40
4	32.80	33.80	34.20	32.80	33.00
5	32.20	33.80	34.20	32.40	33.20
6	32.60	33.80	33.80	32.20	32.60
7	32.80	34.00	33.80	33.40	32.80
8	33.20	33.80	33.40	33.00	32.20
9	32.40	34.40	33.20	33.40	32.00
10	32.00	33.00	34.00	32.20	31.80
ค่าเฉลี่ย	32.50	33.44	33.66	32.74	32.46
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.42	0.68	0.49	0.71	0.44

ตารางแสดงค่าความแข็งแรงผิวเฉลี่ยของซินตัวอย่าง กลุ่มละ 10 ซีน

## การวิเคราะห์ผลทางสถิติของความแข็งผิว

ความแข็งผิว

### Descriptives

ความแข็งผิว

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
Factor II	10	32.500	.424	.134	32.196	32.804	31.8	33.2
Kaolin	10	33.440	.679	.215	32.955	33.925	32.4	34.4
Zinc oxide	10	33.660	.490	.155	33.309	34.011	32.6	34.2
Titanium oxide	10	32.740	.712	.225	32.231	33.249	31.4	33.8
Control	10	32.460	.443	.140	32.143	32.777	31.8	33.2
Total	50	32.960	.736	.104	32.751	33.169	31.4	34.4

### ANOVA

ความแข็งผิว

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	12.304	4	3.076	9.710	.000
Within Groups	14.256	45	.317		
Total	26.560	49			

การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของค่าความแข็งผิวด้วยแบบทดสอบของดันแคน

ความแข็งผิว

Duncan

	N	Subset for alpha = .05	
NO		1	2
กลุ่มควบคุม	10	32.460	
สารทึบแสง Factor II	10	32.500	
ไททาเนียม ออกไซด์	10	32.740	
ดินขาว	10		33.440
สังกะสีออกไซด์	10		33.660
Sig.		.301	.387

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 10.000.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงค่ากำลังแรงฉีก

ชนิด	สารทึบแสง Factor II	ดินขาว	สังกะสี ออกไซด์	ไททาเนียม ออกไซด์	กลุ่มควบคุม
1	40.47	44.61	45.3	43.14	47.9
2	49.6	45.05	41.06	47.47	42.15
3	42.94	42.36	47.58	46.28	42.71
4	45.97	41.29	39.22	40.54	42.79
5	45.97	44.03	41.39	41.46	50.08
6	43.61	46.62	45.76	42.34	45.01
7	44.41	44.79	45.59	47.78	42.21
8	41.53	42.4	45.15	45.05	42.73
9	47.06	42.84	41.44	43.56	48.1
10	44.36	46.56	46.47	46.07	45.04
ค่าเฉลี่ย	44.59	44.06	43.90	44.37	44.87
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.69	1.81	2.83	2.53	2.88

ตารางแสดงค่ากำลังแรงฉีกของชั้นทดสอบกลุ่มละ 10 ชั้น



## การวิเคราะห์ผลทางสถิติของกำลังแรงฉีก

## Descriptives

## กำลังแรงฉีก

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
Factor II	10	44.5920	2.6898	.8506	42.6678	46.5162	40.47	49.60
Kaolin	10	44.0550	1.8082	.5718	42.7615	45.3485	41.29	46.62
Zinc oxide	10	43.8960	2.8344	.8963	41.8684	45.9236	39.22	47.58
Titanium oxide	10	44.3690	2.5313	.8005	42.5582	46.1798	40.54	47.78
Control	10	44.8720	2.8839	.9120	42.8090	46.9350	42.15	50.08
Total	50	44.3568	2.4974	.3532	43.6471	45.0665	39.22	50.08

## ANOVA

## กำลังแรงฉีก

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	6.243	4	1.561	.235	.917
Within Groups	299.365	45	6.653		
Total	305.608	49			

การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของค่ากำลังแรงจิกด้วยแบบทดสอบของดันแคน

กำลังแรงจิก

Duncan

	N	Subset for alpha = .05
TYPE		1
สังกะสี ออกไซด์	10	43.8960
ดินขาว	10	44.0550
ไททาเนียม ออกไซด์	10	44.3690
สารทึบแสง Factor II	10	44.5920
กลุ่มควบคุม	10	44.8720
Sig.		.459

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 10.000.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางแสดงค่ากำลังแรงดึง

ชนิด	สารทึบแสง FactorII	ดินขาว	สังกะสี ออกไซด์	ไททาเนียม ออกไซด์	กลุ่มควบคุม
1	71.59	66.25	64.37	53.65	62.93
2	59.62	56.52	62.64	58.1	68.78
3	63.34	55.47	60.84	50.43	66.1
4	51.12	62.19	57.49	55.09	72.36
5	70.17	72.04	55.34	49.97	67.42
6	69.54	62.36	55.04	64.46	70.18
7	69.12	59.31	62.28	60.76	69.37
8	59.39	68.4	75.29	54.26	63.71
9	48.31	55.79	52.8	62.16	67.41
10	74.5	66.68	61.04	52.92	67.09
11	58.16	70.12	57.07	51.57	70.65
12	67.7	63.81	52.25	50.96	68.34
13	67.34	57.25	61.62	62.05	66.84
14	52.35	73.04	63.35	48.9	70.18
15	61.04	64.49	60.3	54.02	64.9
ค่าเฉลี่ย	62.89	63.58	60.11	55.29	67.75
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	8.02	5.87	5.69	5.01	2.64

ตารางแสดงค่ากำลังแรงดึงของชิ้นทดสอบกลุ่มละ 15 ชิ้น

## การวิเคราะห์ผลทางสถิติของกำลังแรงดึง

## Descriptives

## กำลังแรงดึง

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
Factor II	15	62.8860	8.0205	2.0709	58.4444	67.3276	48.31	74.50
Kaolin	15	63.5813	5.8719	1.5161	60.3296	66.8331	55.47	73.04
Zinc oxide	15	60.1147	5.6926	1.4698	56.9622	63.2671	52.25	75.29
Titanium oxide	15	55.2867	5.0083	1.2931	52.5132	58.0602	48.90	64.46
Control	15	67.7507	2.6375	.6810	66.2900	69.2113	62.93	72.36
Total	75	61.9239	6.9358	.8009	60.3281	63.5196	48.31	75.29

## ANOVA

## กำลังแรงดึง

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1274.252	4	318.563	9.757	.000
Within Groups	2285.540	70	32.651		
Total	3559.792	74			

การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของค่ากำลังแรงดึงด้วยแบบทดสอบของดันแคน

กำลังแรงดึง

Duncan

	N	Subset for alpha = .05		
BRAND		1	2	3
ไททาเนียมออกไซด์	15	55.2867		
สังกะสี ออกไซด์	15		60.1147	
สารทึบแสง Factor II	15		62.8860	
ดินขาว	15		63.5813	
กลุ่มควบคุม	15			67.7507
Sig.		1.000	.121	1.000

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 15.000.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ตารางแสดงอัตราส่วนการยึดตัว

ชนิด	สารทึบแสง Factor II	ดินขาว	สังกะสี ออกไซด์	ไททาเนียม ออกไซด์	กลุ่มควบคุม
1	646.86	599.71	606.00	528.86	590.57
2	578.86	556.29	597.14	570.86	639.43
3	561.71	544.29	579.14	506.57	616.00
4	508.86	594.29	561.14	510.86	640.00
5	594.57	658.86	535.14	511.43	594.86
6	630.00	587.14	548.00	616.29	632.29
7	587.71	574.29	600.29	586.00	620.29
8	559.43	630.86	656.86	545.71	593.43
9	494.57	633.71	531.43	577.71	613.71
10	666.86	657.43	576.29	498.86	597.71
11	545.14	608.57	563.14	496.86	596.29
12	604.86	546.57	512.29	525.14	606.29
13	600.00	538.00	578.86	589.71	586.86
14	498.86	651.14	612.29	483.71	614.00
15	564.00	607.14	591.71	528.57	596.86
ค่าเฉลี่ย	576.15	599.22	576.65	538.48	609.24
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	51.24	41.54	36.78	40.32	17.66

## การวิเคราะห์ผลทางสถิติของอัตราส่วนการยึดตัว

## Descriptives

## อัตราส่วนการยึดตัว

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
Factor II	15	576.1524	51.2383	13.2297	547.7776	604.5272	494.57	666.86
Kaolin	15	599.2190	41.5373	10.7249	576.2165	622.2216	538.00	658.86
Zinc oxide	15	576.6476	36.7769	9.4958	556.2812	597.0140	512.29	656.86
Titanium oxide	15	538.4762	40.3202	10.4106	516.1476	560.8048	483.71	616.29
Control	15	609.2381	17.6637	4.5608	599.4562	619.0199	586.86	640.00
Total	75	579.9467	45.2607	5.2263	569.5331	590.3602	483.71	666.86

## ANOVA

## อัตราส่วนการยึดตัว

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	44617.398	4	11154.349	7.299	.000
Within Groups	106973.736	70	1528.196		
Total	151591.134	74			

การเปรียบเทียบเชิงซ้อนของค่าอัตราส่วนการยึดตัวด้วยแบบทดสอบของดันแคน

อัตราส่วนการยึดตัว

Duncan

	N	Subset for alpha = .05		
BRAND		1	2	3
ไททาเนียมออกไซด์	15	538.4762		
สารทึบแสง Factor II	15		576.1524	
สังกะสี ออกไซด์	15		576.6476	
ดินขาว	15		599.2190	599.2190
กลุ่มควบคุม	15			609.2381
Sig.		1.000	.132	.485

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a Uses Harmonic Mean Sample Size = 15.000.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว กุสลี ทองปูลสะ เกิดเมื่อวันที่ 30 มีนาคม พ.ศ. 2517 เป็นบุตรของ นาย วิวัฒน์ และ พันเอก (พิเศษ) สมพร ทองปูลสะ ได้รับการศึกษาในระดับประถมและมัธยมต้นที่ โรงเรียนราชินี ตั้งแต่ปี 2521-2531 ศึกษาในระดับมัธยมปลายที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา ตั้งแต่ปี 2532-2533 และได้เข้ารับการศึกษาคณะทันตแพทยศาสตรจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตั้งแต่ปี 2534-2539 ได้รับพระราชทานปริญญาทันตแพทยศาสตรบัณฑิตในปี 2540 เข้ารับราชการใน ตำแหน่งทันตแพทย์ 4 ในหน่วยบูรณะช่องปากและใบหน้า โรงพยาบาลคณะทันตแพทยศาสตรจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยตั้งแต่ปี 2540จนถึงปัจจุบัน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย