

ไฟล์ล็อกเซนเตรียมมาจากกระบวนการไซล-เจล/อะคริเลตสำหรับสารเคลือบผิวไฮบริดที่บ่มด้วยรังสียูวี

นายวีพอล ประมวลกิจจา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

SILOXANE PREPARED FROM SOL-GEL PROCESS/ACRYLATE FOR
UV-CURABLE HYBRID COATINGS

Mr. Weepol Pramualkijja

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ไซลิคเซนเตรียมจากกระบวนการไซล-เจล/อะคริเลตสำหรับ
สารเคลือบผิวไฮบริดที่บ่มด้วยรังสียูวี

โดย

นายวีพอล ประมวลกิจจา

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นันทนา จิรธรรมนุกุล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โภธิยะราชา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นันทนา จิรธรรมนุกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชลธิชา นุ่มหอม)

วิพอล ประมวลกิจจา : ไฮล็อกเซนเตรียมจากกระบวนการโซล-เจล/อะคริเลตสำหรับ
 สารเคลือบผิวไฮบริดที่บ่มด้วยรังสียูวี. (SILOXANE PREPARED FROM SOL-GEL
 PROCESS/ACRYLATE FOR UV-CURABLE HYBRID COATINGS) อ. ที่ปรึกษา
 วิทยานิพนธ์หลัก : ศศ.ดร. นันทนา จิรธรรมนุกูล, 103 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมสารเคลือบผิวไฮบริดระหว่าง
 สารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตกับพอลิไฮล็อกเซน ที่ทำการบ่มด้วยรังสียูวี ให้เคลือบ
 ลงบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิก ได้ สารเคลือบผิวไฮบริดได้จากการเติมสารประกอบ
 ไฮล็อกเซนที่เตรียมจากกระบวนการโซลเจล แบบ Si1-1, Si1-2, Si2-1 และ Si2-2 ร้อยละ
 1-40 โดยน้ำหนักลงในสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตและใช้สารเริ่มปฏิกิริยาทางแสง
 Darocur 1173 ในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของเรซิน และสารเคลือบผิวทำการตรวจสอบ
 คุณลักษณะได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของพันธะคาร์บอนด้วยเครื่อง ATR-IR เสถียรภาพทาง
 ความร้อนด้วยเครื่อง TGA และระดับการเชื่อมขวางของโครงสร้างพอลิไฮล็อกเซนด้วยเครื่อง
²⁹Si-NMR และทดสอบสมบัติกายภาพของฟิล์มสารเคลือบบนแผ่นอะคริลิกใส โดยสูตร
 สารเคลือบไฮบริดที่เติมสารประกอบแบบ Si 1-2 ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักเกิดการเปลี่ยนแปลง
 ของพันธะคู่และระดับการเชื่อมขวางในโครงสร้างของพอลิไฮล็อกเซนสูงและฟิล์มไฮบริดที่ได้มี
 ความแข็งแรงและการติดแน่นกับแผ่นอะคริลิกได้ดี แต่สูตรที่ได้เมื่อเคลือบ ลงบนฐานพื้นปอลิเมอร์
 อะคริลิกพบว่าฟิล์มเกิดรอยแตก จึง แก้ไขโดยเติมตัวเชื่อมขวางว่องไวที่มีความยืดหยุ่น และลด
 ปริมาณการเติมสารประกอบไฮล็อกเซน จากร้อยละ 40 เปลี่ยนเป็น ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก
 จากนั้นสารเคลือบไฮบริดบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิก ทำการบ่มด้วยความเข้มของ รังสีเท่ากับ
 3,000 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร และฟิล์มไฮบริดที่ได้นำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพและ
 เปรียบเทียบกับฟิล์ม จากสารเคลือบทางการค้า โดยฟิล์มไฮบริดมีความเงาในระดับที่ดี และมี
 สมบัติด้านความแข็งแรง การติดแน่น และความทนน้ำดีกว่าฟิล์มจากสารเคลือบทางการค้า

ภาควิชา วัสดุศาสตร์..... ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2554.....

5272546823 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS : HYBRID COATINGS / SOL-GEL / UV CURING / DENTURE BASE /
HARDNESS

WEEPOL PRAMUALKIJJA : SILOXANE PREPARED FROM SOL-GEL
PROCESS/ACRYLATE FOR UV-CURABLE HYBRID COATINGS. ADVISOR :
ASST. PROF. NANTANA JIRATUMNUKUL, Ph.D., 103 pp.

The objective of this research is to prepare UV-curable hybrid coating for denture base. The hybrid coatings of urethane-acrylate and polysiloxane were prepared by addition of 0-40 % by weight of each type of siloxane from sol-gel process (Si 1-1, Si1-2 Si2-1 and Si 2-2) into urethane-acrylate resin with 4 phr of Darocure 1173 as a photoinitiator. The conversion of C=C bond of hybrid coatings were analyzed by ATR-IR. The TGA and ²⁹Si-NMR were used to characterize thermal stability and degree of crosslinking of structural polysiloxane in hybrid coatings. Beside, the physical properties of hybrid coatings were examined. The hybrid coatings with 40% by weight of Si 1-2 presented high conversion of C=C bond and degree of crosslinking in structural polysiloxane. Moreover, good hardness and adhesion of hybrid coating films on clear acrylate substrates were found. However, the obtained hybrid coating films showed some crack marks when it was coated on acrylic denture base. This problem was solved by addition of flexible reactive diluents and reduction of amount of siloxane from 40% to 30% by weight. The hybrid coatings were cured by UV radiation energy of 3,000 mJ/cm² and physical properties testing were taken relative to commercial resin. The obtained hybrid coating films provided higher gloss and hardness, better adhesion and water resistance than coatings that used commercial resin.

Department : Materials Science..... Student's Signature.....

Field of Study : Applied Polymer Science and Textile Technology Advisor's Signature.....

Academic Year : 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ได้อย่างสมบูรณ์ด้วยความอนุเคราะห์ที่เอื้อเฟื้อจากผู้เชี่ยวชาญและผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่าง ๆ ด้วยการให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำวิจัยวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดีเสมอมา ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องซึ่งมีรายนามดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นันทนา จิรธรรมนุกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษาแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคำแนะนำการแก้ไขปัญหา ให้ข้อคิดเห็นและการสนับสนุนงานวิจัยเป็นอย่างดีและกรุณาในการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โภธิยะราช ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์ กรรมการสอบสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งรองศาสตราจารย์ ดร. ชลธิชา นุ่มหอม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์จากภายนอกมหาวิทยาลัยที่ให้คำแนะนำด้านวิชาการ และกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมถึงบุคลากรทุกท่านในภาควิชา ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความอนุเคราะห์ด้านทุนการศึกษา 1 ปี

ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำหรับที่เอื้อเฟื้อทุนในการดำเนินงานวิจัยทางด้านค่าใช้จ่าย วัสดุอุปกรณ์ และค่าสารเคมีตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และขอบคุณพี่น้องและเพื่อน ๆ ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงสมบูรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 วารสารปริทรรศน์.....	4
2.1 สารเคลือบผิว (coatings).....	4
2.1.1 จุดประสงค์ของการเคลือบสารเคลือบผิว.....	4
2.1.2 องค์ประกอบของสารเคลือบผิว.....	4
2.2 สารเคลือบผิวอินทรีย์.....	5
2.2.1 ยูรีเทนเรซิน (urethane resin).....	5
2.2.2 อะคริลิกเรซิน (acrylic resin).....	5
2.3 สารเคลือบผิวอนินทรีย์.....	6
2.4 สารเคลือบผิวไฮบริด.....	7
2.5 กระบวนการโซลเจล.....	10
2.6 การเกิดฟิล์ม.....	12
2.7 การบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสียูวี.....	12
2.7.1 การบ่มสารเคลือบผิวด้วยลำแสงอิเล็กตรอน (electron beams curing).....	13

บทที่	หน้า
2.7.2 การบ่มสารเคลือบผิวด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet curing).....	13
2.7.2.1 แสงอัลตราไวโอเล็ต.....	14
2.7.2.2 องค์ประกอบของสารเคลือบผิวที่สามารถบ่มได้ด้วยรังสียูวี...	15
2.7.2.3 สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง (photoinitiator).....	15
2.7.2.4 โอลิโกเมอร์หรือมอนอเมอร์.....	20
2.7.2.5 ตัวเจือจางว่องไว (reactive diluents).....	23
2.7.2.6 สารเติมแต่ง (additives).....	25
2.7.2.7 ข้อดีของการบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสียูวี.....	25
2.7.2.8 ความปลอดภัยของรังสียูวี.....	25
2.8 ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับสารเคลือบผิว.....	26
2.8.1 รอยแตก.....	26
2.8.2 การเป็นรูเข็มและการเป็นหลุม.....	26
2.8.3 ลักษณะผิวส้ม.....	26
2.8.4 การเป็นคลื่น.....	27
2.9 พื้นฐานพอลิเมอร์อะคริลิก.....	27
2.9.1 วัสดุที่ใช้ทำฐานฟันปลอม.....	27
2.9.2 คุณสมบัติคุณสมบัติของวัสดุฐานฟันปลอม.....	27
2.9.3 วัสดุฐานฟันปลอมอะคริลิก.....	28
2.9.3.1 วัสดุฐานฟันปลอมอะคริลิกชนิดที่บ่มด้วยความร้อน (heat-cured denture base acrylic resin).....	29
2.9.3.2 วัสดุฐานฟันปลอมอะคริลิกชนิดที่บ่มตัวเอง (self-cured denture base acrylic resin or cold-cured denture base acrylic resin).....	32
2.9.3.3 วัสดุฐานฟันปลอมชนิดบ่มด้วยแสงที่ตามองเห็น (visible light-cured materials).....	33
2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	43

บทที่	หน้า
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	43
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต.....	43
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบไฮล๊อกเซนด้วยกระบวนการ โซลเจล.....	43
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	44
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารเคลือบผิวแลสารประกอบ ไฮล๊อกเซน.....	44
3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มและบ่มสารเคลือบผิว.....	44
3.2.3 วัสดุที่ใช้เป็นฐานเคลือบ.....	44
3.2.4 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	44
3.3 ขั้นตอนการวิจัย.....	45
3.4 การเตรียมสารประกอบไฮล๊อกเซน.....	46
3.5 การเตรียมสูตรสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต.....	47
3.5.1 ตัวแปรที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสาร เคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต.....	47
3.6 การเตรียมสารเคลือบผิวไฮบริดบนแผ่นอะคริลิกใส.....	48
3.6.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคุณลักษณะและสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม สารเคลือบผิวไฮบริด.....	49
3.6.2 การตรวจสอบคุณลักษณะของฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริด.....	49
3.6.3 การทดสอบสมบัติกายภาพของฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริด.....	50
3.7 การเตรียมและการวิเคราะห์สารเคลือบผิวไฮบริดบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิก..	51
3.7.1 การตรวจสอบคุณลักษณะของสารเคลือบผิวไฮบริดที่ทำการพัฒนาให้ สามารถเคลือบลงบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิกและทำการบ่มด้วยรังสี ยูวีได้.....	51
3.8 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริดกับฟิล์มที่ ได้จากการใช้สารเคลือบทางการค้า.....	51
3.9 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน.....	52

บทที่	หน้า
3.10 การตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อน.....	53
3.11 การตรวจสอบระดับการเชื่อมขวางในโครงสร้างของพอลิไซล๊อกเซน.....	53
3.12 การตรวจสอบคุณสมบัติเปลี่ยนสภาพแก้ว.....	53
3.13 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มสารเคลือบ.....	54
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	53
4.1 คุณลักษณะของสารประกอบไซล๊อกเซน.....	57
4.2 การเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสารเคลือบผิวยูรีเทนอะครีเลต.....	58
4.3 คุณลักษณะและสมบัติทางกายภาพของสารเคลือบผิวไฮบริด.....	61
4.3.1 ลักษณะภายนอกของสารเคลือบผิวไฮบริด.....	61
4.3.2 การเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน.....	61
4.3.3 เสถียรภาพทางความร้อน.....	65
4.3.4 การวิเคราะห์ระดับการเชื่อมขวางในโครงสร้างของพอลิไซล๊อกเซน.....	67
4.3.5 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มไฮบริดที่บ่มด้วยรังสียูวีบนแผ่นอะครีลิค.....	70
4.4 การปรับสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่บ่มด้วยรังสียูวีบนฐานพื้นปอลออะครีลิค เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องบนผิวฟิล์ม.....	73
4.4.1 การเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสารเคลือบผิวไฮบริดที่บ่ม ด้วยรังสียูวีบนฐานเคลือบฐานพื้นปอลออะครีลิค.....	78
4.4.2 คุณสมบัติเปลี่ยนสภาพแก้วของสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่ใช้เคลือบ บนฐานพื้นปอลออะครีลิค.....	82
4.4.3 เสถียรภาพทางความร้อนของสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่ใช้เคลือบบน ฐานพื้นปอลออะครีลิค.....	83
4.5 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริดบนฐานพื้นปอลออะครีลิค..	84
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	86
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	87
รายการอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก.....	92

บทที่	หน้า
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	103

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์.....	8
3.1	สูตรสารประกอบไฮดรอกเซน.....	46
3.2	สูตรสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต.....	48
3.3	สูตรสารเคลือบผิวไฮบริด.....	50
4.1	ปริมาณคาร์บอนของสูตรสารเคลือบผิวไฮบริด.....	67
4.2	การติดแน่นของสูตรสารเคลือบผิวไฮบริด.....	72
4.3	ลักษณะการแตกของฟิล์มเนื่องจากองค์ประกอบในสารเคลือบผิวไฮบริด.....	74
4.4	ลักษณะของฟิล์มสารเคลือบบนฐานของฟันปลอมอะคริลิกเพื่อแก้ไขการเกิด รอยแตก.....	75
4.5	ลักษณะของฟิล์มสารเคลือบบนฐานฟันปลอมอะคริลิกเพื่อแก้ไขการเกิดตปลา..	77
4.6	ลักษณะของฟิล์มสารเคลือบบนฐานฟันปลอมอะคริลิกเพื่อแก้ไขการเกิด ฟองอากาศโดยการเปลี่ยนวิธีการขึ้นรูป.....	77
4.7	ลักษณะของฟิล์มสารเคลือบบนฐานฟันปลอมอะคริลิกเพื่อแก้ไขการเกิด ฟองอากาศโดยการลดปริมาณ UA+HDDA และแทนที่ด้วย TMPTA.....	78
4.8	ผลการทดสอบความแข็ง การติดแน่น และความเงาของฟิล์มสารเคลือบจาก สูตร UA1-2-Da4:Si1-2 70:30 W4และการใช้สารเคลือบทางการค้า.....	85

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ฐานฟันปลอมอะคริลิก.....	1
1.2	รูปฟันขนาดเล็กในฐานฟันปลอมอะคริลิก.....	1
1.3	การสะสมของแบคทีเรียในรูปฟันในฐานฟันปลอมอะคริลิก.....	1
1.4	รอยแตกบนฟิล์มสารเคลือบผิวอินทรีย์ (ก) และฟิล์มสารเคลือบผิวอินทรีย์ ผสมสารเคลือบผิวอินทรีย์ (ข).....	2
2.1	ปฏิกิริยาการเกิดพอลิยูรีเทน.....	5
2.2	ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมทิลเมทาคริลิต.....	6
2.3	โครงสร้างทางเคมีของพอลิไซลิลอกเซน.....	7
2.4	โครงสร้างทางเคมีของซิงค์ซิลิเกต.....	7
2.5	การยึดติดกันระหว่างสารเคลือบผิวอินทรีย์กับสารเคลือบผิวอินทรีย์ด้วยพันธะ ชนิดต่าง ๆ.....	8
2.6	สารเคลือบผิวไฮบริดที่มีสารเคลือบผิวอินทรีย์เป็นเมทริกซ์เรซิน.....	9
2.7	สารเคลือบผิวไฮบริดที่เป็นร่างแหพอลิเมอร์แบบสอดไขว้.....	9
2.8	สารเคลือบผิวไฮบริดจริง.....	10
2.9	กระบวนการเกิดโซลเจล.....	11
2.10	การเตรียมสารเคลือบผิวไฮบริดแบบสารเคลือบผิวไฮบริดจริงด้วยกระบวนการ โซลเจล.....	12
2.11	การบ่มสารเคลือบด้วยการใช้ลำแสงอิเล็กตรอน.....	13
2.12	การบ่มสารเคลือบด้วยการใช้รังสียูวี.....	14
2.13	สเปกตรัมของแสงยูวี.....	14
2.14	การแตกตัวให้อนุมูลอิสระของสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง.....	16
2.15	การแตกตัวให้อนุมูลอิสระของสารริเริ่มปฏิกิริยา Norrish type I.....	17
2.16	ตัวอย่างสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงที่เกิดการแตกตัวให้อนุมูลอิสระแบบ Norrish type I.....	18
2.17	การแตกตัวให้อนุมูลอิสระของสารริเริ่มปฏิกิริยา Norrish type II.....	18

รูปที่	หน้า	
2.18	ตัวอย่างสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงที่เกิดการแตกตัวให้อนุมูลอิสระแบบ Norrish type II.....	19
2.19	การเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์โดยแสงแบบประจุบวก.....	19
2.20	ตัวอย่างของสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงชนิดประจุบวก.....	20
2.21	โครงสร้างทางเคมีของโพลิโเมอร์จำพวกอะครีเลต.....	21
2.22	โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบอีพอกไซด์.....	22
2.23	การเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์โดยแสงที่มีกลไกแบบประจุบวกของไวโนลอีเทอร์.....	22
2.24	โครงสร้างทางเคมีของ 1, 6 เฮกเซนไดออกไซด์อะครีเลต.....	23
2.25	โครงสร้างทางเคมีของไตรเมทิลอลโพรเพนไตรอะครีเลต.....	24
2.26	โครงสร้างทางเคมีของไตรโพรเพนไกลคอลไดอะครีเลต.....	24
2.27	การลดลงของ IR สเปกตรัมที่เลขคลื่น $1,410\text{ cm}^{-1}$ ที่แสดงถึงหมู่ไวนิล ($-\text{HC}=\text{CH}_2$) ในสารเคลือบผิว.....	36
3.1	ขั้นตอนการวิจัย.....	45
3.2	แท่งปาดฟิล์ม 4 ด้าน (applicator).....	48
3.3	เครื่องบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสียูวีรุ่น UVTEC12.....	48
3.4	งานวัดความเข้มของรังสียูวีรุ่น UV-Integrator.....	48
3.5	Attenuated Total reflectance infrared spectrometer (ATR-IR) รุ่น NICOLET 6700.....	52
3.6	Thermal gravimetric analyzer (TGA) รุ่น TG/SDTA851.....	53
3.7	เครื่องมือทดสอบการชุบขีด.....	54
3.8	อุปกรณ์มีคมปาด.....	55
3.9	ภาพมาตรฐานแสดงถึงระดับการติดแน่น.....	55
3.10	เครื่องวัดความเงา.....	56
4.1	IR สเปกตรัมของสารประกอบไฮลิกอกเซนแบบ Si 1-1, Si2-1, Si1-2 และ Si2-2.....	57
4.2	IR สเปกตรัมของสูตรUA1-Ir4 ก่อนทำการบ่ม (ก) และหลังทำการบ่ม (ข).....	59
4.3	IR สเปกตรัมของสูตรUA1-Da4 ก่อนทำการบ่ม (ก) และหลังทำการบ่ม (ข).....	59

รูปที่		หน้า
4.4	IR สเปกตรัมของสูตรUA1-Da4 ที่ใช้ความเข้มของรังสียูวีในการบ่มเท่ากับ 6,000 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตรก่อนทำการบ่ม (ก) และหลังทำการบ่ม (ข)	60
4.5	กราฟแสดงค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสูตรสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต.....	60
4.6	ลักษณะภายนอกของสารเคลือบผิวไฮบริดที่เติมสารประกอบไซลิลอกเซนแบบ Si1-1 (ก) แบบSi1-2 (ข) แบบSi1-2 (ค) และแบบSi2-2 (ง).....	61
4.7	IR สเปกตรัมของสูตรUA1-Da4: Si1-1 60:40 ก่อนทำการบ่ม (ก) และหลังทำการบ่ม (ข).....	63
4.8	IR สเปกตรัมของสูตรUA1-Da4: Si2-1 60:40 ก่อนทำการบ่ม (ก) และหลังทำการบ่ม (ข).....	64
4.9	IR สเปกตรัมของสูตรUA1-Da4: Si1-2 60:40 ก่อนทำการบ่ม (ก) และหลังทำการบ่ม (ข).....	64
4.10	IR สเปกตรัมของสูตรUA1-Da4: Si2-2 60:40 ก่อนทำการบ่ม (ก) และหลังทำการบ่ม (ข).....	64
4.11	ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่ไม่ทำการเติมและทำการเติมสารประกอบไซลิลอกเซนแบบ Si 1-1 และ Si 2-1 ในปริมาณร้อยละ 4-40 โดยน้ำหนัก.....	65
4.12	ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่ไม่ทำการเติมและทำการเติมสารประกอบไซลิลอกเซนแบบ Si 1-1 Si 2-1 Si1-2 และ Si2-2 ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก.....	65
4.13	การสลายตัวด้วยความร้อนของสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่ไม่มีการเติมและมีการเติมสารประกอบไซลิลอกเซนแบบ Si 1-1 ในปริมาณ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก และแบบ Si 1-2 ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก.....	66
4.14	การสลายตัวด้วยความร้อนของสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่ไม่มีการเติมและมีการเติมสารประกอบไซลิลอกเซนแบบ Si 2-1 ในปริมาณร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก และ แบบ Si 2-2 ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก.....	67

รูปที่	หน้า	
4.15	โครงสร้างไฮเลนอลจากTEOS ที่ไม่เกิดพันธะไฮล๊อกเซน (ก) เกิดพันธะไฮล๊อกเซน 1 พันธะ (ข) 2 พันธะ (ค) 3 พันธะ (ง) และ 4 พันธะ (จ).....	69
4.16	โครงสร้างไฮเลนอลจาก VTOS ที่ไม่เกิดพันธะไฮล๊อกเซน (ก) เกิดพันธะไฮล๊อกเซน 1 พันธะ (ข) 2 พันธะ (ค) และ 3 พันธะ (ง).....	69
4.17	²⁹ Si-NMR กราฟของสารเคลือบผิวไฮบริดที่ทำการเติมสารประกอบไฮล๊อกเซนแบบ Si 1-2 และ Si 2-2 ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก.....	69
4.18	สมบัติด้านความแข็งของฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริดที่ไม่มีการเติมและเติมสารประกอบไฮล๊อกเซนแบบ Si 1-1 และ Si 2-1 ในปริมาณร้อยละ 4-40 โดยน้ำหนัก.....	70
4.19	สมบัติด้านความแข็งของฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริดที่เติมสารประกอบไฮล๊อกเซนแบบ Si 1-1 Si 1-2 Si 2-1 และ Si 2-2 ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก.....	71
4.20	IR สเปกตรัมของสูตร UA1-1-Da4 ก่อนทำการบ่ม (ก) หลังทำการบ่ม (ข).....	80
4.21	IR สเปกตรัมของสูตร UA1-1-Da4:Si1-2 70:30 W1 ก่อนทำการบ่ม (ก) หลังทำการบ่ม (ข).....	80
4.22	IR สเปกตรัมของสูตร UA1-1-Da4:Si1-2 70:30 W4 ก่อนทำการบ่ม (ก) หลังทำการบ่ม (ข).....	81
4.23	IR สเปกตรัมของสูตร UA1-2-Da4:Si1-2 70:30 W4 ก่อนทำการบ่ม (ก) หลังทำการบ่ม (ข).....	81
4.24	ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสารเคลือบผิวไฮบริดที่พัฒนาเพื่อเคลือบลงบนฐานพื้นปอลิอิมอะคริลิก.....	82
4.25	อุณหภูมิสถานะแก้วของสารเคลือบผิวไฮบริดสูตร UA1-2-Da4 และสูตร UA1-2-Da4:Si1-2 70:30 W4.....	83
4.26	การสลายตัวด้วยความร้อนของสารเคลือบผิวไฮบริดสูตร UA1-2-Da4 และสูตร UA1-2-Da4:Si1-2 70:30 W4.....	84
4.27	ฟิล์มสารเคลือบไฮบริด UA1-2-Da4:Si1-2 70:30 W4 และฟิล์มจากสารเคลือบทางการค้าก่อนและหลังทดสอบความทนน้ำ.....	85

บทที่ 1

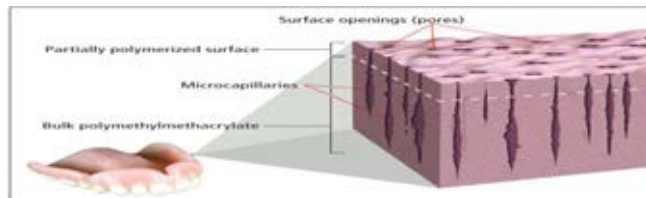
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

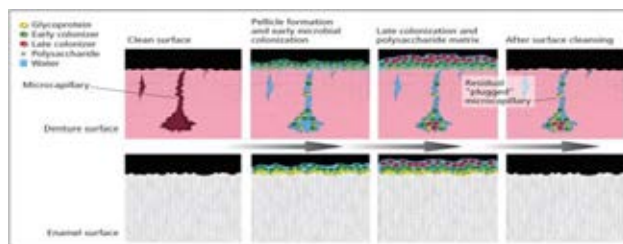
ฐานฟันปลอมในปัจจุบันผลิตจากวัสดุพอลิเมทิลเมทาคริเลต (polymethylmethacrylate) หรือเรียกว่าฐานฟันปลอมอะคริลิกดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งสามารถเกิดรอยขีดได้ง่าย และจากการวิจัยของ Anthony และคณะ [1] พบรูพรุนขนาดเล็ก (pores) ดังรูปที่ 1.2 ในการนำไปใช้งาน รอยขีดที่เกิดขึ้นและรูพรุนจะเกิดการสะสมของเศษอาหารได้และกลายเป็นแหล่งกำเนิดและที่อาศัยของแบคทีเรียต่าง ๆ จึงนำสารเคลือบผิวที่มีความต้านทานต่อการเกิดรอยขีดและสามารถยึดติดบนฐานฟันปลอมอะคริลิกได้ดีมาเคลือบเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.1 ฐานฟันปลอมอะคริลิก [1]



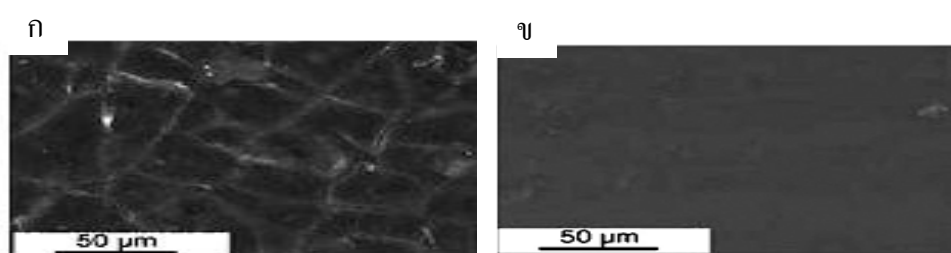
รูปที่ 1.2 รูพรุนขนาดเล็กในฐานฟันปลอมอะคริลิก [1]



รูปที่ 1.3 การสะสมของแบคทีเรียในรูพรุนของฐานฟันปลอมอะคริลิก [1]

สารเคลือบผิวที่ใช้สำหรับป้องกันการเกิดรอยขีดมีทั้งที่เป็นสารเคลือบผิวอินทรีย์ซึ่งใช้สารอินทรีย์เป็นสารยึดได้แก่ พอลิยูรีเทน และพอลิอะคริเลต และสารเคลือบผิวอนินทรีย์ซึ่งใช้สารอนินทรีย์เป็นสารยึดได้แก่ พอลิไซลิกอกเซน และซิงค์ซิลิเกต โดยสารเคลือบผิวอนินทรีย์มีความสามารถในการป้องกันการเกิดรอยขีดได้สูงกว่าแต่สารเคลือบผิวอนินทรีย์มีปัญหา

ทางด้านกรขึ้นรูปเนื่องจากฟิล์มที่ได้มีความสามารถในการขยายและหดตัวได้ต่ำทำให้ฟิล์มเกิดรอยแตก (crack) เมื่อฟิล์มมีความหนาหรืออุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มสูงเกินไป จากการวิจัยของ Wang และคณะ [2] พบการแตกของฟิล์มสารเคลือบผิวพอลิไซลิลอกเซนต์รูปที่ 1.4ก ที่เตรียมจากกระบวนการโซลเจลและมีความหนาของฟิล์มเท่ากับ 4 ไมโครเมตร จึงนำสารเคลือบผิวอินทรีย์ผสมลงไปเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวพบว่าสารเคลือบผิวไม่เกิดรอยแตก ดังรูปที่ 1.4ข เนื่องจากสารเคลือบผิวอินทรีย์มีความยืดหยุ่นจึงทำให้ฟิล์มเกิดการขยายตัวได้มากขึ้น



รูปที่ 1.4 แสดงรอยแตกบนฟิล์มสารเคลือบผิวอินทรีย์ (ก) และฟิล์มสารเคลือบผิวอินทรีย์ผสมสารเคลือบผิวอินทรีย์ (ข) [2]

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาสารเคลือบผิวใหม่เพื่อปรับปรุงให้มีสมบัติตามต้องการ สารเคลือบผิวไฮบริดเป็นการพัฒนาสารเคลือบที่นำสนใจแนวทางหนึ่ง สารเคลือบผิวไฮบริดเป็นการผสมกันของสารเคลือบผิวอินทรีย์กับสารเคลือบผิวอนินทรีย์ จึงเป็นการรวมสมบัติที่เด่นของสารเคลือบผิวอินทรีย์ได้แก่ ความยืดหยุ่น และการขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่ง่าย และสารเคลือบผิวอนินทรีย์ได้แก่ ความแข็ง ความทนต่อเคมีภัณฑ์ และความเสถียรต่อความร้อน ดังนั้นจึงมีการใช้สารเคลือบผิวไฮบริดเคลือบบนผลิตภัณฑ์พลาสติกเพื่อป้องกันรอยขีดข่วน เช่น ฝาครอบไฟรถยนต์ และแผ่นซีดี

กระบวนการที่ใช้เพื่อเตรียมสารเคลือบผิวไฮบริดคือกระบวนการโซลเจลโดยเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากใช้ตัวทำละลายที่ไม่เป็นอันตรายและประหยัดพลังงานเนื่องจากปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิห้อง ในขั้นตอนการบ่มซึ่งทำให้ได้ฟิล์มแห้งได้พัฒนาโดยการนำรังสียูวีมาใช้ในการบ่มแทนการใช้ความร้อน สารเคลือบผิวที่บ่มด้วยรังสียูวีเป็นสารเคลือบผิวที่ไม่มีส่วนผสมของตัวทำละลาย การบ่มด้วยรังสียูวีช่วยลดเวลาในการแห้งตัวและเพิ่มความเร็วในการผลิต

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการพัฒนาสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่เตรียมได้จากกระบวนการโซลเจลและปมด้วยรังสียูวีเพื่อใช้เคลือบลงบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิกได้ สารเคลือบผิวประกอบด้วยสารเคลือบผิวอินทรีย์พวกอะคริเลตและสารเคลือบผิวอนินทรีย์พวกซิลิเกตเซ่น โดยทำการศึกษาค้นคว้าของชนิดสารเคลือบผิวอะคริเลตและสารประกอบซิลิเกตเซ่น และอัตราส่วนระหว่างสารทั้งสองต่อคุณลักษณะได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน ระดับการเชื่อมขวางในโครงสร้างของพอลิซิลิเกตเซ่น เสถียรภาพทางความร้อน และอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature; T_g) และสมบัติทางกายภาพได้แก่ ความแข็ง (hardness) การติดแน่น (adhesion) ความเงา (gloss) และความทนน้ำ (water resistance) และนำสูตรที่พัฒนาได้เปรียบเทียบกับสมบัติทางกายภาพกับสารเคลือบทางการค้า

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้สูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่เตรียมจากกระบวนการโซลเจลและปมด้วยรังสียูวีที่สามารถเคลือบลงบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิก และฟิล์มสารเคลือบที่ได้สามารถยึดติดและป้องกันการเกิดรอยขีดข่วนบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิก

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 สารเคลือบผิว (coatings) [3]

2.1.1 จุดประสงค์ของการเคลือบสารเคลือบผิว

สารเคลือบผิว (surface coatings) มีวัตถุประสงค์ของการนำมาใช้อยู่ด้วยกัน 2 ประการ คือ

(1) เพื่อป้องกันพื้นผิวของวัสดุจากภาวะที่ไม่พึงประสงค์ เช่น อากาศ น้ำ และเคมีภัณฑ์ นอกจากนี้ สารเคลือบผิวยังช่วยให้ผิวหน้าของวัสดุมีความแข็งแรงขึ้น ทนทานต่อการเกิดรอยขีดขูด ทำให้มีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ตัวอย่างของการป้องกันพื้นผิววัสดุ เช่น สารเคลือบผิวไม้ เพื่อป้องกันการผุพังของไม้เนื่องจากความชื้น สารเคลือบผิวเหล็กเพื่อป้องกันการเกิดสนิม และสารเคลือบผิวที่สามารถช่วยทำความสะอาดรอยเปื้อนของคราบสกปรกบนพื้นผิวคอนกรีตได้ง่ายขึ้น

(2) เพื่อตกแต่งพื้นผิวให้สวยงาม โดยความสวยงามของวัสดุหลังจากเคลือบผิวมาจาก สี ความเงา ลวดลายตกแต่ง และความสว่าง

2.1.2 องค์ประกอบของสารเคลือบผิว

สารเคลือบผิวโดยส่วนใหญ่ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบได้แก่

(1) ตัวยึด (binder) คือสารที่กลายเป็นฟิล์มติดแน่นอยู่บนผิวหน้าของวัสดุที่เคลือบ ตัวอย่างของสารยึดได้แก่ เรซินธรรมชาติ เรซินสังเคราะห์ เป็นต้น

(2) ตัวทำละลาย (solvent) คือสารที่ใช้ในการปรับความหนืดของสารเคลือบผิว เพื่อให้เหมาะต่อการผลิตหรือสะดวกต่อการใช้

(3) สารเติมแต่ง (additives) คือสารที่ช่วยให้สารเคลือบผิวมีสมบัติตามต้องการโดยใส่ในปริมาณเล็กน้อย

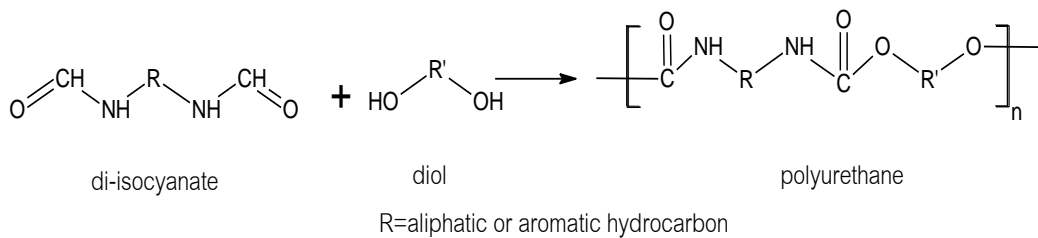
โดยทั่วไปสารเคลือบผิวแบ่งตามชนิดของตัวยึดออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ สารเคลือบผิวอินทรีย์ และสารเคลือบผิวอนินทรีย์ โดยสารเคลือบผิวอินทรีย์หมายถึงสารที่มีตัวยึดเป็นสารอินทรีย์ เช่น อะคริลิกเรซิน พอลิเอสเตอร์ เป็นต้น ส่วนสารเคลือบผิวอนินทรีย์หมายถึงสารที่มีตัวยึดเป็นสารอนินทรีย์ เช่น ซิลิโคนเรซิน ซิงค์ซิลิเกต นอกจากนี้ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาสาร

เคลือบผิวใหม่ๆมาใช้เพื่อเคลือบผิววัสดุต่าง ๆ ได้แก่สารเคลือบผิวไฮบริด โดยสารเคลือบผิวไฮบริดเป็นการผสมกันของสารเคลือบผิวอินทรีย์กับสารเคลือบผิวนินทรีย์

2.2 สารเคลือบผิวอินทรีย์ [3-5]

2.2.1 ยูรีเทนเรซิน (urethane resin)

ยูรีเทนเรซินคือพอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ยูรีเทน (-NHCOO-) พอลิยูรีเทนเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยานาตกับไดออลดังสมการ



(2.1)

รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิยูรีเทน

สมบัติของสารเคลือบผิวที่ได้จากพอลิยูรีเทนมีดังนี้

(1) พันธะยูรีเทนถูกไฮโดรลิซิสได้ยาก ดังนั้นสารเคลือบผิวจากพอลิยูรีเทนจึงทนต่อน้ำและกรดได้ดี นอกจากนี้พบว่าพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากแอลิแพติกไอโซไซยานาตมีความทนต่อการเกิดไฮโดรลิซิสได้มากกว่าที่เตรียมจากแอโรแมติกไอโซไซยานาต

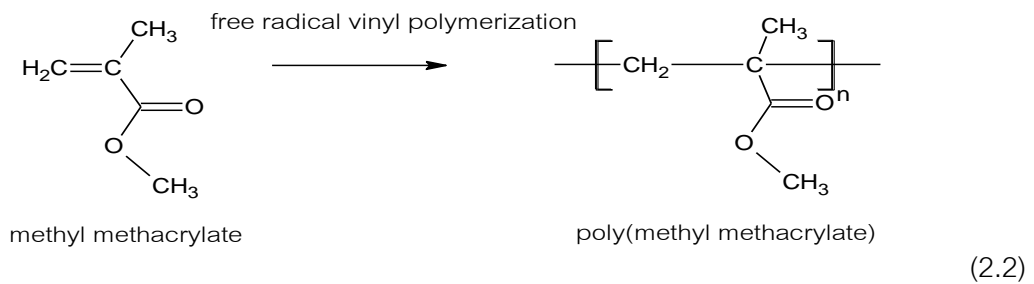
(2) फिल्मแห้งที่ได้มีสมบัติทางกายภาพและเชิงกลที่ดีได้แก่ การยึดติดกับผิวหน้าที่เคลือบ ความทนต่อการขีดสี และความเหนียว นอกจากนี้มีความทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศด้วย เนื่องจากสายโซ่ของพอลิเมอร์มีความเป็นขั้วสูง โดยเฉพาะอย่างหมู่แอมิโนและคาร์บอนิลซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้กับผิววัสดุที่เคลือบ

(3) สารเคลือบผิวพอลิยูรีเทนที่เตรียมจากแอโรแมติกไอโซไซยานาตกลายเป็นสีเหลืองได้ง่ายเมื่อถูกรังสียูวี แต่พอลิยูรีเทนที่เตรียมจากแอลิแพติกไอโซไซยานาตกลายเป็นสีเหลืองได้ยากกว่า

2.2.2 อะคริลิกเรซิน (acrylic resin)

อะคริลิกเรซินคือ พอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ร่วมที่เตรียมได้จากไวนิลมอนอเมอร์พวกกรดอะคริลิก อนุพันธ์ของกรดอะคริลิก เช่น กรดเมทาคริลิก และเอสเทอร์กรดของเหล่านี้

เช่น เมทิลเมทาคริเลต เกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบอนุมูลอิสระดังสมการ พิล์มของสารเคลือบผิวที่ได้หลังการแห้งตัวจะเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติก หากเรซินมีหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมผสมอยู่ด้วย อาจเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงกลายเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตได้

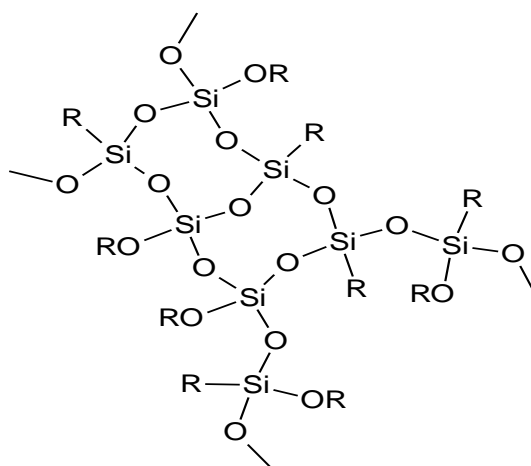


รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมทิลเมทาคริเลต

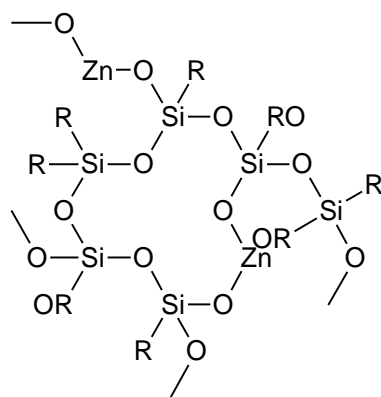
สมบัติที่เด่นของอะคริลิกเรซินได้แก่ ความทนต่อรังสียูวี ความทนต่อการเกิดไฮโดรลิซิส การยึดติดกับผิวหน้าของวัสดุต่าง ๆ ได้ดีเช่น โลหะ ไม้ เซรามิก และพลาสติก มีความแข็งแรงและทนทาน มีความเงาสูง และทนทานต่อเคมีภัณฑ์

2.3 สารเคลือบผิวอินทรีย์ [6,12]

สารเคลือบผิวอินทรีย์เป็นสารที่มีตัวยึดเป็นพอลิเมอร์อินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของธาตุซิลิกอน ซัลเฟอร์ หรือเซลีนียม ในสายโซ่หลัก เป็นต้น สารเคลือบผิวอินทรีย์ที่มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบได้แก่ พอลิไซล๊อกเซน และซิงค์ซิลิเกต โครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ โดยสารเคลือบผิวมีระดับของการเชื่อมขวางสูงด้วยพันธะไซล๊อกเซน (Si-O-Si) จึงมีสมบัติความแข็งแรงสูง และทนทานต่อเคมีภัณฑ์ แต่มีข้อเสียคือความเปราะและการขยายตัวต่ำเมื่อได้รับความร้อน



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของพอลิไซลิกเซน [6]

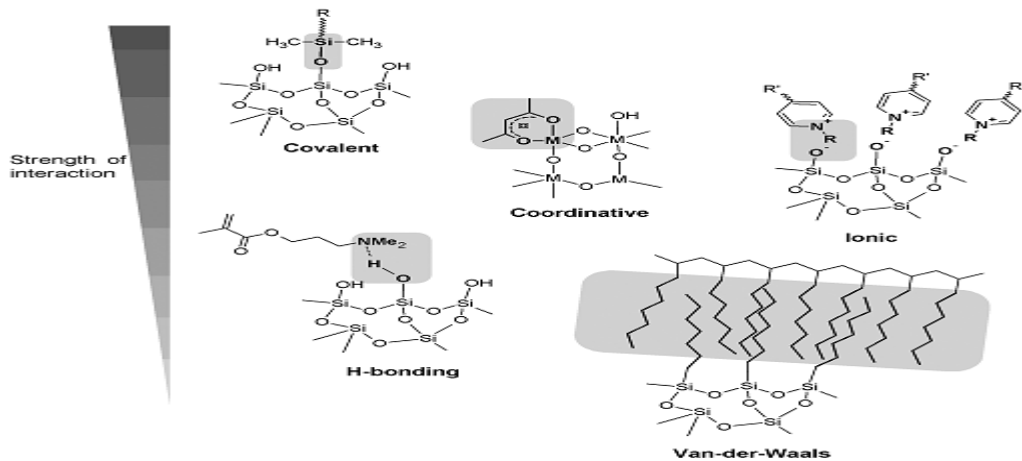


รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของซิงค์ซิลิเกต [6]

2.4 สารเคลือบผิวไฮบริด [4, 6-7,12]

สารเคลือบผิวไฮบริดคือ สารเคลือบผิวผสมระหว่างสารเคลือบผิวอินทรีย์กับสารเคลือบผิวอนินทรีย์ โดยสารเคลือบผิวทั้งสองชนิดยึดติดกันด้วยพันธะได้แก่ โควาเลนต์ อีออนิก ไฮโดรเจน และแวนเดอร์วาลส์ดังรูปที่ 2.5 โดยพันธะโควาเลนต์มีความแข็งแรงของพันธะสูงสุด การผสมกันระหว่างสารทั้งสองชนิดจึงเป็นการรวมคุณสมบัติที่ดีและช่วยแก้ไขข้อเสียของสารทั้งสอง สมบัติของสารเคลือบผิวทั้งสองชนิดแสดงดังตารางที่ 2.1 สารเคลือบผิวอนินทรีย์มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า ได้แก่ ความแข็งผิวซึ่งทำให้ทนต่อการเกิดรอยขีดขุดได้ดี เนื่องจากแรงยึดระหว่างพันธะในสายโซ่สูงกว่า จึงทำการเติมเพื่อช่วยให้สมบัติเชิงกลในสารเคลือบผิวอินทรีย์ดีขึ้น แต่การเคลือบด้วยสารเคลือบผิวอนินทรีย์มีข้อจำกัดในเรื่องของความหนาของฟิล์มหรือความร้อนในการบ่มมากเกินไปจะทำให้ฟิล์มเกิดรอยแตกได้เนื่องจากการเชื่อมขวางที่มากเกินไปทำให้เกิดการขยายตัวได้

ต่ำและมีความเปราะ การเติมสารเคลือบผิวอินทรีย์ช่วยให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นและการขยายตัวได้มากขึ้น และทำให้ชั้นรูปฟิล์มได้หนามากขึ้น สารเคลือบผิวไฮบริดได้มีการนำมาใช้ในงานด้านเคลือบผิวพลาสติกเช่น การเคลือบฝาครอบไฟรถ และแผ่นซีดี โดยมีจุดประสงค์เพื่อป้องกันการเกิดรอยขีดข่วน



รูปที่ 2.5 การยึดติดกันระหว่างสารเคลือบผิวอินทรีย์กับสารเคลือบผิวอนินทรีย์ด้วยพันธะชนิดต่างๆ [4]

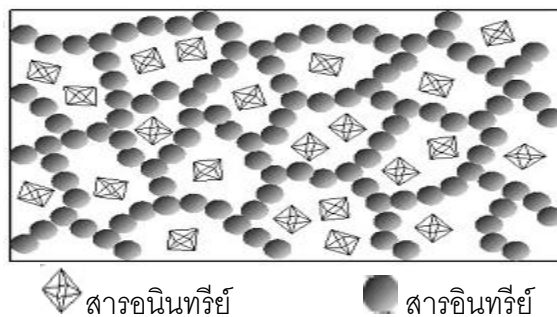
ตารางที่ 2.1 สมบัติสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

Properties	Organics (polymers)	Inorganics (SiO_2 , transition metal oxides (TMO))
Nature of bonds	covalent [C—C], van der Waals, H-bonding	ionic or ionic-covalent [M—O]
T_g	low (-120°C to 200°C)	high ($\gg 200^\circ\text{C}$)
Thermal stability	low ($< 350^\circ\text{C}$ – 450°C)	high ($\gg 100^\circ\text{C}$)
Density	0.9–1.2	2.0–4.0
Refractive index	1.2–1.6	1.15–2.7
Mechanical properties	elasticity plasticity rubbery (depending on T_g)	hardness strength fragility
Hydrophobicity	hydrophilic	hydrophilic
Permeability	hydrophobic \pm permeable to gases	low permeability to gases
Electronic properties	insulating to conductive redox properties	insulating to semiconductors (SiO_2 , TMO) redox properties (TMO) magnetic properties
Processability	high (molding, casting, film formation, control of viscosity)	low for powders high for sol-gel coatings

สารเคลือบผิวไฮบริดสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดดังนี้

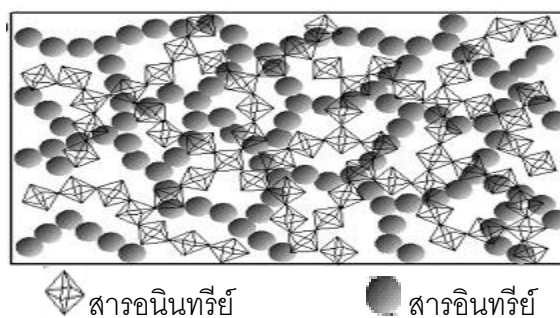
(1) สารเคลือบผิวไฮบริดที่มีสารเคลือบผิวอินทรีย์เป็นเมทริกซ์และสารเคลือบผิวอนินทรีย์ฝังและกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ โดยสารทั้งสองชนิดยึดติดกันด้วยพันธะทางกายภาพ เช่นการปรับปรุงสมบัติของซิงค์ซัลไฟด์ด้วยสารอินทรีย์

(2) สารเคลือบผิวไฮบริดที่มีสารเคลือบผิวอินทรีย์เป็นเมทริกซ์และสารเคลือบผิวอนินทรีย์ฝังและกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ดังรูปที่ 2.6 โดยสารทั้งสองชนิดยึดติดกันด้วยพันธะทางกายภาพ เช่นการใส่ผงสีอนินทรีย์ผสมในตัวยัดที่เป็นสารอินทรีย์



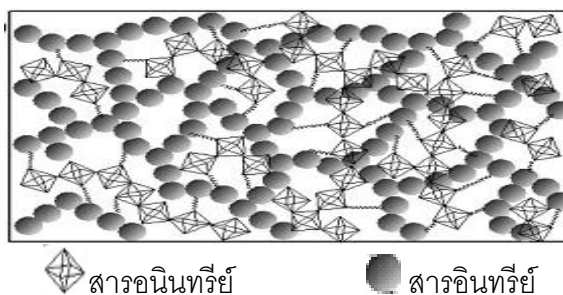
รูปที่ 2.6 สารเคลือบผิวไฮบริดที่มีสารเคลือบผิวอินทรีย์เป็นเมทริกซ์เรซิน [4]

(3) สารเคลือบผิวไฮบริดที่เป็นร่างแหพอลิเมอร์แบบสอดไขว้ (Interpenetrating polymer networks) ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งประกอบด้วยสารเคลือบผิวอินทรีย์และอนินทรีย์มีโครงสร้างพอลิเมอร์แบบร่างแห โดยสารทั้งสองชนิดยึดติดกันด้วยพันธะทางกายภาพ



รูปที่ 2.7 สารเคลือบผิวไฮบริดที่เป็นร่างแหพอลิเมอร์แบบสอดไขว้ [4]

(4) สารเคลือบผิวไฮบริดจริงดังรูปที่ 2.8 เป็นสารเคลือบผิวที่ประกอบด้วยสารเคลือบผิวอินทรีย์และอนินทรีย์โดยสารทั้งสองชนิดยึดติดกันด้วยพันธะทางเคมี



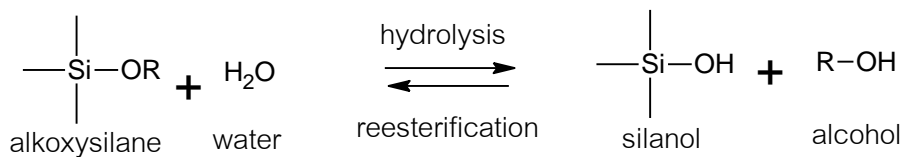
รูปที่ 2.8 สารเคลือบผิวไฮบริดจริง [4]

2.5 กระบวนการโซลเจล [4,6,12]

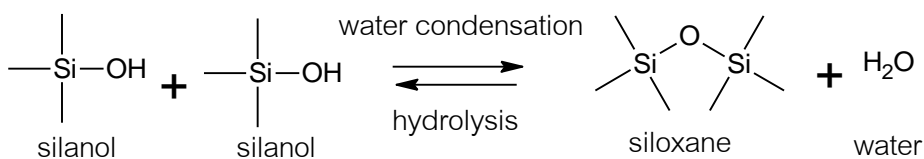
กระบวนการโซลเจลเป็นกระบวนการที่มีประโยชน์หลายอย่างในการผลิตเซรามิกและแก้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง โดยทั่วไปกระบวนการโซลเจลเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะของของเหลวที่เรียกว่าโซล ซึ่งส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอน เป็นของแข็งที่เรียกว่าเจล ปฏิริยาที่สำคัญในกระบวนการโซลเจลมี 3 ปฏิริยา คือ ไฮโดรลิซิส (hydrolysis) ปฏิริยาการควบแน่นที่ให้น้ำ (water condensation) และปฏิริยาการควบแน่นที่ให้สารประกอบแอลกอฮอล์ (alcohol condensation) สารตั้งต้นที่นิยมใช้เป็นสารประกอบโลหะและกึ่งโลหะที่ล้อมรอบด้วยลิแกนด์ที่ไวต่อการเกิดปฏิริยาไฮโดรลิซิสกับน้ำ โดยขั้นตอนแรกเกิดจากการผสมสารตั้งต้นเช่นสารประกอบแอลกอฮอล์ซิลิโคนกับน้ำ ได้อนุพันธ์ที่สามารถเกิดปฏิริยาควบแน่นดังสมการที่ 2.3 2.4 และ 2.5 จนสุดท้ายได้เป็นสารประกอบไฮล๊อกเซนซึ่งมีการเชื่อมขวางสูง

ข้อดีของกระบวนการโซลเจล

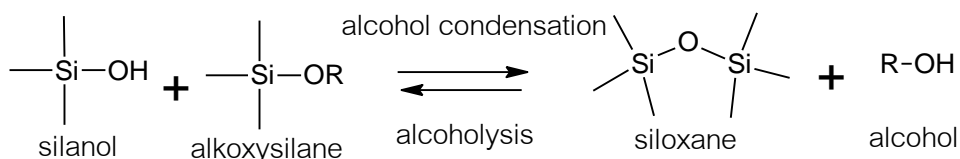
- ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง
- ประหยัดพลังงานเนื่องจากปฏิริยาเกิดได้ที่อุณหภูมิห้อง
- สามารถใช้ในการเตรียมพรีพอลิเมอร์อนินทรีย์ในสารละลาย
- สามารถใช้ในการเตรียมสารเคลือบผิวไฮบริด
- ใช้ในการปรับความเหนียวของสารเคลือบผิวได้



Hydrolysis



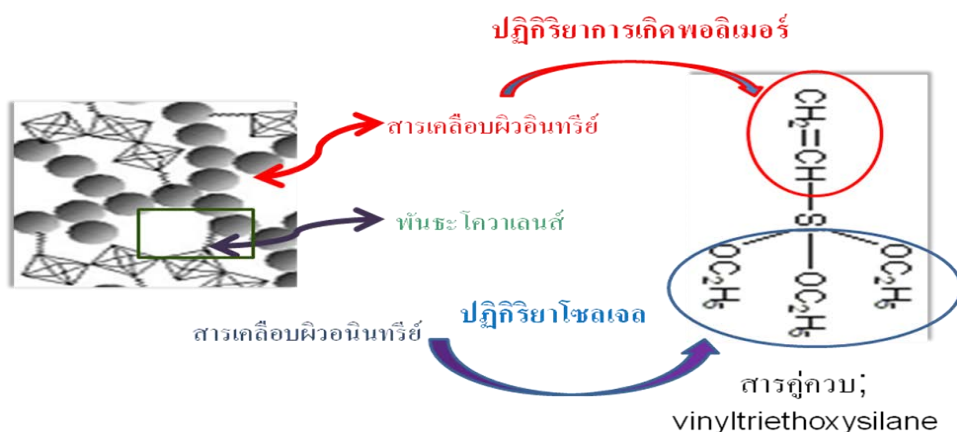
Water condensation



Alcohol condensation

รูปที่ 2.9 กระบวนการเกิดซิลเจล

กระบวนการซิลเจลเป็นกระบวนการที่นำมาใช้ในการเตรียมสารเคลือบผิวไฮบริดแบบสารเคลือบผิวไฮบริดจริงดังรูปที่ 2.10 โดยพอลิเมอร์อินทรีย์และอนินทรีย์ยึดติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดการยึดติดกันเรียกว่าสารคู่ควบ ตัวอย่างของสารคู่ควบได้แก่ ไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน (Vinyltriethoxysilane, VTOS) ที่มีหมู่ไวนิล ($-\text{H}_2\text{C}=\text{C}<$) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์กับสารเคลือบผิวอินทรีย์และหมู่เอทอกซี ($-\text{OC}_2\text{H}_5$) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาซิลเจลกับสารเคลือบผิวอนินทรีย์



รูปที่ 2.10 การเตรียมสารเคลือบผิวไฮบริดแบบสารเคลือบผิวไฮบริดจริงด้วยกระบวนการไฮโดรเจล

2.6 การเกิดฟิล์ม [8]

การเกิดฟิล์มคือการเปลี่ยนสภาพของสารเคลือบผิวที่เป็นของเหลวกลายเป็นฟิล์มที่เป็นของแข็งและยึดติดแน่นกับผิวหน้าของวัสดุที่เคลือบ และทำให้พื้นผิวมีสมบัติตามต้องการ กระบวนการเกิดฟิล์มแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ

(1) แอปพลิเคชัน (application) เป็นการนำสารเคลือบผิวไปเคลือบบนผิวหน้าโดยใช้การปาดด้วยแปรง การพ่น หรือการจุ่มและกลายเป็นฟิล์มบาง ๆ บนผิวหน้าของวัสดุ

(2) ฟิกเซชัน (fixation) เป็นการทำให้ฟิล์มติดแน่นไม่หลุดออกจากผิวหน้า และไม่เกิดชั้นของฟิล์มที่ไม่ต้องการ โดยตัวทำละลายในสารเคลือบผิวจะเกิดการระเหย

(3) การบ่ม (curing) เป็นการทำให้ฟิล์มที่ผ่านขั้นตอนฟิกเซชันมีความทนทานขึ้น ซึ่งอาจทำได้โดยการใช้รังสี ความร้อน หรืออากาศ เปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นฟิล์มแห้งแข็งที่มีความทนทาน

กระบวนการเกิดฟิล์มของสารเคลือบผิวบางชนิด ไม่จำเป็นต้องมี 3 ขั้นตอนเสมอไป ตัวอย่างเช่นสารเคลือบผิวที่ทำการบ่มด้วยรังสียูวีอาจไม่มีขั้นตอนฟิกเซชัน

2.7 การบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสียูวี [5,8]

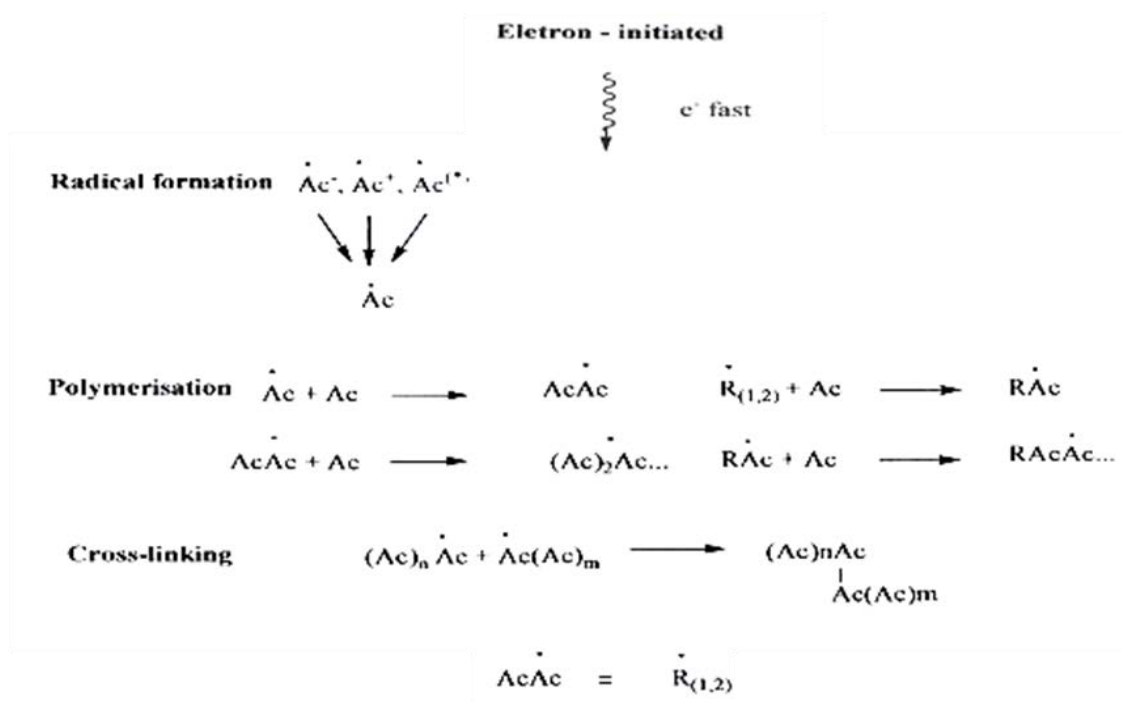
การบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสี คือการทำให้สารเคลือบผิวที่เป็นของเหลวและมีความว่องไวเปลี่ยนสภาพไปเป็นของแข็งด้วยการฉายรังสี เพื่อทำให้สารเคลือบผิวนั้นเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์และเกิดการเชื่อมขวางอย่างสมบูรณ์จนได้ฟิล์มที่แห้งแข็ง กระบวนการบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสีมี 2 วิธีคือ การบ่มสารเคลือบผิวด้วยลำแสงอิเล็กตรอน (electron beams curing) การบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสียูวี (ultraviolet curing)

2.7.1 การบ่มสารเคลือบผิวด้วยลำแสงอิเล็กตรอน (electron beams curing)

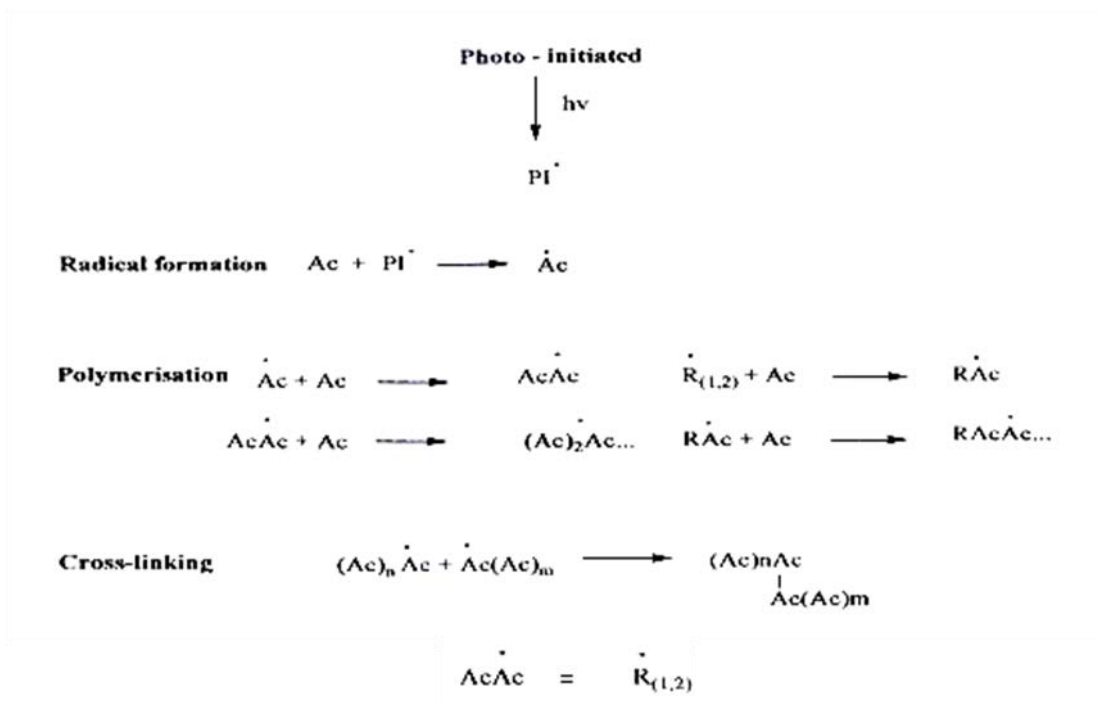
การบ่มสารเคลือบผิวด้วยลำแสงอิเล็กตรอนคือ การใช้ลำแสงอิเล็กตรอนกระตุ้นให้มอนอเมอร์หรือโอลิโกเมอร์ตั้งต้นเกิดอนุมูลอิสระขึ้น จากนั้นอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนี้จะทำปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์จนได้พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเชื่อมขวางจนเป็นร่างแหดังรูปที่ 2.11

2.7.2 การบ่มสารเคลือบผิวโดยแสงยูวี (ultraviolet curing or UV curing)

การบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสียูวีคือ การฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือยูวีเพื่อทำให้สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงแตกตัวให้อนุมูลอิสระหรือประจุบวกเพื่อเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์กับมอนอเมอร์หรือโอลิโกเมอร์ตั้งต้น และอาจก่อให้เกิดการเชื่อมขวางในที่สุด ดังรูปที่ 2.12



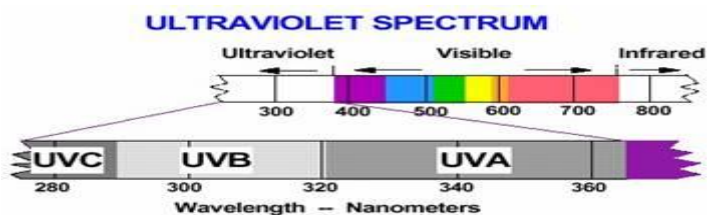
รูปที่ 2.11 การบ่มสารเคลือบผิวด้วยการใช้ลำแสงอิเล็กตรอน [5]



รูปที่ 2.12 การบ่มสารเคลือบด้วยการใช้รังสียูวี [5]

2.7.2.1 แสงยูวี

แสงยูวีหรือแสงอัลตราไวโอเล็ต มีช่วงสเปกตรัมอยู่ระหว่างรังสีเอ็กซ์(X-rays) กับแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (visible light) ซึ่งแสงยูวียังสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 สเปกตรัมด้วยกัน ซึ่งได้แก่ UV A, UV B และ UV C ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 สเปกตรัมของแสงยูวี [8]

แสงยูวีนี้สามารถสร้างได้จากแหล่งพลังงานต่างๆ เช่น หลอดไฟยูวี หลอดแบล็คไลท์ หลอดชั้นแทน หลอดฆ่าเชื้อ หลอดคาร์บอนอาร์ค การเชื่อมและติดโลหะ เต้าหลอม อุปกรณ์ทดสอบ และอุปกรณ์วิเคราะห์ในห้องทดลองหรือ ในธรรมชาติ เช่น ดวงอาทิตย์

2.7.2.2 องค์ประกอบของสารเคลือบผิวที่สามารถบ่มได้ด้วยรังสียูวี

องค์ประกอบของสารเคลือบผิวที่สามารถบ่มได้ด้วยรังสียูวี โดยทั่วไปประกอบด้วย 4 องค์ประกอบหลัก ได้แก่

(1) สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง (photoinitiator)

(2) โอลิโกเมอร์ (oligomer) หรือมอนอเมอร์ โดยทั่วไปมักมีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ (multifunctional monomer) ที่สามารถทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ สายโซ่หลักของโอลิโกเมอร์สามารถมีโครงสร้างทางเคมีที่หลากหลายอาจเป็น พอลิเอสเทอร์ ยูรีเทน หรืออีพอกซี ซึ่งโครงสร้างเคมีที่ต่างกันนี้เป็นตัวกำหนดสมบัติพิเศษเชิงกลและสมบัติทางกายภาพ เช่น ความแข็ง ความทนทานต่อการขีดสี ความทนทานต่อสารละลาย ความยืดหยุ่น เป็นต้น

(3) ตัวเจือจางว่องไว (reactive diluents) ใช้สำหรับปรับความหนืดสารเคลือบผิวให้มีค่าตามที่ต้องการ นอกจากนี้ยังเข้าไปมีผลต่อสมบัติของสารเคลือบผิวด้วย

(4) สารเติมแต่ง (additives) เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของสารเคลือบผิวให้เป็นไปตามความต้องการในการใช้งาน

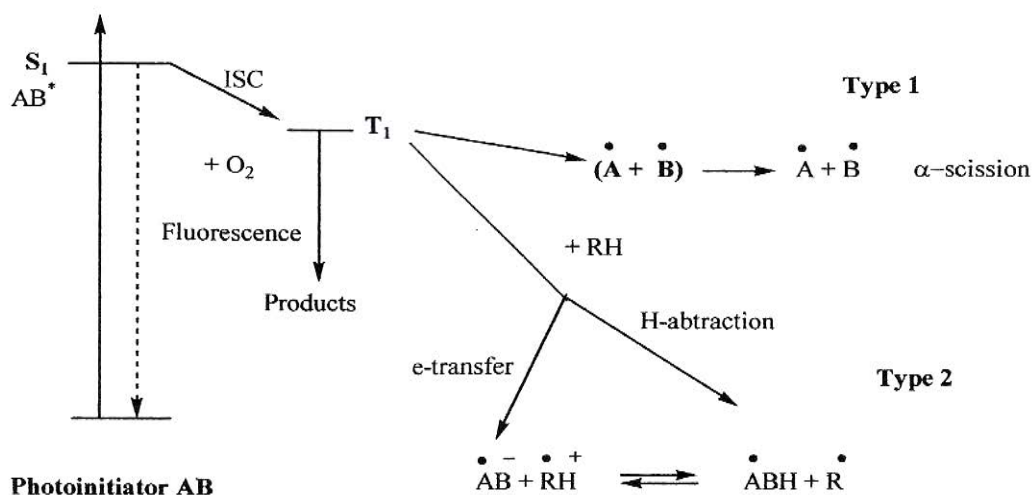
2.7.2.3 สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง (photoinitiator)

ทำหน้าที่ดูดกลืนรังสียูวีแล้วแตกตัวให้อนุมูลอิสระหรือประจุบวกที่จะเข้าทำปฏิกิริยาเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงกับมอนอเมอร์หรือโอลิโกเมอร์แล้วก่อให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ขั้นต่อไป โดยตัวกลางที่เกิดขึ้นมี 2 ชนิดคืออนุมูลอิสระหรือประจุบวก โดยหลักการเลือกชนิดสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของมอนอเมอร์หรือโอลิโกเมอร์

(1) สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงชนิดอนุมูลอิสระ (free radical photoinitiator)

โอลิโกเมอร์ที่ใช้ในองค์ประกอบของสารเคลือบผิวที่บ่มด้วยรังสียูวีโดยใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงชนิดอนุมูลอิสระได้แก่ อะคริเลต เมทาคริเลต และเมทาคริเลต/ไวนิลอีเทอร์ เมื่อโมเลกุลของสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงชนิดอนุมูลอิสระ (AB) ดูดกลืนรังสียูวีโมเลกุลจะถูกกระตุ้นไปยัง singlet state (S_1) จากนั้นจะเกิด intersystem crossing (ISC) แล้วโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นนั้นจะตกมาอยู่ชั้น triplet state เพื่อให้มีเสถียรมากขึ้น ในระหว่างการเปลี่ยนขั้นนี้สามารถเกิดการปล่อยฟลูออเรสเซน (fluorescence) หรือเกิดการรวมตัวกับออกซิเจน ทำให้สูญเสียอนุมูลอิสระได้ จากนั้นสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงที่ชั้น triplet state นี้สามารถแตกตัวให้อนุมูลอิสระได้ 2 วิธี คือ Norrish type I หรือ α - cleavage และ Norrish type II การแตกตัวให้อนุมูลอิสระของสารริเริ่ม

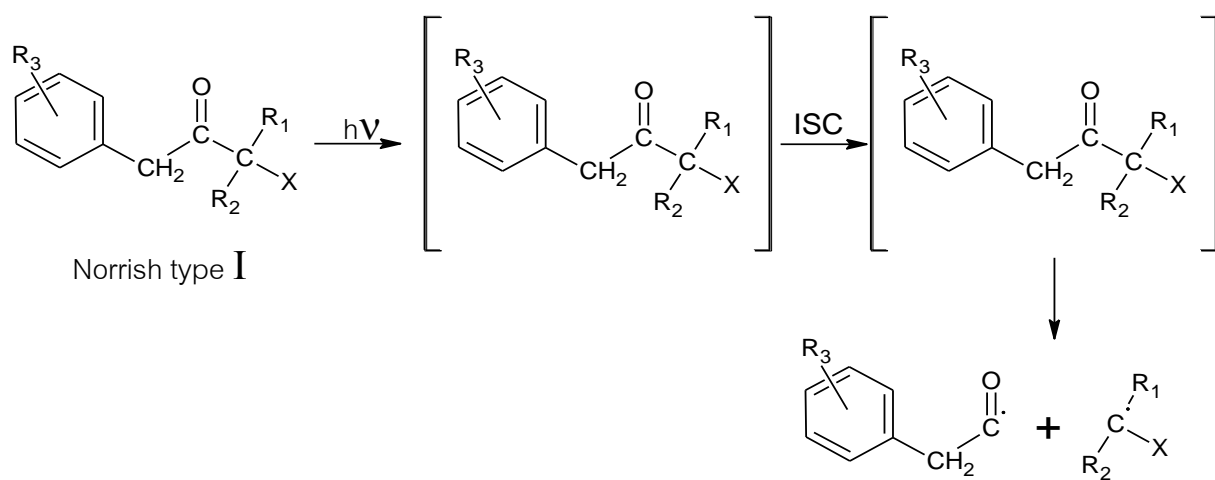
ปฏิกิริยาด้วยแสงจะเป็นแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงและชนิดของโอเลฟินโกลเมอร์



รูปที่ 2.14 การแตกตัวให้อนุมูลอิสระของสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง [5]

(a) Norrish type I

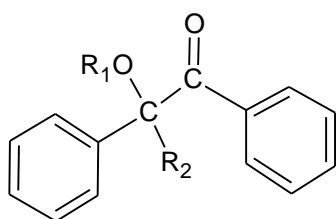
ขั้นตอนการแตกตัวให้อนุมูลอิสระของสารริเริ่มปฏิกิริยา Norrish type I ดังรูปที่ 2.15 เมื่อสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงได้รับพลังงานจากรังสียูวีก็จะดูดกลืนพลังงานจากรังสียูวีนั้น แล้วโมเลกุลของสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงก็จะถูกกระตุ้นไปที่ชั้น singlet state (S_1) และตกมาอยู่ชั้น triplet state (T_1) เพื่อให้โมเลกุลมีความเสถียรมากขึ้น จากนั้นสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงจะเกิดการแตกออกของพันธะ C-C ที่ตำแหน่งแอลฟาของหมู่ C=O เพื่อเกิดเป็นอนุมูลอิสระที่มีความว่องไว 2 โมเลกุล เรียกรวมการแตกออกของพันธะด้วยวิธีนี้ว่า homolytic decomposition ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงที่เกิดการแตกตัวให้อนุมูลอิสระด้วยวิธีนี้ ดังรูปที่ 2.16



$R, R_1, R_2 = \text{alkyl, aryl}, X = \text{OR}, \text{N}(\text{R})_2$

S = Singlet, T = Triplet, ISC = Intersystem crossing

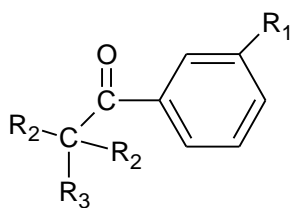
รูปที่ 2.15 การแตกตัวให้อนุมูลอิสระของสารริเริ่มปฏิกิริยา Norrish type I [5]



benzoin ethers

$R_1 = \text{H, alkyl}$

$R_2 = \text{H, substituted alkyl}$

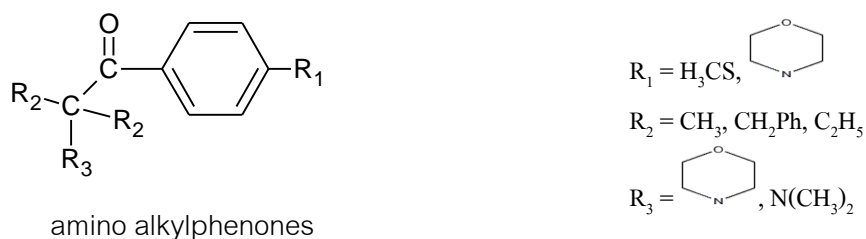


acetophenones

$R_1 = \text{H, i-C}_3\text{H}_7, \text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{O}$

$R_2 = \text{H, CH}_3, \text{OCH}_3, \text{OC}_2\text{H}_5$

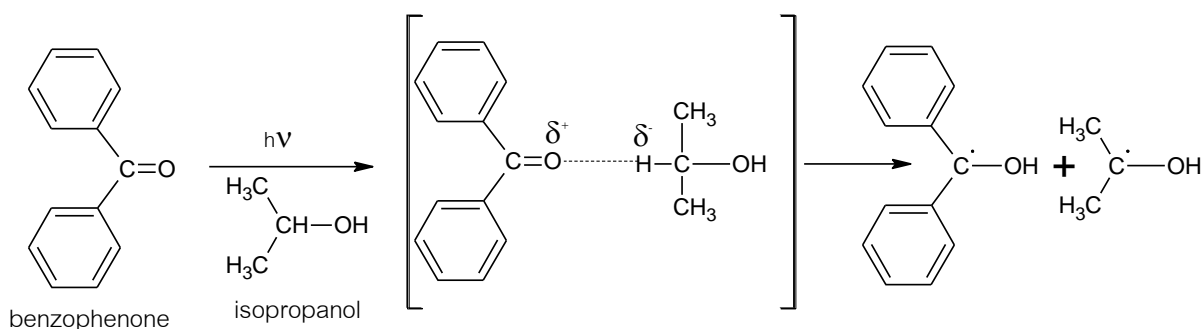
$R_3 = \text{H, Ph, OH}$



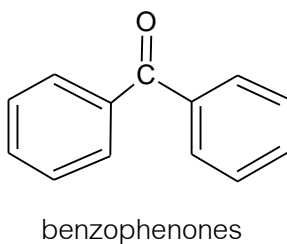
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงที่เกิดการแตกตัวให้
อนุมูลอิสระแบบ Norrish type I [5]

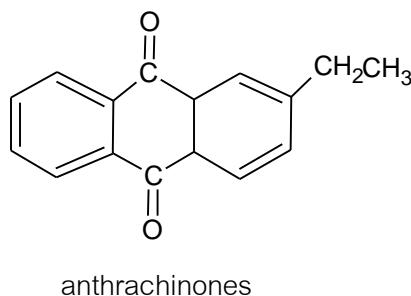
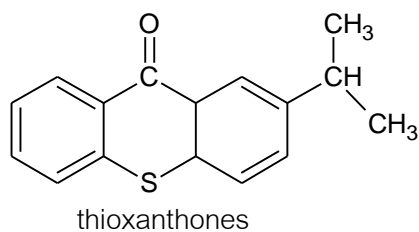
(b) Norrish type II

ขั้นตอนการแตกตัวให้อนุมูลอิสระของสารริเริ่มปฏิกิริยา Norrish type II แสดงดังรูปที่ 2.17 สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงเช่น benzophenone เมื่อได้รับพลังงานจากรังสียูวีแล้วถูกกระตุ้นไปที่ชั้น singlet state (S_1) และตกกลับมาอยู่ที่ชั้น triplet state (T_1) จากนั้นสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงที่ชั้นนี้ ต้องการสารประกอบที่เรียกว่า synergist เช่น isopropanol เข้ามาทำปฏิกิริยาด้วยเพื่อทำให้โมเลกุลของสารริเริ่มปฏิกิริยานั้น สามารถเกิดเป็นอนุมูลอิสระได้ด้วยการเกิดการดึงโปรตอนหรือการถ่ายเทอิเล็กตรอน ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงที่เกิดการแตกตัวให้อนุมูลอิสระด้วยวิธีนี้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 การแตกตัวให้อนุมูลอิสระของสารริเริ่มปฏิกิริยา Norrish type II [5]

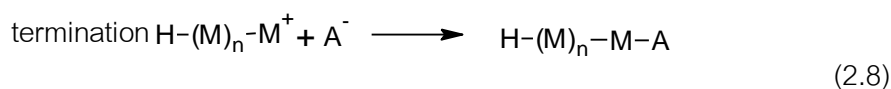
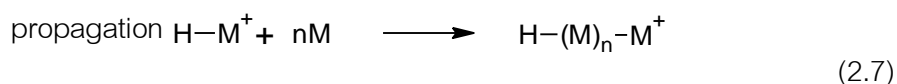
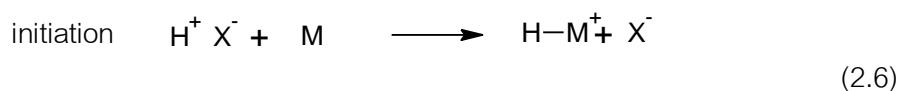




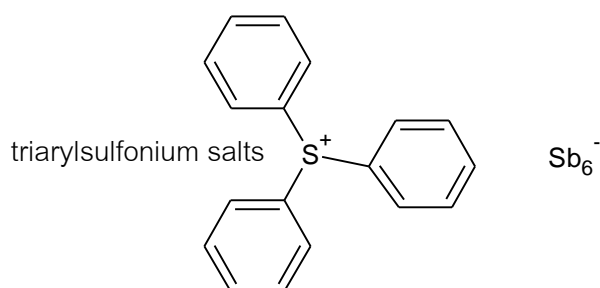
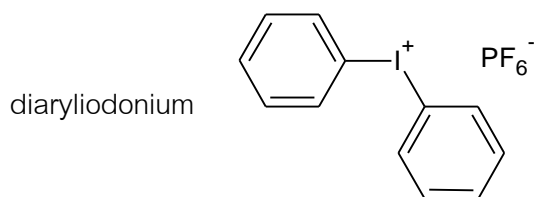
รูปที่ 2.18 ตัวอย่างสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงที่เกิดการแตกตัวให้อินทรีย์อิสระแบบ Norrish type II [5]

(1) สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงชนิดประจุบวก (cationic photoinitiators)

สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงชนิดนี้จะได้รับพลังงานจากรังสียูวีแล้วแตกตัวให้ Bronsted acid หรือ Lewis acid เพื่อเกิดปฏิกิริยาขั้นเริ่มต้น (initiation) กับมอนอเมอร์หรือโพลิโกเมอร์ตั้งต้นแล้วเกิดคาร์โบแคทไอออน ($H-M^+$) ที่มีความว่องไว จากนั้นคาร์โบแคทไอออนนี้จะทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ในขั้นขยายตัว (propagation) แล้วสิ้นสุดปฏิกิริยา (termination) ด้วยการเกิดการถ่ายโอนสายโซ่ ดังแสดงกลไกในการเกิดปฏิกิริยาดังสมการ และตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงชนิดประจุบวกดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 การเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์โดยแสงแบบประจุบวก



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างของสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงชนิดประจุบวก [5]

2.7.2.4 โอลิโกเมอร์หรือมอนอเมอร์

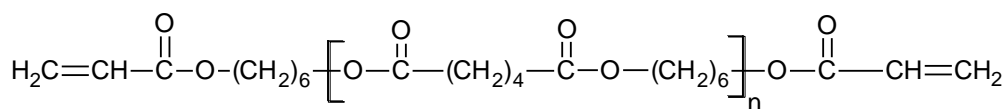
โอลิโกเมอร์หรือมอนอเมอร์ที่ใช้ในสารเคลือบผิวที่บ่มได้ด้วยรังสียูวีมักเป็นพวกที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ทำให้สามารถเกิดการเชื่อมโยงจนมีโครงสร้างเป็นร่างแหได้ ตัวอย่างของโอลิโกเมอร์หรือมอนอเมอร์ที่นิยมใช้ในองค์ประกอบของสารเคลือบผิวที่บ่มได้ด้วยรังสียูวีได้แก่

(1) โอลิโกเมอร์หรือมอนอเมอร์ที่มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (free radical system)

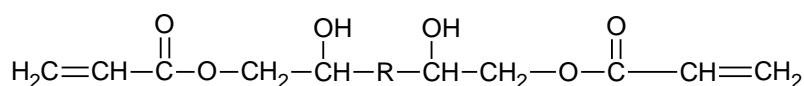
(a) อะคริเลตและเมทาคริเลต (acrylate and methacrylate)

อะคริเลตและเมทาคริเลตเป็นมอนอเมอร์ใช้ในอุตสาหกรรมสารเคลือบผิวที่บ่มได้ด้วยรังสียูวี มอนอเมอร์ในกลุ่มนี้มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบอนุมูลอิสระ (free radical polymerization) โดยอะคริเลตมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์มากกว่าเมทาคริเลต เนื่องจากเมทาคริเลต มีโครงสร้างที่มีความเกะกะ (sterically hindered) มากกว่าทำให้ปฏิกิริยาในขั้นการแผ่ไซ (propagation polymerization) เกิดขึ้นช้ากว่า การใช้อะคริเลตมอนอเมอร์พบว่าสารเคลือบผิวที่ได้มีความเหนียวต่ำจึงง่ายต่อการขึ้นรูปเป็นฟิล์มและสามารถเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ได้อย่างรวดเร็วแต่สมบัติการติดแน่นบนผิวที่เคลือบติดของฟิล์มแห้งที่ได้ต่ำ มีความเปราะ ดังนั้นจึงมีการนำมอนอเมอร์หลายชนิดมาสังเคราะห์เป็นโอลิโกเมอร์จำพวก

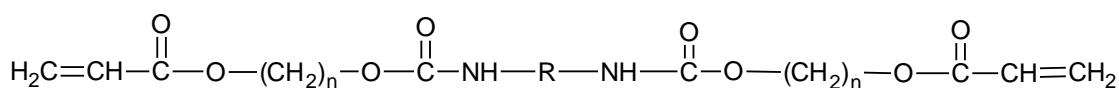
อะคริเลต เช่น พอลิเอสเทอร์อะคริเลต อีพอกซีอะคริเลต ยูรีเทนอะคริเลต เป็นต้น สูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.21



polyester acrylates



epoxy acrylates



polyurethane acrylates

R = aliphatic or aromatic hydrocarbon

รูปที่ 2.21 โครงสร้างทางเคมีของโพลิโอมเมอร์จำพวกอะคริเลต [5]

การใช้โพลิโอมเมอร์ให้สมบัติของฟิล์มแห้งที่ดียิ่งขึ้น แต่พบว่าสารเคลือบผิวมีความหนืดสูง และเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ช้าลง สูตรสารเคลือบผิวที่บ่มด้วยรังสียูวีจึงมักมีโพลิโอมเมอร์เป็นตัวยึดหลักและทำการเติมมอนอเมอร์เพื่อปรับความหนืดและกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาและเรียกว่าตัวเจือจางว่องไว

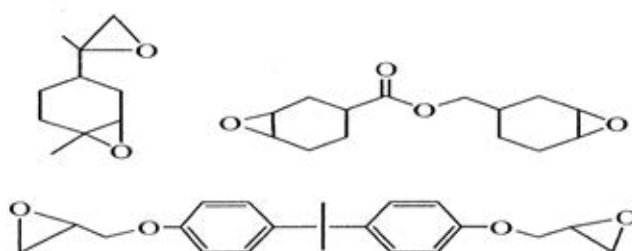
(b) ยูรีเทนอะคริเลตโพลิโอมเมอร์ (urethaneacrylate oligomers)

ยูรีเทนอะคริเลตโพลิโอมเมอร์เตรียมได้จากไดโพลหรือพอลิไอโซไซยานาตกับอะคริเลตมอนอเมอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล โดยในการเตรียมอาจมีการปรับปรุงใช้พอลิออลร่วมในการสังเคราะห์ เพื่อให้ได้ยูรีเทนอะคริเลตมีสมบัติตามต้องการ ฟิล์มแห้งที่ได้พบว่ามีสมบัติความยืดหยุ่นโดยยูรีเทนอะคริเลตที่มีสายโซ่คาร์บอนในโครงสร้างยาวขึ้นฟิล์มแห้งที่ได้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น และมีความทนต่อการขีดสี การติดแน่นที่ตีบนผิวเคลือบชนิดต่าง ๆ มีความทนต่อเคมีภัณฑ์และต่อสภาพดินฟ้าอากาศ

(2) โอลิโกเมอร์ที่มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบประจุบวก (cationic system)

(a) อีพอกไซด์

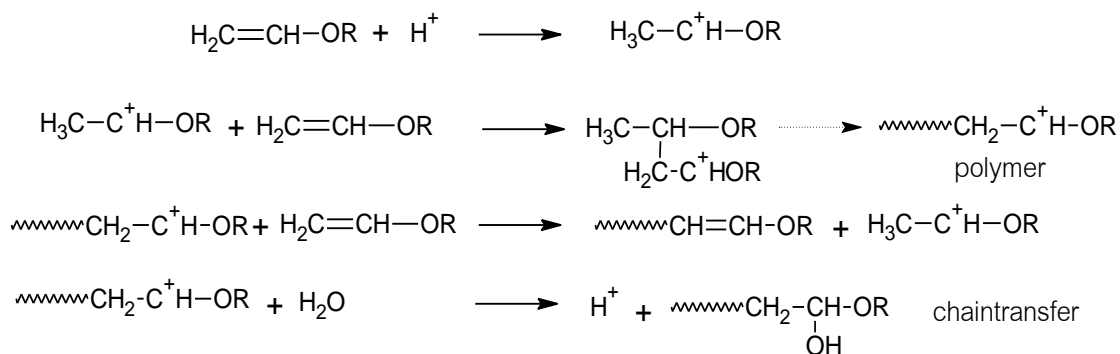
สารประกอบอีพอกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้โดยการเปิดวง เนื่องจากในวงของสารประกอบอีพอกไซด์มีความไม่เสถียรสามารถเปิดออกได้ง่ายโดย Bronzed acid (เช่น ไฮโดรเจนฟลูออไรด์) หรือ Lewis acid (เช่น โบรอนไตรฟลูออไรด์ ฟอสฟอรัสเพนตะฟลูออไรด์) สารประกอบอีพอกไซด์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมสารเคลือบผิวที่บ่มได้ด้วยรังสียูวี ได้แก่ ไสโคลอะลิฟลาติกอีพอกไซด์และไกลซิดิ้งอีเทอร์ ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบอีพอกไซด์ [5]

(b) ไวนิลอีเทอร์

ไวนิลอีเทอร์สามารถเกิดการบ่มได้ด้วยรังสียูวีที่มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบประจุบวกได้ เช่นเดียวกับสารประกอบอีพอกไซด์ ดังรูปที่ 2.23 และการใช้ไวนิลอีเทอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลายหมู่ ทำให้สามารถเกิดโครงสร้างที่เป็นร่างแหได้ง่าย



รูปที่ 2.23 การเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์โดยแสงที่มีกลไกแบบประจุบวกของไวนิลอีเทอร์ [8]

การเกิดการถ่ายโอนสายโซ่มีผลทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สั้นลงและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ได้จะมีค่าต่ำ โดยทั่วไปแล้วไวนิลอีเทอร์สามารถเกิดการบ่มได้ด้วยรังสียูวีโดยใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงชนิดประจุบวกได้เร็วกว่าสารประกอบอีพอกไซด์

(3) โอลิโกเมอร์ที่มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบผสม (hybrid system)

โอลิโกเมอร์ที่มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบผสมนี้เช่น โอลิโกเมอร์ของสารประกอบอีพอกไซด์ผสมกับตัวเจือจางว่องไวจำพวกอะคริเลต โอลิโกเมอร์ของอะคริเลตผสมกับตัวเจือจางว่องไวจำพวกไวนิลอีเทอร์ โอลิโกเมอร์ของไวนิลอีเทอร์ผสมกับตัวเจือจางว่องไวจำพวกอะคริเลตเป็นต้น สารเคลือบผิวในระบบนี้มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่างกัน ตัวอย่างของโอลิโกเมอร์ที่มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบผสมนี้ได้แก่ โอลิโกเมอร์ของสารประกอบอีพอกไซด์ผสมกับตัวเจือจางว่องไวจำพวกอะคริเลต โดยอะคริเลตมีกลไกในการเกิดปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระส่วนอีพอกไซด์มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบประจุบวก ดังนั้นจึงต้องใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงชนิดผสมนี้จึงทำให้โอลิโกเมอร์ทั้งสองชนิดสามารถบ่มด้วยรังสียูวีได้

2.7.2.5 ตัวเจือจางว่องไว (reactive diluents)

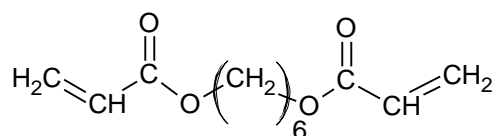
ตัวเจือจางว่องไวเป็นสารพวกมอนอเมอร์โดยหน้าที่ของตัวเจือจางว่องไวในสูตรสารเคลือบที่บ่มได้ด้วยรังสียูวีมีหลายประการ เช่น

- (1) ช่วยลดความหนืดของโอลิโกเมอร์
- (2) ช่วยเพิ่มอัตราการแห้งตัวของสารเคลือบผิว
- (3) ช่วยลดเวลาในการแห้งตัวของสารเคลือบผิว
- (4) เป็นตัวกำหนดสมบัติของสารเคลือบผิวที่ได้

ตัวอย่างตัวเจือจางว่องไว

- (1) 1,6 เฮกเซนไดออลไดอะคริเลต (HDDA)

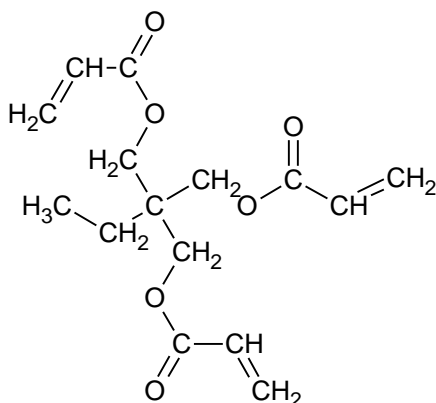
สมบัติของตัวเจือจางว่องไวนี้ได้แก่ ความหนืดต่ำ ทำให้เกิดการบ่มได้เร็วขึ้นเนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ สามารถเข้าได้กับโอลิโกเมอร์หลายชนิด เช่น พอลิเอสเตอ์ อีพอกซี ยูรีเทนอะคริเลต เป็นต้น และสารเคลือบผิวมีความยืดหยุ่นและการยึดติดที่ดี



รูปที่ 2.24 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ 1, 6 เฮกเซนไดออลไดอะคริเลต [5]

(2) ไตรเมทิลอลโพรเพนไตรอะคริเลต (TMPTA)

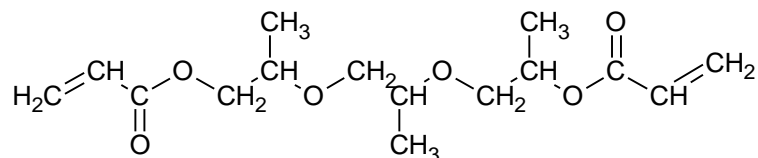
สมบัติของตัวเจือจางว่องไวนี้ ได้แก่ ความหนืดต่ำ ทำให้เกิดการบ่มได้เร็วขึ้นเนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชัน 3 หมู่ ทำให้สารเคลือบผิวมีความยืดหยุ่น มีความทนทานต่อเคมีภัณฑ์ และการชุบขีดได้ดี



รูปที่ 2.25 แสดงโครงสร้างทางเคมีของไตรเมทิลอลโพรเพนไตรอะคริเลต [5]

(3) ไตรโพรเพนไกลคอลไดอะคริเลต (TPGDA)

สมบัติของตัวเจือจางว่องไวนี้ ได้แก่ ความหนืดต่ำ มีความสามารถในการละลายดี ทำให้เกิดการบ่มได้เร็วขึ้นเนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ มีแรงตึงผิวต่ำทำให้ช่วยให้เกิดการเปียกได้ดีขึ้นในงานที่ได้มีการหดตัว



รูปที่ 2.26 แสดงโครงสร้างทางเคมีของไตรโพรเพนไกลคอลไดอะคริเลต [5]

2.7.2.6 สารเติมแต่ง (additive)

สารเติมแต่งที่ใช้ในสูตรสารเคลือบผิวมีหน้าที่เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆของสารเคลือบผิวให้เป็นไปตามความต้องการในการใช้งาน ตัวอย่างของสารเติมแต่งที่ใช้ได้แก่

- สารลดฟอง (antifoaming agent)
- สารควบคุมความมันเงา (gloss control agent)
- สารลดกลิ่น (odoring agent)
- สารช่วยเพิ่มการขัดถู (abrasion resistance agent)
- สารช่วยเปียก (wetting agent)

2.7.2.7 ข้อดีของการบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสียูวี

(1) การบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสียูวีไม่มีการใช้ตัวทำละลาย ดังนั้นจึงไม่มีการปล่อยตัวทำละลายสู่บรรยากาศ จึงทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

(2) พื้นที่ของเครื่องบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสียูวี จะใช้น้อยกว่าตู้อบแบบลมร้อนหรือเตาอบแบบแก๊ส ทำให้ประหยัดพื้นที่ในโรงงานอุตสาหกรรม

(3) ระยะเวลาในการบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสียูวีใช้น้อยกว่าสารเคลือบผิวที่ใช้ตัวทำละลายจึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตอีกทางหนึ่ง

(4) ชิ้นงานที่ได้จากสารเคลือบผิวที่บ่มได้ด้วยรังสียูวี สามารถวางซ้อนทับกันได้ อีกทั้งยังสามารถบรรจุลงหีบห่อได้เลย ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับสารเคลือบผิวที่ใช้ตัวทำละลายแล้วต้องใช้เวลาเป็นวันหรือเป็นสัปดาห์ชิ้นงานจึงจะแห้งสนิท

2.7.2.8 ความปลอดภัยของรังสียูวี

รังสียูวีที่แผ่ออกมาจากหลอดรังสียูวีมีผลทำให้ผิวแห้งไหม้หรือตาบอดได้ และเมื่อโดนรังสียูวีในระยะเวลานานหนึ่ง จะมีผลทำให้ผิวไหม้เกรียม ผิวหนังเหี่ยวก่อนเวลา เกิดความผิดปกติของเม็ดสี และนอกจากรังสียูวีที่ถูกปลดปล่อยมาจากเครื่องอบแล้วจะพบว่ามีสารไอโซนเกิดขึ้นในระหว่างปฏิกิริยาด้วย ซึ่งสารไอโซนซึ่งถ้าได้รับเกินปริมาณจะทำให้เกิดการแน่นหน้าอกและแพ้ได้ ดังนั้นในระหว่างการใช้งานควรมีสิ่งป้องกันตัวเองจากรังสียูวีและไอโซนด้วย เช่น การสวมเสื้อผ้าให้มิดชิด ใส่แว่นตา ตั้งเครื่องอบในพื้นที่ที่อากาศถ่ายเทได้สะดวก

2.8 ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับสารเคลือบผิว [3]

2.8.1 รอยแตก

รอยแตกหมายถึง ข้อบกพร่องของฟิล์มของสารเคลือบผิวที่เกิดการแยกตัวเนื่องจากเคมีภัณฑ์ไม่สามารถขยายตัวและหดตัวได้ในอัตราที่เท่ากันระหว่างการแห้งตัวของฟิล์ม อาจเป็นผลมาจากการเคลือบที่หนามากเกินไป นอกจากนี้มีสาเหตุมาจากฟิล์มเปราะ ดังนั้นจึงแก้ไขโดยการเลือกใช้สารเคลือบผิวที่มีความยืดหยุ่นมากกว่า รอยแตกมีหลายลักษณะดังนี้

- (1) รอยแตกเส้นผม หมายถึงรอยแตกเป็นเส้นเล็ก ๆ ที่ไม่ทะลุผิวเคลือบชั้นบนเกิดขึ้นเป็นแห่ง ๆ
- (2) รอยรานหมายถึง รอยแตกเป็นเส้นเล็ก ๆ ที่ไม่ทะลุผิวเคลือบชั้นบน และเกิดกระจายไปทั่วพื้นผิว มีลักษณะคล้ายลวดลายเป็นสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ
- (3) รอยร้าวหมายถึง รอยแตกที่คล้ายรอยรานแต่ลึกและกว้างกว่า
- (4) รอยแตกผิวหนังจะเข้ หมายถึง รอยร้าวที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรง ทำให้ฟิล์มมีลวดลายคล้ายผิวหนังจะเข้
- (5) รอยแตก หมายถึงรอยแตกที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรง ทำให้ฟิล์มเกิดการแตกร้าว มีการทะลุผิวเคลือบอย่างน้อย 1 ชั้น

2.8.2 การเป็นรูเข็มและการเป็นหลุม

การเป็นรูเข็มหมายถึง การเกิดเป็นรูเข็มเล็ก ๆ บนผิวฟิล์มของสารเคลือบผิวมีสาเหตุมาจากระหว่างการเคลือบเกิดฟองอากาศเล็ก ๆ ซึ่งแตกระหว่างการแห้งตัวเป็นฟิล์ม ทำให้ผิวฟิล์มเกิดเป็นรูเล็ก ๆ เหมือนรูเข็ม ในกรณีที่เคลือบหนามาก ๆ ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่ เมื่อฟองอากาศแตกระหว่างการแห้งตัวจะกลายเป็นหลุมบนฟิล์ม

2.8.3 ลักษณะผิวส้ม

ข้อบกพร่องชนิดนี้แสดงถึงลักษณะของผิวฟิล์มแห้งที่ไม่เรียบคล้ายผิวส้ม มีสาเหตุหลายประการคือ ความหนืดของสารเคลือบผิวสูงเกินไป ใช้อัตราส่วนของตัวทำละลายที่ไม่เหมาะสม กล่าวคือใช้ตัวทำละลายที่มีจุดเดือดต่ำในปริมาณสูงเกินไป ดังนั้นแก้ไขโดยการเพิ่มอัตราส่วนของตัวทำละลายที่มีจุดเดือดสูง

2.8.4 การเป็นคลื่น

การเป็นคลื่นหมายถึง การที่ผิวของฟิล์มสารเคลือบผิวมีลักษณะคล้ายระลอกคลื่น มีสาเหตุมาจากการเคลือบที่หนาเกินไป หรือจากการใช้สารเร่งแห้งจากโคบอลต์ในปริมาณมากเกินไป

2.9 ฐานฟันปลอมอะคริลิก [8]

2.9.1 วัสดุที่ใช้ทำฐานฟันปลอม

วัสดุที่ใช้ทำฐานฟันปลอมสามารถจำแนกออกกว้างๆ เป็น 2 ชนิดคือ

(1) วัสดุฐานฟันปลอมที่เป็นโลหะ (metallic denture base materials) เช่น โลหะผสมโคบอลต์ โครเมียม, โลหะผสมทองคำ, เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นต้น

(2) วัสดุฐานฟันปลอมที่เป็นอโลหะ (non-metallic denture base materials) วัสดุชนิดนี้เป็นพวกพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ เช่น อะคริลิกเรซิน ไนลอน พอลิคาร์บอเนต เป็นต้น

ถึงแม้ว่าฐานฟันปลอมที่เป็นโลหะมีคุณสมบัติทางกลดีกว่าพอลิเมอร์ แต่ไม่เป็นที่นิยมเพราะว่าวัสดุ และเครื่องมือที่ใช้ในการทำมีราคาแพง พร้อมทั้งขั้นตอนในการทำยุ่งยากมากกว่า ดังนั้นฐานฟันปลอมที่นิยมใช้กันในปัจจุบันจึงเป็นชนิดที่ทำมาจากพอลิเมอร์ โดยเฉพาะอะคริลิก-เรซิน การเลือกพอลิเมอร์มาใช้ทำฐานฟันปลอมนั้นจะคำนึงถึงคุณสมบัติในอุดมคติดังนี้

2.9.2 คุณสมบัติอุดมคติของวัสดุฐานฟันปลอม

(1) คุณสมบัติทางฟิสิกส์

- ลักษณะเหมือนเนื้อเยื่อในช่องปาก
- คุณภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้วสูงเพียงพอที่จะป้องกันการอ่อนตัวและบิดเบี้ยวในระหว่างการใช้งาน
- มีความเสถียรทางมิติ
- มีความถ่วงจำเพาะต่ำ
- มีการนำความร้อนที่ดี
- มีความทึบแสงต่อรังสี X-ray

(2) คุณสมบัติทางกล

- มีค่า Young's Modulus สูง

- มีความยืดหยุ่น
- มีความแข็งแรงตามขวางสูง
- มีความทนต่อการสึกสูง
- ความล้าสูง
- มีความทนแรงกระแทกสูง

(3) คุณสมบัติทางเคมี

- มีความเฉื่อยทางเคมี
- ไม่ดูดน้ำหรือน้ำลาย
- ไม่มีการเปลี่ยนสี
- ยึดติดกับซีฟันทนปลอมได้ดี
- ไม่ละลายในของเหลวในช่องปาก

(4) คุณสมบัติทางชีวะ

- วัสดุฐานฟันปลอมทั้งที่อยู่ในสภาวะที่ยังไม่ผสมหรือบ่มไม่ทำอันตรายต่อผู้ใช้
- วัสดุฐานฟันปลอมที่บ่มแล้วไม่เป็นพิษ ไม่ระคายเคืองต่อผู้ใช้
- ถ้าวัสดุฐานฟันปลอมมีคุณสมบัติดูดน้ำหรือน้ำลาย จะต้องไม่ทำให้เกิดการเติบโตของ

แบคทีเรียหรือเชื้อรา

(5) คุณสมบัติอื่นๆ

- ราคาค่อนข้างถูก
- มีอายุการเก็บนาน
- การทำงานกับวัสดุฐานฟันปลอมง่าย และวิธีการทำฐานฟันปลอมง่าย ปราศจากการใช้

เครื่องมือที่ยุ่งยากและราคาแพง

- เมื่อเกิดการแตกหักของฐานฟันปลอม สามารถซ่อมแซมได้ง่าย
- ไม่มีรสหรือกลิ่น

2.9.3 วัสดุฐานฟันปลอมอะคริลิก

สมัยแรกที่มีการแนะนำพอลิเมทิลเมทาคริเลตใช้เป็นวัสดุฐานฟันปลอม พบว่ามีวิธียุ่งยาก และค่าใช้จ่ายสูงคือต้องใช้ความร้อนทำให้อ่อนตัว แล้วอัดในเครื่องอัดแบบที่ทำด้วยโลหะ ต่อมาจึงมีผู้ดัดแปลงเพื่อให้ทันตแพทย์สามารถทำได้ด้วยตัวเองคือ ทำให้พอลิเมทิลเมทาคริเลตอ่อนตัวด้วยเมทิลเมทาคริเลตหรือโมโนเมอร์แล้วจึงอัดในเบ้า มอนอเมอร์ที่เหลือหลังจากละลายเกิดปฏิกิริยา

การเกิดพอลิเมอร์กับอนุมูลอิสระจากเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ เป็นสายโซ่โมเลกุลพอลิเมทิลเมทาคริเลต ทำให้เกิดสายโซ่โมเลกุลเพิ่มขึ้น ในปัจจุบันวัสดุฐานฟันปลอมที่นิยมใช้กันได้แก่ชนิดอะคริลิกเรซิน วัสดุฐานฟันปลอมอะคริลิกเรซินแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามวิธีการบ่ม คือ วัสดุฐานฟันปลอมอะคริลิกที่บ่มด้วยความร้อน วัสดุฐานฟันปลอมอะคริลิกที่บ่มด้วยตัวเองและวัสดุฐานฟันปลอมอะคริลิกที่บ่มโดยแสง

2.9.3.1 วัสดุฐานฟันปลอมอะคริลิกชนิดที่บ่มด้วยความร้อน (heat-cured denture base acrylic resin)

- องค์ประกอบ

ปัจจุบันบริษัทผลิตวัสดุฟันปลอมส่วนใหญ่ผลิตวัสดุฐานฟันปลอมอะคริลิกชนิดบ่มด้วยความร้อนออกมาในลักษณะที่เป็นส่วนผสมกับส่วนเหลว ซึ่งในแต่ละส่วนประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆกันดังนี้

ส่วนผงมีองค์ประกอบต่างๆดังนี้

(1) เม็ดพอลิเมทิลเมทาคริเลต หรือโคพอลิเมอร์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต

มีลักษณะเป็นแก้วใสแข็ง สามารถทำให้อ่อนตัวและปั้นได้ที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส ซึ่งเหมาะสำหรับอัดในเบ้า ที่อุณหภูมินี้พอลิเมอร์แสดงคุณสมบัติเทอร์โมพลาสติกซึ่งมีความแข็งแรงสูงสุดในกลุ่มเดียวกัน

(2) เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์

เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งให้อนุมูลอิสระในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของอะคริลิกเรซิน

(3) ไดบิวทิลพทาเลต

เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกแบบภายนอก (external plasticizer) โดยโมเลกุลของสารเสริมนี้จะแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์มากกว่าที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับพอลิเมอร์แล้วทำให้ฐานฟันปลอมที่ได้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น

(4) เส้นใยแก้ว และเม็ดแก้ว เซอร์โคเนียมซิลิเกต ซิลิกอนคาร์ไบด์ โบรอนไนไตรด์ เส้นใยคาร์บอน

(5) เมอร์คิวริคซัลไฟด์ แคดเมียมซิลิไซด์ เฟอริกออกไซด์ คาร์บอนแบล็ก

เนื่องจากพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีลักษณะใส ไม่มีสี จึงมีความจำเป็นต้องใส่สารสีในส่วนผงเพื่อให้ฐานฟันปลอมอะคริลิกที่ได้มีสีคล้ายเหงือก การใส่สารสีนี้มี 2 วิธีคือ

- การใส่สารสีในระหว่างปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของเมทิลเมทาคริเลตเป็นเม็ดพอลิเมทิลเมทาคริเลต สารสีนี้มีจะเข้าไปอยู่ในเม็ดพอลิเมอร์

- ใส่สารสีภายหลังการเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของเมทิลเมทาคริเลตเป็นเม็ดพอลิเมทิลเมทาคริเลต โดยการผสมสารสีกับเม็ดพอลิเมอร์ สำหรับวัสดุฐานพื้นปลอมอะคริลิกนี้ โดยส่วนใหญ่ใช้วิธีนี้ เพราะว่าฐานพื้นปลอมที่ได้มีลักษณะเหมือนของจริงมากกว่า

(6) ซิงค์ออกไซด์หรือทิตาเนียมไดออกไซด์

เนื่องจากพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีลักษณะโปร่งใส จึงมีความจำเป็นต้องใส่สารทึบแสงเพื่อให้มีลักษณะโปร่งแสง

(7) เส้นใยไนลอน และเส้นใยอะคริลิก

มีการใส่เส้นใยสังเคราะห์ ในส่วนผงของอะคริลิกเรซินเพื่อทำหน้าที่จำลองเส้นเลือดฝอยให้มีลักษณะคล้ายเหงือกจริงมากที่สุด ส่วนเหลวมีองค์ประกอบต่างๆดังนี้

(1) เมทิลเมทาคริเลต

เป็นโมเลกุลเชิงเดี่ยว หรือที่เรียกว่ามอนอเมอร์ สามารถรวมตัวเป็นพอลิเมทิลเมทาคริเลต โดยปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบเติม

(2) ไฮโดรควิโนน หรือ อนุพันธ์ของไฮโดรควิโนน

เนื่องจากเมทิลเมทาคริเลตเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์เมื่อสัมผัสกับแสง หรือได้รับความร้อน ดังนั้นผู้ผลิตจึงใส่สารยับยั้งลงในของเหลวซึ่งก็คือสารไฮโดรควิโนน หรือ อนุพันธ์ของไฮโดรควิโนน เพื่อป้องกันเมทิลเมทาคริเลตไม่ให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ขณะเก็บ ทำให้มีอายุการใช้งานนานขึ้น

(3) ไดบิวทิลพทาเลต

เป็นสารเสริมสภาพพลาสติก อาจมีการใส่สารนี้ในส่วนเหลวของวัสดุฐานพื้นปลอมก็ได้วัตถุประสงค์ของการใส่สารนี้เหมือนกับที่กล่าวมาแล้วในส่วนผงข้างต้น

(4) เอทิลีนไกลคอลไดเมทิลเมทาคริเลต

การใส่สารเชื่อมขวางในวัสดุฐานพื้นปลอมมีวัตถุประสงค์เพื่อลดคุณสมบัติการละลายของฐานพื้นปลอมในตัวทำละลายให้น้อยลง และลดแนวโน้มการร้าวตัวของฐานพื้นปลอม โดยสารเชื่อมขวางช่วยเร่งการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ และเอาชนะการยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของออกซิเจน แต่ถ้ามีสารเชื่อมขวางมากเกินไปในโมโนเมอร์ จะส่งผลทำให้ฐานพื้นปลอมที่ได้นั้นแข็งและเปราะ ไม่ยืดหยุ่น

- วิธีการผสมมีขั้นตอนดังนี้

(1) เทส่วนผสมลงในภาชนะที่ใช้ผสม แล้วเทส่วนผสมตามลงไป โดยให้แต่ละอนุภาคของส่วนผสมสัมผัสกับส่วนผสม แล้วกวนของผสมนั้น จากนั้นปิดฝาภาชนะแล้วปล่อยให้ส่วนผสมมีความชื้นเหลวที่เหมาะสม หากอัตราส่วนการผสมไม่เหมาะสมโดยมีส่วนผงมากเกินไป พอลิเมอร์ที่ไม่ละลายจะตกค้างเป็นเม็ดเล็กๆ แต่ถ้ามีส่วนของเหลวมากเกินไป พอลิเมอร์ที่ได้จะหดตัว

(2) เวลาการเกิดสภาพโด (dough time)

เป็นระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมส่วนผสมกับส่วนผสมจนของผสมอะคริลิกอยู่ในสภาพโดหรือเข้าเป็นเนื้อเดียวกันเวลานี้มีการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยดังต่อไปนี้

- อนุภาคของพอลิเมอร์มีขนาดเล็ก ใช้เวลาในการเกิดสภาพโดสั้น
- น้ำหนักโมเลกุลสูงเกินไป ใช้เวลาเกิดสภาพโดนานมากขึ้น
- ถ้ามีการผสมสารเสริมสภาพพลาสติกมาก จะเกิดสภาพโดได้เร็วขึ้น
- อุณหภูมิสูงจะเกิดสภาพโดได้เร็วขึ้น
- ถ้าใช้อัตราส่วนของส่วนผสมต่อส่วนของเหลวมาก จะใช้เวลาเกิดสภาพโดสั้นลง

(3) ตัวกลางคั่น (separating medium)

ระหว่างการทำพื้นปลอม ก่อนอัดอะคริลิกลงในพลาสติก ต้องระวังไม่ให้อะคริลิกเรซินสัมผัสโดยตรงกับผิวหน้าของแม่แบบยิปซัม โดยทาสารตัวกลางที่ทำหน้าที่ป้องกันแม่แบบตรงที่ผิวหน้าของแม่แบบยิปซัมทั้งหมด สารที่ทานี้มีชื่อเรียกว่า ตัวกลางคั่น ในอดีตที่ผ่านมา นั้น โดยส่วนใหญ่จะใช้แผ่นดีบุกบางๆ ปิดที่ผิวหน้าแม่แบบยิปซัม แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้เวลาในการทำมาก และวิธีทำยุ่งยาก จึงมีการใช้สารละลายอัลจิเนต เช่น โปตัสเซียม โซเดียม หรือแอมโมเนียมอัลจิเนตแทน ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกสารละลายอัลจิเนตเหล่านี้ว่า tin foil substitute

(4) การอัดอะคริลิก (packing)

การอัดอะคริลิกเรซินที่ผสมได้ลงในพลาสติกนั้น อะคริลิกที่อัดต้องอยู่ในสภาพโด และสิ่งที่ต้องตระหนักถึงคือ เมื่ออัดเสร็จแล้ว ต้องมีอะคริลิกเรซินอยู่เต็มแม่แบบ และความดันที่ใช้ในการอัดต้องมากเพียงพอ

(5) การบ่มอะคริลิก (curing)

ทำการบ่มอะคริลิกด้วยความร้อนโดยอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบ่มขึ้นอยู่กับชนิดของสารและอัตราส่วนของสารในการเตรียม การบ่มด้วยความร้อนใช้วิธีการต้มพลาสติกที่มีอะคริลิกเรซินอยู่ในแม่แบบในน้ำ

- คุณสมบัติ

(1) ข้อดี

- มีน้ำหนักเบา
- เปลี่ยนแปลงรูปร่างจากการดูดน้ำน้อย
- สามารถซ่อมแซมได้ง่าย

(2) ข้อเสีย

- ไม่ค่อยทนต่อน้ำยาฆ่าเชื้อโรคต่างๆไป
- หากฟันปลอมแตกหักแล้วกลืนเข้าไปจะไม่สามารถหาตำแหน่งได้เพราะโปร่งแสงต่อรังสี

X-ray

- อาจเกิดการระคายเคืองเนื่องจากโมโนเมอร์ที่หลงเหลือในกรณีที่ใช้เวลาสั้นหรืออุณหภูมิต่ำไปในการบ่ม

2.9.3.2 วัสดุฐานฟันปลอมอะคริลิกชนิดที่บ่มได้เอง (self-cured denture base acrylic resin or cold-cured denture base acrylic resin)

- องค์ประกอบ

องค์ประกอบของอะคริลิกชนิดบ่มได้เองเหมือนกับชนิดบ่มด้วยความร้อน เว้นแต่การใส่สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์เพิ่มเข้ามาในส่วนของเหลว กล่าวคือ อะคริลิกชนิดบ่มได้เองใช้เคมีภัณฑ์แทนความร้อน เช่น สารกลุ่ม tertiary aromatic amine เพื่อกระตุ้นให้เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์เกิดการแตกตัวให้เป็นอนุมูลอิสระที่อุณหภูมิห้อง

- เปรียบเทียบคุณสมบัติกับชนิดบ่มด้วยความร้อน

(1) ใช้ตัวกระตุ้นต่างกัน

(2) อนุภาคของเม็ดพอลิเมอร์นี้เล็กกว่าของชนิดบ่มด้วยความร้อนเพื่อว่าเมื่อผสมส่วนผงกับส่วนของเหลวแล้ว พอลิเมอร์มีการอ่อนตัวได้อย่างรวดเร็วมากกว่า และเกิดสภาพใดก่อนที่ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์จะเกิดอย่างรวดเร็ว

(3) มีระดับชั้นการเกิดพอลิเมอร์น้อยกว่า

(4) มีความเค้นภายในน้อยกว่า เพราะว่ามี การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อย

- คุณสมบัติ

(1) ข้อดี

- ระยะเวลาผสมสั้น
- มีการเปลี่ยนรูปร่างขณะทำน้อยกว่า จึงพอดีกับปากมากกว่า

- มีประโยชน์ในการใช้ซ่อมฟันปลอมที่แตกหัก เพราะไม่มีความจำเป็นที่จะต้องให้ความร้อนแก่ฟันปลอมที่แตกหักอีกครั้ง เป็นการลดโอกาสที่จะเกิดการบิดเบี้ยวของฟันปลอมที่นำมาซ่อม

(2) ข้อเสีย

- มีรพูนมากกว่า
- มีโมโนเมอร์ตกค้างมากกว่า
- มีกำลังความแข็งแรงต่ำกว่าชนิดบ่มด้วยความร้อน
- เมื่อใช้ไปนานๆจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง
- การยึดกับซี่ฟันปลอมอะคริลิกไม่ดี

2.9.3.3 วัสดุฐานฟันปลอมชนิดบ่มโดยแสงที่ตามองเห็น (visible light-cured materials)

อะคริลิกชนิดบ่มโดยแสง ใช้แสงเห็นด้วยตาเปล่า (visible light) ฉายลงบนแผ่นเรซิน ซึ่งมีองค์ประกอบแตกต่างไปจากวัสดุฐานฟันปลอมชนิดอื่นๆ

- องค์ประกอบมีดังต่อไปนี้

(1) พอลิเมอร์หรือเมทริกซ์ เช่น ยูรีเทนไดเมทาคริเลต (urethane dimethacrylate)

(2) สารเสริม มี 2 ชนิด คือ

- Microfine silica ใส่ในปริมาณน้อย เป็นสารเสริมอนินทรีย์

- Acrylic resin bead เม็ดอะคริลิกที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ แต่โดยเฉลี่ยประมาณ 50 ไมโครเมตร

(3) ตัวเริ่มต้นปฏิกิริยาทางแสง (photoinitiator) เช่น Camphoquinone-amine

- เครื่องมือในการบ่ม

เครื่องมือที่ใช้ คือ เต้าที่ภายในมีหลอดไฟฮาโลเจน ซึ่งให้แสงสีน้ำเงินที่มี ความยาวคลื่น ในช่วง 400-500 นาโนเมตร แสงที่ให้มีความเข้มสูงจนสามารถเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันได้ลึกถึง 5-6 มิลลิเมตร ในเต้านี้ประกอบด้วยจานที่สามารถหมุนได้เหมือนกับที่มีในเต้าไมโครเวฟ

- สารป้องกันการเกิดออกซิเดชันกับอากาศ

เนื่องจากออกซิเจนในอากาศสามารถยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ที่ผิวหน้าของวัสดุฐานฟันปลอม ดังนั้นจึงมีการใช้สารป้องกันอากาศทาเคลือบที่ผิวหน้าวัสดุฐานฟันปลอมชนิดนี้ ก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์สุดท้าย

- คุณสมบัติ
- (1) ข้อดี
 - มีความพอดีกับเหงือกมากที่สุด
 - มีความแข็งแรงดีมาก
 - ปราศจากสารตกค้าง
 - มีความเสถียรของสี
 - วิธีการทำงานง่าย
- (2) ข้อเสีย
 - ราคาแพง
 - นำไปตกแต่งเป็นชิ้นงานค่อนข้างยาก

2.10 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ruize และคณะ [9] ศึกษาผลของปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงและความเข้มข้นของรังสียูวีที่ใช้ในการบ่มสารเคลือบผิวที่เตรียมจากสารเคลือบผิวยูรีเทนไดอะคริเลตร่วมกับอะคริเลตมอนอเมอร์ต่อระดับการบ่ม ที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.9 ค่า ΔH_{total} และ $\Delta H_{residual}$ สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค photo-DSC

$$\text{Cure degree (\%)} = [(\Delta H_{total} - \Delta H_{residual}) / \Delta H_{total}] \times 100 \quad (2.9)$$

โดย ΔH_{total} คือค่าความร้อนทั้งหมดของการเกิดปฏิกิริยาของสารเคลือบผิวที่ไม่ได้ผ่านการบ่มด้วยรังสียูวี

$\Delta H_{residual}$ คือค่าความร้อนที่เหลืออยู่ของการเกิดปฏิกิริยาของสารเคลือบผิวที่ผ่านการบ่มด้วยรังสียูวี

จากการปรับปริมาณของสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงตั้งแต่ร้อยละ 0.5-5 โดยน้ำหนัก และระดับความเข้มข้นของรังสียูวีที่ใช้ในการบ่มตั้งแต่ 50-600 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตรพบว่าปริมาณของสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ระดับของการบ่มสูงขึ้น โดยปริมาณของสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงตั้งแต่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักขึ้นไปให้ระดับการบ่มที่ดี จากการปรับระดับพลังงานของรังสียูวีที่ใช้ในการบ่มสารเคลือบผิวที่มีสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงคงที่ที่ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักพบว่าความเข้มข้นของพลังงานรังสีที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สารเคลือบผิวแห้งตัวดีขึ้นได้

Kim และคณะ [10] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน (conversion) ของสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทนอะคริเลตก่อนและหลังทำการบ่มด้วยรังสียูวีด้วยเทคนิค FT-IR ยูรีเทนอะคริเลตเตรียมจากพรีพอลิเมอร์กับไตรเมทิลอลโพรเพนไตรอะคริเลต (Trimethylolpropane triacrylate; TMPTA) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมจางว่องไว ในอัตราส่วนร้อยละ 80:20 โดยน้ำหนัก และสารเบนโซฟีโนนทำหน้าที่เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก โดยพรีพอลิเมอร์นั้นเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ระหว่างเฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต พอลิเททระเอทิลีน อีเทอร์ ไกลคอล (hexamethylene diisocyanate polytetra ethylene ether glycol) และ 2 ไฮดรอกซีเอทิลอะคริเลต (2-hydroxyethyl acrylate) จากนั้นนำยูรีเทนอะคริเลตที่ได้เคลือบลงบนแผ่นแก้ว โดยฟิล์มมีความหนาเท่ากับ 300 ไมโครเมตร และทำการบ่มด้วยรังสียูวีโดยใช้หลอดยูวีที่ทำจากปรอทในความดันปานกลาง จากการศึกษาพบว่าสารก่อนทำการบ่มแสดงสเปกตรัมที่เลขคลื่น $1,635\text{ cm}^{-1}$, $1,410\text{ cm}^{-1}$ และ 810 cm^{-1} สเปกตรัมเหล่านี้แสดงถึงพันธะคู่คาร์บอน (C=C) ในยูรีเทนอะคริเลต และภายหลังจากการบ่มพบว่าสเปกตรัมดังกล่าวลดลงเหลือเพียงเล็กน้อยซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์โดยแสงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน

Studer และคณะ [11] ได้ศึกษาผลกระทบของออกซิเจนในอากาศต่อการเกิดพอลิเมอร์โดยแสง จากการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทนอะคริเลต (PUA) ที่ทำการบ่มด้วยรังสียูวีด้วยเทคนิค RT-IR โดยค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนในขณะที่ทำการบ่มที่เวลาต่าง ๆ คำนวณดังสมการที่ 2.10

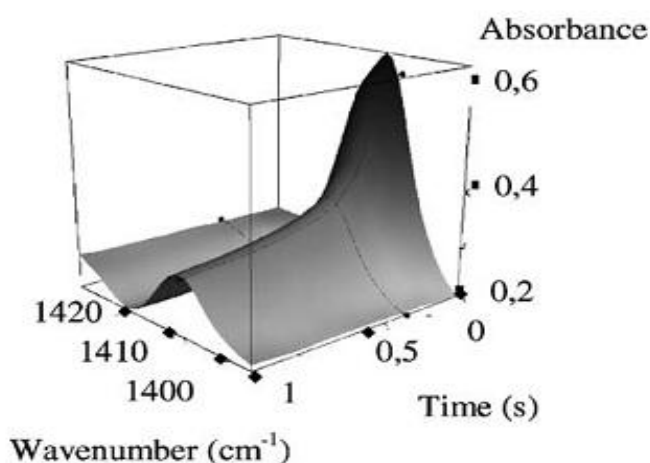
$$\text{Conversion, } x (\%) = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \quad (2.10)$$

โดย A_0 คือปริมาณการดูดซับของพันธะคู่คาร์บอนที่เลขคลื่น $1,410\text{ cm}^{-1}$ ของสารเคลือบที่ไม่ได้ผ่านการบ่มด้วยรังสียูวี

A_t คือปริมาณการดูดซับของพันธะคู่คาร์บอนที่เลขคลื่น $1,410\text{ cm}^{-1}$ ของสารเคลือบที่ผ่านการบ่มด้วยรังสียูวีที่เวลาต่าง ๆ

สารเคลือบผิวพอลิยูรีเทนอะคริเลตนี้ใช้สารไฮดรอกซีลฟีนิลคีโตน (hydroxylphenylketone) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงแบบอนุมูลอิสระ จากนั้นเคลือบสารลงบนแผ่นแบเรียมซัลไฟด์ได้ฟิล์มมีความหนาเท่ากับ 6 ไมโครเมตรและทำการบ่มด้วยรังสียูวี

ภายใต้สภาวะอากาศและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์(CO₂) โดยใช้ความเข้มข้นของรังสีเท่ากับ 30 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร จากการวิเคราะห์พบว่าสเปกตรัมที่เลขคลื่น 1,410 cm⁻¹ ลดลงเมื่อทำการบ่มเป็นเวลา 1 วินาทีดังรูปที่ 2.27 และจากการคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนในการบ่มภายใต้สภาวะอากาศมีค่าประมาณร้อยละ 30 ส่วนการบ่มภายใต้สภาวะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่าโดยมีค่าประมาณร้อยละ 70 เนื่องจากออกซิเจนในอากาศยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์โดยเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของมอนอเมอร์เรียกกระบวนการดังกล่าวว่า oxygen inhibition



รูปที่ 2.27 การลดลงของ IR สเปกตรัมที่เลขคลื่น 1,410 cm⁻¹ ที่แสดงถึงหมู่ไวนิล (-HC=CH₂) ในสารเคลือบผิว [11]

ณพรัตน์ [12] ศึกษาสารเคลือบผิวที่ใช้ป้องกันการเกิดรอยขีดบนพื้นผิวพลาสติก สารเคลือบผิวเตรียมจาก 2-ไฮดรอกซีเอทิล เมทาคริเลต (2- Hydroxyethyl Methacrylate; HEMA) เกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบอนุมูลอิสระ โดยใช้ AIBN เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยความร้อน ได้เป็น พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิล เมทาคริเลต) (Poly(2- Hydroxyethyl Methacrylate); PHEMA) จากนั้นนำพอลิเมอร์ที่ได้ทำปฏิกิริยากับ IPSE โดยหมู่ไฮดรอกซิลใน PHEMA จะทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยานตใน IPSE เกิดเป็นหมู่ยูรีเทน โดยได้ทำการปรับเปลี่ยนระดับการเข้าทำปฏิกิริยาของ IPSE ในปริมาณร้อยละ 30 50 และ 70 โดยสารที่สังเคราะห์ได้เรียกว่า functionalized PHEMA จากนั้นนำสารที่ได้ผสมกับ 4,4-ไดฟีนิลมีเทน ไดไอโซไซยานต (4,4-diphenylmethane diisocyanate; MDI) ในตัวทำละลาย ไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (dimethylformamide; DMF) MDI เป็นสารเชื่อมขวางโดยเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่

เหลืออยู่ใน functionalized PHEMA ในขณะที่เดียวกันหมู่แอลคอกซีใน IPSE เกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจลโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดโครงสร้างเชื่อมขวางกันด้วยพันธะไฮดรอกเซน คนผสมสารจนกลายเป็นเนื้อเดียวกัน และเคลือบลงบนแผ่นพอลิคาร์บอนเนตและแผ่นอะคริลิกและทำการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของการเกิดปฏิกิริยาก่อนและหลังการบ่มด้วยเทคนิค FT-IR วิเคราะห์ลักษณะการเกิดพันธะไฮดรอกเซนด้วยเทคนิค $^{29}\text{Si-NMR}$ วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature; T_g) ด้วยเทคนิค DSC และวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA นอกจากนี้ทำการทดสอบความทนต่อการขีดและความทนต่อเคมีภัณฑ์ของสารเคลือบผิวจากการวิเคราะห์คุณสมบัติของการเกิดปฏิกิริยาก่อนและหลังการบ่มพบว่าสเปกตรัมหลังบ่มปรากฏเลขคลื่นที่ $3,335\text{ cm}^{-1}$ ที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิล เลขคลื่นที่ $2,270\text{ cm}^{-1}$ ที่แสดงถึงหมู่ไอโซไซยาเนตลดลง และเลขคลื่นที่ $1,670\text{ cm}^{-1}$ ที่แสดงถึงหมู่ยูรีเทนอย่างชัดเจน ส่วนการเกิดพันธะไฮดรอกเซน (Si-O-Si) จากปฏิกิริยาไฮโดรเจลแสดงลักษณะของสเปกตรัมที่เลขคลื่นในช่วง $1,000-1,200\text{ cm}^{-1}$ แต่ไม่สามารถพบสเปกตรัมดังกล่าวได้ชัดเจนเนื่องจากเกิดการทับซ้อนกันกับสเปกตรัมในส่วนของสารอินทรีย์ จากการวิเคราะห์ระดับการเชื่อมขวางกันของพอลิไฮดรอกเซนจากจำนวนพันธะไฮดรอกเซนของซิลิกอน พบว่าสารเคลือบผิวหลังบ่มปรากฏสัญญาณที่ -58, -59 และ -63 ppm ซึ่งแสดงถึงสารไฮดรอกซิลที่เกิดพันธะไฮดรอกเซน 1 พันธะ 2 พันธะ และ 3 พันธะตามลำดับ โดยพบว่าสเปกตรัมที่แสดงถึงสารไฮดรอกซิลที่เกิดพันธะไฮดรอกเซน 2 พันธะ ปรากฏชัดเจนมากที่สุดซึ่งเพียงพอที่ทำให้เกิดโครงสร้างพอลิไฮดรอกเซนแบบวงได้ จากการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนพบว่าปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่เพิ่มขึ้นเมื่อระดับการเข้าทำปฏิกิริยาของ IPSE มีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่คือปริมาณของพอลิไฮดรอกเซนในสารเคลือบ จากการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วพบว่าสารเคลือบผิวทุกสูตรไม่พบค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วแสดงว่าสารเคลือบผิวมีการเชื่อมขวางของโครงสร้างในระดับสูงและเพียงพอที่สามารถปรับปรุงสมบัติของสารเคลือบได้ จากการทดสอบความทนต่อการขีดของฟิล์มสารเคลือบผิวพบว่าการเคลือบสารเคลือบลงบนแผ่นพอลิคาร์บอนเนต ฟิล์มสารเคลือบมีความทนต่อการขีดมากขึ้นเมื่อระดับของ IPSE ที่เข้าทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่พบว่าการเคลือบสารเคลือบลงบนแผ่นอะคริลิก ฟิล์มสารเคลือบทุกสูตรไม่สามารถปรับปรุงสมบัติความทนต่อการขีดได้ เนื่องจากสารเคลือบผิวไม่สามารถยึดติดบนแผ่นอะคริลิกได้ จากการทดสอบความทนต่อเคมีภัณฑ์พบว่าสารเคลือบผิวที่ไม่ทำการเติม IPSE ไม่ทนต่อตัวทำละลายอินทรีย์ได้แก่

เอทานอล ไดเมทิลฟอร์มาไมด์ เททระไฮโดรฟูราน แต่เมื่อทำการเติม IPSE พบว่าสารเคลือบสามารถทนต่อสารเอทานอลได้

Kahraman และคณะ [13] ได้ทำการเตรียมสารเคลือบผิวไฮบริดจากกระบวนการโซลเจล ที่ทำการบ่มด้วยรังสียูวี องค์ประกอบหลักในการเตรียมประกอบด้วย 2 ส่วนคือ องค์ประกอบ A และองค์ประกอบ B องค์ประกอบ A ประกอบด้วย เมทาคริลอ็อกซี โพรพิล ไทโรเมทอกซีไซเลน (methacryloxy propyl trimethoxysilane; MAPTMS) 1.0 กรัม ไทโรเมทอกซีไซเลน เทอร์มิเนต เอชอีพีเอ ยูรีเทน (trimethoxysilane terminated HEPA urethane; TMSHU) 8.7 กรัม และน้ำ โดยอัตราส่วนระหว่างน้ำกับซิลิกอน ($H_2O:Si$) เท่ากับ 1.5 ส่วนขององค์ประกอบ B ประกอบด้วย แอลิแพติก อีพ็อกซี อะคริเลต (aliphatic epoxy acrylate) 4.55 กรัม, 1,6-เฮกเซนไดออล ไดอะคริเลต (1,6-hexanediol diacrylate) 2.24 กรัม และสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง 0.21 กรัม จากนั้นผสมองค์ประกอบ A กับองค์ประกอบ B เข้าด้วยกันในอัตราส่วนร้อยละ 0:100, 5:95, 10:90, 20:80 และ 30:70 โดยน้ำหนัก และผสมสารช่วยเปียกในปริมาณ 0.0035 กรัม จากนั้นนำสารเคลือบขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีความหนา 30 ไมโครเมตรและบ่มด้วยรังสียูวี จากนั้นวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพันธะคาร์บอน (conversion) ด้วยเทคนิค RT-IR วิเคราะห์ระดับการเชื่อมขวางในโครงสร้างของพอลิไซลิกอกเซนจากจำนวนพันธะไซลิกอกเซนของซิลิกอนด้วยเทคนิค²⁹Si-NMR และเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพันธะคาร์บอนเมื่อสารเคลือบผิวหลังผ่านการบ่มด้วยรังสียูวีเป็นเวลา 1 วินาที พบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสูตรที่เติมองค์ประกอบ A ในปริมาณร้อยละ 10 มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่มีองค์ประกอบ B ชนิดเดียวจากร้อยละ 50 เป็นร้อยละ 28 แต่พบว่าสูตรที่เติมองค์ประกอบ A ในปริมาณร้อยละ 20 ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากการเติมในปริมาณร้อยละ 10 เพียงเล็กน้อยเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของหมู่เมทาคริลิก นอกจากนี้ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพันธะได้แก่ ความหนืด ความหนาของฟิล์ม การเกิดปฏิกิริยาควมแน่นของกระบวนการโซลเจลในสารเคลือบผิวนิثرีย์ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ และความสามารถในการเคลื่อนย้ายของโมเลกุลของสารเคลือบผิวนิثرีย์ขณะทำการบ่ม จากการวิเคราะห์ระดับการเชื่อมขวางในโครงสร้างของพอลิไซลิกอกเซนที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาโซลเจลของสาร TMSHU และ MAPTMS ซึ่งเป็นสารที่มีจำนวนหมู่แอลคอกซีที่เกิดพันธะไซลิกอกเซนได้ 1 พันธะ, 2 พันธะ และ 3 พันธะ พบว่าสารเคลือบผิวหลังบ่มปรากฏสัญญาณที่ -41, -49, -59 และ -68 ppm ซึ่งแสดงถึงไซเลนอลจาก TMSHU และ MAPTMS ที่ไม่เกิดพันธะไซลิกอกเซน และที่เกิดพันธะไซลิกอกเซน 1 พันธะ, 2 พันธะ และ 3 พันธะ ตามลำดับ นอกจากนี้

พบว่าสัญญาณที่ -41 ppm ลดลงเมื่อสารเคลือบมีปริมาณองค์ประกอบ A เพิ่มขึ้น แสดงว่าการเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ขององค์ประกอบ B ชัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสและการควบแน่นของกระบวนการโซลเจล ในส่วนขององค์ประกอบ A จากการวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวด้วย ความร้อนพบว่าการเติมองค์ประกอบ A ในปริมาณมากขึ้นช่วยปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของสารเคลือบผิวได้ โดยน้ำหนักที่หายไปที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียสมีค่าลดลงเนื่องจาก พอลิไซลิกเซนที่มีโครงสร้างเชื่อมขวางในระดับสูงที่ได้จากองค์ประกอบ A ช่วยป้องกันการสลายตัวเนื่องจากความร้อนของสารเคลือบผิว นอกจากนี้พบว่าการเติมองค์ประกอบ A ทำให้น้ำหนักสูงสุดที่หายไปมีค่าลดลงและเกิดที่อุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการเกิดพันธะโควาเลนต์เชื่อมขวางระหว่างสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ นอกจากนี้พบว่าปริมาณชาร์ที่เหลืออยู่มากขึ้น

Lee และคณะ [14] ได้ศึกษาการเตรียมสารเคลือบผิวสามชนิดได้แก่ สารเคลือบผิวพอลิเอสเทอร์อะคริเลต (constitution I) สารประกอบไซลิกเซน (constitution II) และสารเคลือบผิวไฮบริดที่เตรียมจากกระบวนการโซลเจลและบ่มด้วยรังสียูวี (constitution III) ที่ทำการเคลือบลงบนพอลิคาร์บอเนต สารเคลือบผิวพอลิเอสเทอร์อะคริเลตประกอบด้วยพอลิเอสเทอร์อะคริเลตและ 1,6 เฮกเซนไดออลไดอะคริเลต (HDDA) ในอัตราส่วน 2:1 และ 4:1 โดยน้ำหนัก โดยใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง Darocure 1173 ในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก และสารช่วยเปียกในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ส่วนสารประกอบไซลิกเซนเตรียมจากพรีไฮโดรไลซ์เททระเอทอกซีไซเลน (Prehydrolyzed TEOS) และ 3-ไตรเมทอกซีโพรพิลเมทาคริเลต (3-trimethoxysilylpropylmethacrylate; TMSPM) โดยพรีไฮโดรไลซ์เททระเอทอกซีไซเลนเตรียมได้จากการผสมเททระเอทอกซีไซเลนกับเอทานอลและสารละลายกรดที่มีค่า pH เท่ากับ 2 ในอัตราส่วน 1:4:4 โดยโมล ตามลำดับ ผสมเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นผสมสารทั้งสองเข้าด้วยกันโดยอัตราส่วนระหว่าง TEOS และ TMSPM เท่ากับ 1:1, 2:1, 3:1, และ 4:1 โดยน้ำหนัก และทำการกวนผสมที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนสารเคลือบผิวไฮบริดเตรียมได้จากการผสมสารเคลือบผิวพอลิเอสเทอร์อะคริเลตกับสารประกอบไซลิกเซนในอัตราส่วน 1:3, 1:2, 1:1, 2:1 และ 3:1 โดยน้ำหนักเข้าด้วยกันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ฟิล์มสารเคลือบผิวขึ้นรูปด้วยวิธี Spin Coat บนแผ่นพอลิคาร์บอเนตได้ฟิล์มที่มีความหนาประมาณ 2-8 ไมโครเมตรจากการวัดด้วยไมโครมิเตอร์ และทำการบ่มด้วยรังสียูวีด้วยความเข้มของรังสีเท่ากับ 3,300 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร จากการวิเคราะห์สารประกอบไซลิกเซนที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค FT-IR พบสเปกตรัมของหมู่ไฮดรอกซิลในช่วง 3,000-3,650 หมู่ไฮดรอกซิลนี้

อยู่ในโครงสร้างของซิลานอล (silanol) ที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส และพบว่าปริมาณสเปกตรัมของหมู่ไฮดรอกซิลลดลงเมื่อปริมาณ TEOS ในการเตรียมมากขึ้นแสดงว่ามีพันธะซิล็อกเซน (Si-O-Si) มากขึ้นเมื่อเติม TEOS ในปริมาณที่เพียงพอ โดยพบสเปกตรัมที่แสดงถึงพันธะซิล็อกเซนที่เลขคลื่น 453 cm^{-1} , 753 cm^{-1} และ 1075 cm^{-1} และจากการศึกษาระดับการเชื่อมขวางในโครงสร้างของพอลิซิล็อกเซนจากจำนวนพันธะซิล็อกเซนของซิลิกอนในสาร TEOS และ TMSPM ด้วยเทคนิค $^{29}\text{Si-NMR}$ โดยใช้สัญลักษณ์ Q^y แทนซิลิกอนที่มีหมู่แอลคอกไซด์ที่เกิดพันธะซิล็อกเซนได้ 4 พันธะ T^y แทนซิลิกอนที่มีหมู่แอลคอกไซด์ที่เกิดพันธะซิล็อกเซนได้ 3 พันธะ y แทนจำนวนพันธะซิล็อกเซนในซิลิกอน จากการวิเคราะห์พบสเปกตรัม T³, T⁴, Q³ และ Q⁴ ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างของพอลิซิล็อกเซนที่เกิดการเชื่อมขวางกันระดับสูงหรือมีโครงสร้างเป็นวง โดยพบว่าปริมาณสเปกตรัม T³ และ T⁴ ลดลง ส่วนสเปกตรัม Q³ และ Q⁴ เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ TEOS เพิ่มขึ้นจนถึงอัตราส่วนระหว่าง TEOS และ TMSPM เท่ากับ 2:1 อาจเนื่องมาจากสาร TEOS เกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสได้ช้าลง จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันสารเคลือบผิวไฮบริดหลังบ่มด้วยเทคนิค FT-IR พบสเปกตรัมของหมู่อะคริเลตที่เลขคลื่น $1,635\text{ cm}^{-1}$ เหลืออยู่ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเนื่องจากหมู่ไวนิลในสารเคลือบอะคริเลตเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์โดยแสงเกือบสมบูรณ์ และพบสเปกตรัมของ C-H ที่ช่วงเลขคลื่น $3,000\text{-}2,850\text{ cm}^{-1}$ และของหมู่เมทิลีนที่ $1,465\text{ cm}^{-1}$ เมื่ออัตราส่วนระหว่างสารเคลือบผิวพอลิเอสเทอร์กับสารประกอบซิล็อกเซนเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนพบว่าสารเคลือบทำให้ก๊าซซึมผ่านออกซิเจนได้ลดลง โดยเมื่อปริมาณสารเคลือบผิวพอลิเอสเทอร์อะคริเลตเพิ่มขึ้นพบว่า การซึมผ่านของก๊าซลดลงเนื่องจากการติดแน่นลดลงเมื่อปริมาณสารประกอบซิล็อกเซนเพิ่มขึ้น

Malucelli และคณะ [15] ศึกษาเกี่ยวกับผลของปริมาณเททระเอทอกซีซิลาน (Tetraethoxysilane; TEOS) ซึ่งเป็นองค์ประกอบในสารเคลือบผิวไฮบริดที่บ่มด้วยรังสียูวีต่อคุณสมบัติเปลี่ยนสภาพแก้ว เสถียรภาพทางความร้อนและการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนที่แสดงถึงระดับการแห้งตัวของสารเคลือบผิวที่มีองค์ประกอบของสารเคลือบผิวอะคริเลตเมทาคริลอิลอกซีโพรพิลไทรอะคริเลตเป็นสารคู่ควบ น้ำกลั่น สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก กรดไฮโดรคลอริก โดยปรับเปลี่ยนปริมาณ TEOS ตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 50 โดยน้ำหนัก และใช้หลอดยูวีที่ทำจากปรอทในความดันปานกลางบ่มสารเคลือบผิวด้วยความเข้มของรังสีที่ใช้เท่ากับ 20 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสารเคลือบผิวด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าการเติม TEOS ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักที่เป็นองค์ประกอบในสารเคลือบผิวไม่มีผลทำให้การ

เปลี่ยนแปลงของพันธะคาร์บอนเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับสารเคลือบผิวที่ไม่มีกำมะถันเติมเททระเอทอกซีไฮโดรเจน และจากการวิเคราะห์อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้ว (glass transition temperature; T_g) ของสารเคลือบผิวด้วยเทคนิค DSC พบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้วของสูตรที่ไม่มีกำมะถันเติม TEOS มีค่าเท่ากับ -32 องศาเซลเซียสจากนั้นค่าจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณของเททระเอทอกซีไฮโดรเจนที่เติมมากขึ้นจากร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนักเป็น -24, -18 และ -8 องศาเซลเซียสตามลำดับ เนื่องจากพอลิไซลิลอกเซนมีปริมาณมากขึ้นและทำให้สายโซ่พอลิอะคริเลตเกิดการเคลื่อนไหวของได้จำกัดมากขึ้น จากการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของสารเคลือบผิวด้วยเทคนิค TGA ภายใต้ก๊าซไนโตรเจนพบว่าสารเคลือบผิวมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น เมื่อเติมเททระเอทอกซีไฮโดรเจนที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เนื่องจากพอลิไซลิลอกเซนมีโครงสร้างเชื่อมขวางจึงสามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่เป็นปัจจัยก่อให้เกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนได้

Karatas และคณะ [16] ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของปริมาณสารตั้งต้นซิลเจลที่เตรียมจากเททระเอทอกซีไฮโดรเจน (TEOS) น้ำกลั่น กรดซัลฟิวริก และเมทานอล ที่มีผลต่อสมบัติการติดแน่น ความเงา และความทนน้ำของฟิล์มสารเคลือบที่มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนออกไซด์พอลิอะคริเลต สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง เมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ และไวโวลินเททระเอทอกซีไฮโดรเจนซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อม โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตั้งต้นซิลเจลตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนัก สารเคลือบนำมาเคลือบบนแผ่นแก้ว (plexiglass[®]) แล้วทำการบ่มด้วยรังสียูวีด้วยหลอดยูวีที่ทำจากปรอทในความดันปานกลางโดยใช้ความเข้มของรังสีในการบ่มสารเคลือบผิวเท่ากับ 720 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร จากการทดสอบการติดแน่นตามมาตรฐาน DIN 53151 พบว่าฟิล์มสารเคลือบที่เติมและไม่มีการเติมสารตั้งต้นซิลเจลแสดงค่าการติดแน่นเท่ากับ 0 ซึ่งหมายถึงการติดแน่นที่ีระหว่างสารเคลือบผิวกับวัสดุที่เคลือบ จากการทดสอบความเงาตามมาตรฐาน ASTM D-523-80 โดยทำการวัดความเงาที่มุม 60 องศา พบว่าการเติม TEOS ทำให้ความเงาเพิ่มขึ้น และจากการทดสอบความทนทานต่อน้ำซึ่งวิเคราะห์จากผลต่างของน้ำหนักของสารเคลือบผิวก่อนและหลังแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าเมื่อปริมาณของ TEOS เพิ่มขึ้นให้ค่าของผลต่างน้ำหนักก่อนและหลังแช่เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงถึงความทนทานต่อน้ำที่ลดลง

Amerio และคณะ [17] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของปริมาณสารเททระเอทอกซีไฮโดรเจน (TEOS) ต่อความแข็ง อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้ว และเสถียรภาพทางความร้อนของสารเคลือบผิวไฮบริด โดยสารเคลือบผิวไฮบริดเตรียมจากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์โดยแสงร่วมกับกระบวนการ

โซลเจล ในสารเคลือบผิวไฮบริดประกอบด้วยสารเคลือบผิวอินทรีย์ที่ได้จากการผสม 1,6 เฮกเซนไดออกไซด์ไกลซิไดล อีเทอร์ (1,6-Hexanedioldiglycidyl ether; HDGE) 3-ไกลซิโดซีลโพรพิล ไตรเมทอกซีไซเลน (3-glycidoxypropyl-trimethoxysilan, GPTS) และ สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงแบบประจุบวก และทำการเติม TEOS ในปริมาณร้อยละ 0-50 โดยน้ำหนัก จากนั้นสารเคลือบผิวที่ได้นำมาเคลือบบนแผ่นแก้วทำการบ่มด้วยรังสียูวี โดยความเข้มของรังสีในการบ่มเท่ากับ 280 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และทำการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากการเติม TEOS พบว่า สารเคลือบผิวไฮบริดที่ทำการเติม TEOS ในปริมาณมากขึ้นทำให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วเพิ่มขึ้นเนื่องจากพอลิไซลิกเซนเกิดพันธะโควาเลนต์กับสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตทำให้โครงสร้างของสารเคลือบมีการเชื่อมขวางสูงขึ้นจึงจำกัดการเคลื่อนไหวของโครงสร้างได้มากขึ้น นอกจากนี้พบว่าเสถียรภาพทางความร้อนมากขึ้น โดยอุณหภูมิที่ทำให้สารเคลือบผิวที่เติม TEOS ในปริมาณร้อยละ 50 เกิดการสลายตัว เพิ่มขึ้นและที่อุณหภูมิตั้งแต่ 700 องศาเซลเซียสพบว่าการสลายตัวน้อยลงและเกิดซารีในปริมาณมากกว่าสารเคลือบที่ไม่มีการเติม TEOS และจากการทดสอบความแข็งพบว่าฟิล์มสารเคลือบมีระดับความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเติม TEOS ในปริมาณมากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณของพอลิไซลิกเซนมากขึ้นจึงช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความแข็ง

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต

- แอลิแพติก ยูรีเทนอะคริเลต โอลิโกเมอร์ (Aliphatic urethaneacrylate Oligomer; UA) จากบริษัท Cytec
- แอลิแพติก ยูรีเทน ไดอะคริเลต ใน 1,6 เฮกเซนไดออล ไดอะคริเลต (Hexafunctional Aliphatic urethaneacrylate in Hexadiol diacrylate; UA+HDDA) จากบริษัท Cytec
- ไตรเมทิลอลโพรเพนไตรอะคริเลต (Trimethylolpropanetriacrylate; TMPTA) จากบริษัท Cytec
- ไตรโพรพิลีนไกลคอลไดอะคริเลต (Tripropyleneglycoldiacrylate; TPGDA) จากบริษัท Cytec
- สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงแบบอนุมูลอิสระชนิดที่ 1 ทางการค้า Darocur 1173 (Da1173) จากบริษัท Ciba
- สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงแบบอนุมูลอิสระชนิดที่ 2 ทางการค้า Irgacure 754 (Ir754) จากบริษัท Ciba
- สารช่วยเปียก (wetting agent) ทางการค้า PERRENOL F 40

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบไฮล๊อกเซนด้วยกระบวนการโซลเจล

- เทตระเอทอกซีไซเลน (Tetraethoxysilane; TEOS) ความเข้มข้นร้อยละ 98 เกรด AR จากบริษัท Aldrich
- ไวนิลไตรเอทอกซีไซเลน (Vinyltriethoxysilane; VTOS) ความเข้มข้นร้อยละ 97 เกรด AR จากบริษัท Aldrich
- เอทานอล (ethanol) ความเข้มข้นร้อยละ 95 เกรด CG จากบริษัท Lab-scan
- น้ำกลั่น (distilled water)
- กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl) ความเข้มข้นร้อยละ 37 เกรด AR จากบริษัท Lab-scan

- แอซีโตน (acetone) ความเข้มข้นร้อยละ 98 เกรด CG จากบริษัท Lab-scan

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารเคลือบผิวและสารประกอบไฮล๊อกเซน

- ขวดแก้วพร้อมฝาขนาด 15 มิลลิลิตร
- บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
- ปิเปต 2 มิลลิลิตร
- แท่งแม่เหล็กกวนสาร
- กระดาษวัดระดับความเป็นกรด-เบส (pH-indicator strips)
- เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 3 ตำแหน่ง
- เครื่องกวนผสม (magnetic stirrer)
- หลอดหยดสาร
- แท่งแก้วคนสาร

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มและบ่มสารเคลือบผิว

- แท่งปาดฟิล์ม 4 ด้าน (applicator)
- หลอดหยดสาร
- เครื่องบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสียูวีรุ่น UVTEC12 บริษัท คอมพรีนซ์ (ไทยแลนด์) จำกัด
- พู่กันเบอร์ 10

ซึ่งใช้หลอดยูวีที่ทำจากปรอทในความดันปานกลาง

- งานวัดความเข้มของรังสียูวีรุ่น UV-Integrator

3.2.3 วัสดุที่ใช้เป็นฐานเคลือบ

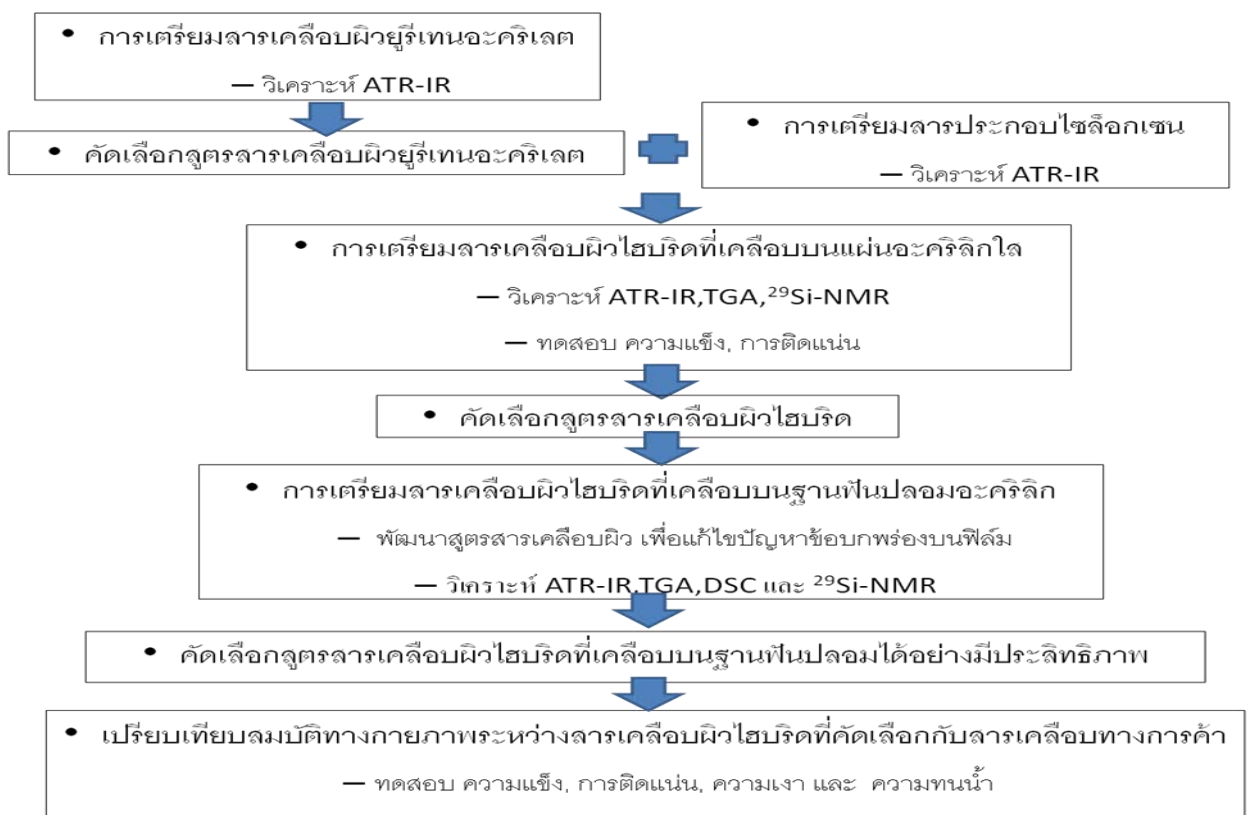
- แผ่นอะคริลิกใสขนาด 5x10x0.5 เซนติเมตร
- แผ่นกระจกใสขนาด 5x10x0.5 เซนติเมตร
- ฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิกแบบบ่มด้วยความร้อนขนาด 3x3x0.3 เซนติเมตร

3.2.4 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

- เครื่อง Attenuated total reflectance infrared spectrometer (ATR-IR) รุ่น NICOLET 6700 บริษัทเทอรโม ไชแอนทิฟิค จำกัด ประเทศ USA
- เครื่อง Thermal gravimetric analyzer (TGA) รุ่น TG/SDTA851° บริษัทเมทเธอร์-โทเลโด จำกัด ประเทศ Switzerland

- เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ยี่ห้อ Netzsch รุ่น 204 F1 Phoenix ประเทศ United kingdom
- เครื่อง ^{29}Si -Nuclear magnetic resonance analysis spectrometer (^{29}Si -NMR) (NMR 500 MHz) with CP/MAS solid probe and nano probe ยี่ห้อ Varian รุ่น INOVA ประเทศ USA
- เครื่องวัดความหนาฟิล์มด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก รุ่น PosiTector 200
- เครื่องทดสอบการขีด (mechanised scratch test apparatus)
- อุปกรณ์มีคมสำหรับทำตาราง (cross hatch cutter)
- เครื่องวัดความเงา (glossmeter) รุ่น micro-gloss 60^o, Gardner GmbH
- เทปกาวยี่ห้อ Scotch รุ่น 600
- หลอดทดลองสั้นเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 เซนติเมตร

3.3 ขั้นตอนการวิจัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

3.4 การเตรียมสารประกอบซิลิอกเซน

เตรียมตัวทำละลายโดยนำกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 37 ในปริมาณ 0.1 โมล หยดลงในน้ำกลั่น 7-26 โมล คนให้เข้ากันด้วยแท่งแก้วคนสาร ได้สารละลายกรดที่มีระดับความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 2 แล้วเติมเอทานอล 2-10 โมล คนสารให้เข้ากัน จากนั้นเติม TEOS และ VTOS ในอัตราส่วน 1:1 และ 1:4 โดยโมล ลงในขวดแก้ว แล้วหยดตัวทำละลายของสารประกอบซิลิอกเซนแต่ละแบบที่เตรียมไว้พร้อมกับคนผสมด้วย magnetic stirrer โดยใช้ความเร็วระดับ 2 ปิดฝาขวดแก้วให้สนิท ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นเปิดฝาออก แล้วคนผสมต่ออีก 6 ชั่วโมง โดยในขั้นตอนนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรดังตารางที่ 3.1 ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลระหว่าง TEOS และ VTOS ออกเป็น 2 แบบคือ Si1 (TEOS:VTOS=1:1) และ Si2 (TEOS:VTOS=1:4) และอัตราส่วนโดยโมลระหว่างน้ำกับหมู่แอลคอกซี ($\text{mol}_{\text{H}_2\text{O}}:\text{mol}_{\text{-OR}}$) และเอทานอลกับหมู่แอลคอกซี ($\text{mol}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}:\text{mol}_{\text{-OR}}$) ออกเป็น 2 แบบคือ แบบที่มีอัตราส่วนโดยโมลของน้ำกับหมู่แอลคอกซีและเอทานอลกับหมู่แอลคอกซีเท่ากับ 1.6 และ 0.6 ตามลำดับ (Si1-1 และ Si 2-1) และแบบที่มีอัตราส่วนโดยโมลของน้ำกับหมู่แอลคอกซีและเอทานอลกับหมู่แอลคอกซีเท่ากับ 1 และ 0.3 ตามลำดับ (Si1-2 และ Si 2-2) และทำการตรวจสอบคุณลักษณะของสารประกอบซิลิอกเซนด้วยเครื่อง Attenuated total reflectance infrared spectrometer (ATR-IR)

ตารางที่ 3.1 สูตรสารประกอบซิลิอกเซน

สารประกอบ ซิลิอกเซน แบบ	องค์ประกอบ (mol)						$\text{mol}_{\text{H}_2\text{O}}:$ $\text{mol}_{\text{-OR}}$	$\text{mol}_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}}:$ $\text{mol}_{\text{-OR}}$
	TEOS	VTOS	หมู่แอลคอกซี (-OR)	ตัวทำละลาย				
				น้ำ	เอทานอล	กรดไฮโดร คลอริก		
Si1-1	1	1	7	11	4	0.1	1.6	0.6
Si1-2	1	1	7	7	2	0.1	1	0.3
Si2-1	1	4	16	26	10	0.1	1.6	0.6
Si2-2	1	4	16	16	5	0.1	1	0.3

3.5 การเตรียมสูตรสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต

เตรียมสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตโดยเติมเรซิน UA TMPTA และสารช่วยเปียก ในอัตราส่วนร้อยละ 50:50:1 โดยน้ำหนัก ในขวดแก้วคนของผสมด้วยเครื่อง magnetic stirrer โดยใช้ความเร็วในระดับ 2 จากนั้นนำของผสมมา 3 กรัม จากนั้นเติมสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง 3-4 โดยน้ำหนักของเรซิน (Part per hundred resin; phr) แล้วคนผสมเป็นเวลา 15 นาที แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที โดยเก็บให้พ้นแสง จากนั้นทำความสะอาดแผ่นกระจกด้วยแอซิโตน แล้วนำสารเคลือบที่เตรียมได้เคลือบลงบนแผ่นกระจกด้วยที่ปาดฟิล์ม (applicator) ดังรูปที่ 3.2 ได้ฟิล์มที่มีความหนา 30 ไมโครเมตร แล้วบ่มด้วยรังสียูวีด้วยเครื่องบ่มดังรูปที่ 3.3 และวัดความเข้มของรังสียูวีที่ใช้ในการบ่มด้วยจาวัดดังรูปที่ 3.4

3.5.1 ตัวแปรที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตได้ทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรได้แก่ชนิดของสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง (Darocur 1173 และ Irgacur 754) ปริมาณของสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง (3 phr และ 4 phr) และความเข้มของรังสียูวีที่ใช้ในการบ่ม (3,000 และ 6,000 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร) จากการปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณของสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงโดยคงที่ค่าความเข้มของรังสียูวีเท่ากับ 3,000 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตรแบ่งสารเคลือบผิวออกได้เป็น 4 สูตร โดยปริมาณขององค์ประกอบแต่ละสูตรดังตารางที่ 3.2 และคัดเลือกสูตรที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนมากที่สุดทำการศึกษาค่าผลของความเข้มของรังสียูวีต่อการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน โดยปรับค่าความเข้มของรังสีจาก 3,000 เพิ่มขึ้นเป็น 6,000 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร นำสารเคลือบก่อนการบ่มกับสารเคลือบผิวที่ผ่านการบ่มด้วยรังสียูวีและทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนด้วยเครื่อง Attenuated total reflectance infrared spectrometer (ATR-IR) แล้วทำการคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน

ตารางที่ 3.2 สูตรสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต

สูตรสารเคลือบ ผิวยูรีเทน อะคริเลต	องค์ประกอบ				
	UA (%w/w)	TMPTA (%w/w)	สารช่วยเปียก (phr)	Da 1173 (phr)	Ir 754 (phr)
UA1-Da3	50	50	1	3	-
UA1-Ir3	50	50	1	-	3
UA1-Da4	50	50	1	4	-
UA1-Ir4	50	50	1	-	4



รูปที่ 3.2 แท่งปาดฟิล์ม 4 ด้าน (applicator)



รูปที่ 3.3 เครื่องบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสียูวีรุ่น UVTEC12



รูปที่ 3.4 จานวัดความเข้มของรังสียูวีรุ่น UV-Integrator

3.6 การเตรียมและการวิเคราะห์สารเคลือบผิวไฮบริดบนแผ่นอะคริลิกใส

เตรียมสารเคลือบผิวไฮบริด โดยทำการเติมสาร UA, TMPTA และสารช่วยเปียกในอัตราส่วน 50:50:1 โดยน้ำหนักในขวดแก้ว คนผสมของผสมจนเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำของผสมมา 3 กรัม และทำการหยดสารประกอบไฮล็กเซนที่เตรียมไว้ลงในขวดในปริมาณ

ร้อยละ 1-40 โดยนำน้ำหนักพร้อมกับทำการคนผสม จากนั้นปิดฝาขวดแก้วให้สนิทแล้วคนผสมต่อเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการเติมสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด Darocur 1173 4 phr คนผสมอีกครั้งเป็นเวลา 15 นาที แล้วทิ้งสารไว้เป็นเวลา 10 นาที ทำความสะอาดแผ่นกระจกและแผ่นอะคริลิกใสเพื่อใช้เป็นฐานเคลือบวิเคราะห์และทดสอบสมบัติทางกายภาพด้วยแอซีโตน แล้วนำสารเคลือบที่เตรียมได้เคลือบลงบนฐานเคลือบด้วยที่ปาดฟิล์ม (applicator) ได้ฟิล์มที่มีความหนา 30 ไมโครเมตร แล้วบ่มด้วยรังสียูวีด้วยความเข้มของรังสีเท่ากับ 6,000 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร

3.6.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคุณลักษณะและสมบัติทางกายภาพของฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริด

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณและชนิดของสารประกอบไฮลิกอกเซนต่อคุณลักษณะในด้านการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน เสถียรภาพทางความร้อน และระดับการเชื่อมขวางในโครงสร้างของพอลิไฮลิกอกเซน และสมบัติทางกายภาพทางด้านความแข็งและการติดแน่น โดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตสูตร UA1-Da4 กับสารประกอบไฮลิกอกเซนในปริมาณร้อยละ 100:0, 99:1, 98:2, 96:4, 90:10, 80:20 และ 60:40 โดยน้ำหนัก และปรับเปลี่ยนชนิดของสารประกอบไฮลิกอกเซนที่เติมออกเป็น 4 แบบคือแบบ Si 1-1, แบบ Si1-2, แบบSi 2-1 และแบบ Si 2-2 จึงแบ่งสารเคลือบผิวไฮบริดออกเป็น 15 สูตร โดยปริมาณขององค์ประกอบในแต่ละสูตรแสดงดังตารางที่ 3.3

3.6.2 การตรวจสอบคุณลักษณะของฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริด

(1) ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสารเคลือบผิวไฮบริดก่อนการบ่มและหลังบ่มด้วยรังสียูวีและทิ้งชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงด้วยเครื่อง Attenuated total reflectance infrared spectrometer (ATR-IR) และทำการคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่

(2) ตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermal gravimetric analyzer (TGA) แล้วทำการวิเคราะห์การสลายตัวเนื่องจากความร้อนและปริมาณชาร์ที่ตกค้างอยู่

(3) ตรวจสอบระดับการเชื่อมขวางในโครงสร้างของพอลิไฮลิกอกเซนด้วยเครื่อง

²⁹Si-Nuclear magnetic resonance analysis spectrometer (²⁹S-NMR)

3.6.3 การทดสอบสมบัติกายภาพของฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริด

การทดสอบความแข็งของฟิล์มสารเคลือบตามมาตรฐาน ASTM D 2197-98 และการติดแน่นของฟิล์มสารเคลือบตามมาตรฐาน ASTM D 3359-02 method B

ตารางที่ 3.3 สูตรสารเคลือบผิวไฮบริด

สูตรสารเคลือบผิวไฮบริด	องค์ประกอบ (%w/w)				
	สารเคลือบผิว ยูรีเทนอะคริเลต	ชนิดสารประกอบซิล็อกเซน			
		แบบSi 1-1	แบบSi 1-2	แบบSi 2-1	แบบSi 2-2
UA1-Da4	100	-	-	-	-
UA1-Da4:Si1-1 99:1	99	1	-	-	-
UA1-Da4:Si1-1 98:2	98	2	-	-	-
UA1-Da4:Si1-1 96:4	96	4	-	-	-
UA1-Da4:Si1-1 90:10	90	10	-	-	-
UA1-Da4:Si1-1 80:20	80	20	-	-	-
UA1-Da4:Si1-1 60:40	60	40	-	-	-
UA1-Da4:Si1-2 60:40	60	-	40	-	-
UA1-Da4:Si2-1 99:1	99	-	-	1	-
UA1-Da4:Si2-1 98:2	98	-	-	2	-
UA1-Da4:Si2-1 96:4	96	-	-	4	-
UA1-Da4:Si2-1 90:10	90	-	-	10	-
UA1-Da4:Si2-1 80:20	80	-	-	20	-
UA1-Da4:Si2-1 60:40	60	-	-	40	-

3.7 กาเตรียมและการวิเคราะห์สารเคลือบผิวไฮบริดบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิก

นำสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่มีคุณลักษณะและสมบัติทางกายภาพที่ดีพัฒนาให้สามารถเคลือบลงบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิกและทำการบ่มด้วยรังสียูวีได้ โดยสังเกตฟิล์มหลังบ่มต้องไม่เกิดข้อบกพร่องต่าง ๆ ได้แก่ รอยแตก (crack) ตาปลา (fish eyes) หรือฟองอากาศ (bubble) เป็นต้น และสังเกตรูปร่างของฐานพื้นปอลิเมอร์หลังการบ่มต้องไม่เกิดการเสียรูปทรง เช่น การโค้งงอโดยตัวแปรที่ได้ทำการปรับเปลี่ยนเพื่อพัฒนาสูตรสารเคลือบผิว ได้แก่ องค์ประกอบของสารเคลือบผิว ยูรีเทนอะคริเลต ปริมาณสารประกอบไฮดรอกซิลิก เช่น วิธีการขึ้นรูปฟิล์ม และความเข้มข้นของรังสียูวีที่ใช้ในการบ่ม

3.7.1 การตรวจสอบคุณลักษณะของสารเคลือบผิวไฮบริดที่พัฒนาให้สามารถเคลือบลงบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิกและบ่มด้วยรังสียูวีได้

(1) ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของพันธะคาร์บอนของสารเคลือบผิวไฮบริดก่อนบ่มและหลังบ่มด้วยรังสียูวีและทิ้งขึ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่เคลือบลงบนฐานพื้นปอลิเมอร์ด้วยเครื่อง Attenuated total reflectance infrared spectrometer (ATR-IR) และคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่

(2) ตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermal gravimetric analyzer (TGA) แล้วทำการวิเคราะห์การสลายตัวเนื่องจากความร้อนและปริมาณชาร์ที่ตกค้างอยู่

(3) ตรวจสอบอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้ว ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC)

3.8 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริดกับฟิล์มที่ได้จากการใช้สารเคลือบทางการค้า

นำฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริดที่สามารถเคลือบลงบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิกและบ่มด้วยรังสียูวีได้เปรียบเทียบกับสมบัติทางกายภาพกับฟิล์มที่ได้จากการใช้สารเคลือบทางการค้า โดยนำฟิล์มสารเคลือบหลังบ่มบนฐานพื้นปอลิเมอร์ทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D 2197-98 การติดแน่นตามมาตรฐาน ASTM D 3359-02 method B ความเงาตามมาตรฐาน ASTM D 523-89 และความทนต่อน้ำ

3.9 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน

การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนด้วยเครื่อง Attenuated total reflectance infrared spectrometer (ATR-IR) รุ่น NICOLET 6700 บริษัทเทอร์โม ไชแอนทีฟิค จำกัด ดังรูปที่ 3.5 โดยภาวะที่ใช้ทดสอบคือ ความถี่ในช่วง $400-4,000\text{ cm}^{-1}$ โดยจำนวนสแกน 64 ครั้ง และค่าความสามารถในการแยกค่าความละเอียดของภาพ (resolution) เท่ากับ 4.0 cm^{-1} โดยนำตัวอย่างก่อนการบ่มและหลังการบ่มที่ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ATR-IR แล้วนำสเปกตรัมของตัวอย่างก่อนและหลังการบ่มคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน (%conversion) จากสมการดังแสดง

$$\%conversion = [(h_0/h_{0,C=O}) - (h_t/h_{t,C=O})] / (h_0/h_{0,C=O}) \times 100 \quad (3.1)$$

โดย h_0 คือค่าความสูงของสเปกตรัมของหมู่ไวนิล ($-\text{HC}=\text{CH}_2$) ซึ่งปรากฏที่เลขคลื่น $1,407\text{ cm}^{-1}$ ก่อนทำการบ่มด้วยรังสียูวี

h_t คือค่าความสูงของสเปกตรัมของหมู่ไวนิล ($-\text{HC}=\text{CH}_2$) ซึ่งปรากฏที่เลขคลื่น $1,407\text{ cm}^{-1}$ หลังผ่านการบ่มด้วยรังสียูวีและทิ้งชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

$h_{0,C=O}$ คือค่าความสูงของสเปกตรัมของหมู่คาร์บอนิล ($>\text{C}=\text{O}$) ซึ่งปรากฏที่เลขคลื่น $1,721\text{ cm}^{-1}$ ก่อนทำการบ่มด้วยรังสียูวี

$h_{t,C=O}$ คือค่าความสูงของสเปกตรัมของหมู่คาร์บอนิล ($>\text{C}=\text{O}$) ซึ่งปรากฏที่เลขคลื่น $1,721\text{ cm}^{-1}$ หลังผ่านการบ่มด้วยรังสียูวีและทิ้งชิ้นงานไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3.5 Attenuated total reflectance infrared spectrometer (ATR-IR) รุ่น NICOLET 6700

3.10 การตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อน

การตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermal gravimetric analyzer (TGA) รุ่น TG/SDTA851^o ดังรูปที่ 3.6 ตัวอย่างที่ใช้ในการตรวจสอบได้จากฟิล์มหลังทำการบ่มที่เคลือบบนแผ่นกระจกทิ้งไว้เป็นเวลา 2 วันที่อุณหภูมิห้อง แล้วทำการขูดฟิล์มออกจากแผ่นกระจก ได้ตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นเกล็ด โดยปริมาณของตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ประมาณ 7-8 มิลลิกรัม และภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ อุณหภูมิที่ทำการวิเคราะห์จาก 50 องศาเซลเซียส ถึง 850 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนด้วยอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้อัตราการไหลของความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูปที่ 3.6 Thermal gravimetric analyzer (TGA) รุ่น TG/SDTA851^o

3.11 การตรวจสอบระดับการเชื่อมขวางในโครงสร้างของพอลิไซลิลอกเซน

การตรวจสอบระดับการเชื่อมขวางในโครงสร้างของพอลิไซลิลอกเซนด้วยเครื่อง ²⁹Si-Nuclear magnetic resonance spectrometer (NMR 500 MHz) with CP/MAS solid probe and nano probe ยี่ห้อ Varian รุ่น INOVA ความถี่ในการวิเคราะห์เท่ากับ 99 เมกะเฮิร์ตซ์ ตัวอย่างที่ใช้ในการตรวจสอบได้จากฟิล์มหลังทำการบ่มที่เคลือบบนแผ่นกระจกทิ้งไว้เป็นเวลา 2 วันที่อุณหภูมิห้อง แล้วทำการขูดฟิล์มออกจากแผ่นกระจก ได้ตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นเกล็ด

3.12 การตรวจสอบอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว

การตรวจสอบอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ยี่ห้อ Netzsch รุ่น 204 F1 Phoenix ตัวอย่างที่ใช้ในการตรวจสอบได้จากฟิล์มหลังบ่มที่เคลือบบนแผ่นกระจกทิ้งไว้เป็นเวลา 2 วันที่อุณหภูมิห้อง แล้วทำการขูดฟิล์มออกจากแผ่นกระจก ได้ตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นเกล็ด โดยใช้ปริมาณตัวอย่าง 7-8 มิลลิกรัมในการวิเคราะห์โดยภาวะที่

ใช้ในการวิเคราะห์คือ อุณหภูมิที่ทำการวิเคราะห์จาก -60 องศาเซลเซียส ถึง 200 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนด้วยอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้อัตราการไหลของความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.13 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของฟิล์มสารเคลือบ

(1) การทดสอบความแข็งของฟิล์มสารเคลือบไฮบริดตามมาตรฐาน ASTM D2197-98 ความแข็งของฟิล์มสารเคลือบคือ ความสามารถของฟิล์มสารเคลือบที่ทนการเกิดรอยจากการกดหรือขีดด้วยของแข็ง วิธีการหาความแข็งที่ใช้กันทั่วไปคือการทดสอบการขีดโดยการหาความต้านทานต่อแรงทะลุของฟิล์มโดยการขีดด้วยเข็มที่กำหนดตามมาตรฐาน การทดสอบการขีดทำได้โดยใช้เครื่องมือทดสอบการขีด (mechanized scratch test apparatus) ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งประกอบด้วยแผ่นเลื่อนได้ในแนวนอน แผ่นเลื่อนนี้วางไว้ใต้เข็มซึ่งติดแผ่นฟิล์ม เข็มยึดติดกับที่จับ เนื้อที่จับเข็มขึ้นไปเป็นที่วางน้ำหนัก เมื่อจะทำการทดสอบให้นำแผ่นทดสอบซึ่งเคลือบตัวอย่างทดสอบไว้มายึดติดให้แน่นกับแผ่นเลื่อน โดยให้ด้านยาวของแผ่นทดสอบขนานกับทิศทางของการขีด วางน้ำหนักบนที่วางเหนือเข็มโดยเริ่มจากน้ำหนักที่น้อยกว่าน้ำหนักที่คาดว่าจะทำให้เกิดแรงทะลุกับผิวเคลือบ จากนั้นทำการเลื่อนแผ่นเลื่อน เข็มจะขีดบนผิวเคลือบ ทดสอบจนกระทั่งได้น้ำหนักที่กดเข็มแล้วทำให้เกิดรอยบนฟิล์มเคลือบ ค่าที่ใช้แสดงระดับความแข็งของฟิล์มก็คือน้ำหนักที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดรอยบนฟิล์ม



รูปที่ 3.7 เครื่องมือทดสอบการขีด

(2) การทดสอบการติดแน่นของฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริดตามมาตรฐาน ASTM D3359-02 Method B ทดสอบได้โดยวิธี cross-cut tape การติดแน่นของฟิล์มเป็นการแสดงระดับการยึดของฟิล์มกับวัสดุที่เคลือบ วิธีการทดสอบจะใช้อุปกรณ์มีคมปาด (cross hatch cutter) ดังรูปที่ 3.8 ปาดฟิล์มให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาดเล็ก ๆ บนผิวฟิล์มให้ทะลุถึงแผ่นทดสอบ แล้วใช้เทปติดที่บริเวณรอยขีดให้สนิท แล้วดึงเทปออกอย่างรวดเร็ว ตรวจสอบขอบพร้อมของฟิล์มแล้วนำไปเปรียบเทียบกับภาพมาตรฐานดังรูปที่ 3.9 โดยมีทั้งหมด 6 ระดับ คือ 0B-5B ระดับ 5B แสดงถึงสารเคลือบผิวติดแน่นได้ดีที่สุด และระดับ 0B แสดงถึงสารเคลือบผิวติดแน่นได้ไม่ดีที่สุด



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์มีคมปาด

ระดับการติดแน่น	ลักษณะของฟิล์ม	ภาพ
5B	ขอบของรอยตัดเรียบไม่มีส่วนเสียหาย	
4B	เกิดการหลุดล่อนของส่วนที่ติดกันแต่ ความเสียหายต้องไม่เกิน 5%	
3B	เกิดการหลุดล่อนตามขอบและส่วนที่ติดกัน ความเสียหายมากกว่า 5% แต่ไม่เกิน 15%	
2B	เกิดการหลุดล่อนตามขอบและตามแนวยาว ของส่วนที่ถูกตัดความเสียหายมากกว่า 15%	
1B	เกิดการหลุดล่อนตามขอบและตามแนวยาวของส่วนที่ ถูกตัดความเสียหายมากกว่า 35% แต่ไม่เกิน 65%	
0B	เกิดการหลุดล่อนมากและเกิดทุกจุดบนสารเคลือบจน ไม่สามารถจัดอยู่ในระดับ 1B ได้	

รูปที่ 3.9 แสดงภาพมาตรฐานแสดงถึงระดับการติดแน่น [20]

(3) ความเงา ระดับความเงาของฟิล์มขึ้นอยู่กับความสามารถในการรับแสงและสะท้อนออกไปของฟิล์ม ความสามารถดังกล่าวขึ้นอยู่กับความเรียบของผิวฟิล์มและองค์ประกอบของสารเคลือบผิว การทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM D 523-89 การวัดความเงาของฟิล์มเป็นการวัดเปรียบเทียบกับของแผ่นทดสอบมาตรฐาน โดยมีการระบุมุมที่ลำแสงตกไปกระทบพื้นผิวฟิล์มโดยทั่วไปนิยมวัดความเงาที่มุม 20 องศา 60 องศา และ 85 องศา

วิธีวัดด้วยมุม 60 องศาใช้ได้กับฟิล์มทั้งหมด ส่วนวิธีวัดด้วยมุม 20 องศาใช้ได้กับฟิล์มสารเคลือบที่มีความเงาสูง และส่วนวิธีวัดด้วยมุม 85 องศาใช้ได้กับฟิล์มสารเคลือบที่มีความเงาต่ำ ในการวัดความเงาใช้เครื่องวัดความเงา (gloss meter) ดังรูปที่ 3.9 การวัดความเงาให้สอบเทียบ

เครื่องวัดความเงาเมื่อเริ่มวัดทุกครั้ง และระหว่างการวัดควรสอบเทียบเพื่อตรวจสอบความคงที่ในการวัดค่าความเงา สำหรับการวัดความเงาบนฟิล์มของแผ่นทดสอบ ให้วัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ แล้วนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย

ความเงาแบ่งออกได้เป็นหลายระดับดังนี้

- เงาเต็ม หมายถึง ความเงาที่มีค่าสูงกว่า 70 หน่วย เมื่อวัดด้วยเครื่องวัดความเงาที่มุม 60 องศา พื้นผิวที่มีความเงาเต็มที่จะเรียบและมีลักษณะคล้ายกระจกที่สุด
- กึ่งเงา หมายถึง ความเงาที่มีค่าระหว่าง 30 และ 70 หน่วย เมื่อวัดด้วยเครื่องวัดความเงาที่มุม 60 องศา
- เงาเปลือกไข่ หมายถึง ความเงาที่มีค่าอยู่ระหว่าง 15 ถึง 30 หน่วย เมื่อวัดด้วยเครื่องวัดความเงาที่มุม 60 องศา
- ด้านเปลือกไข่ หมายถึง ความเงาที่มีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 15 หน่วย เมื่อวัดด้วยเครื่องวัดความเงาที่มุม 60 องศา
- ด้าน หมายถึง ไม่มีมีความเงาแม้จะมองเฉียง ๆ (โดยทั่วไป ค่าความเงาต่ำกว่า 15 หน่วย เมื่อวัดด้วยค่าความเงาที่มุม 85 องศา)



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดความเงา

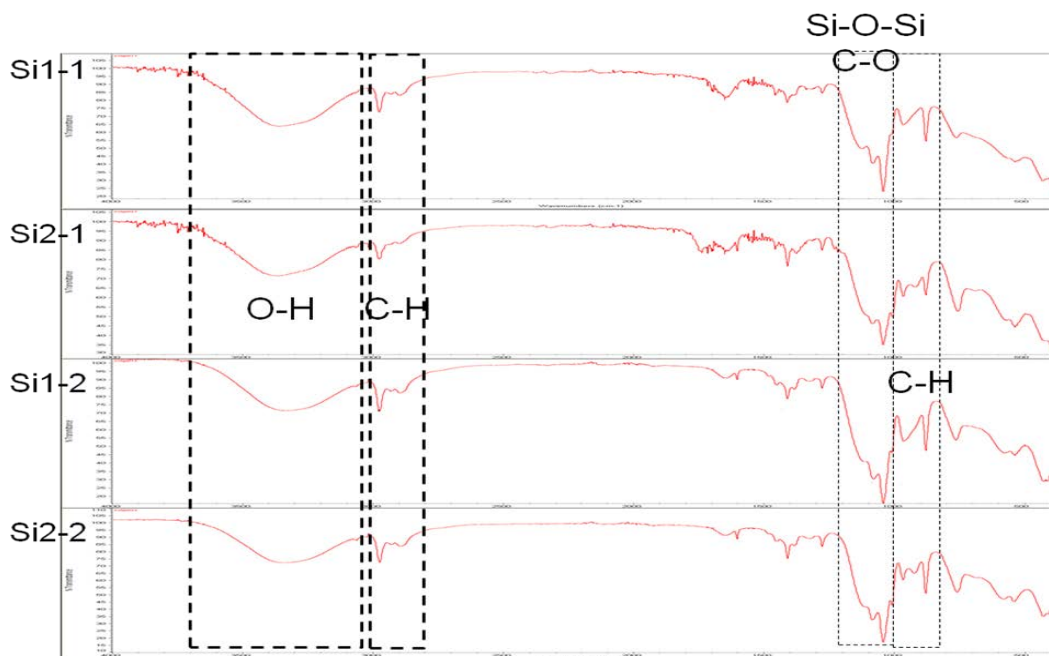
(4) ความทนน้ำ ความทนน้ำของฟิล์มสารเคลือบผิวเป็นการทดสอบความสามารถในการป้องกันน้ำของฟิล์มไม่ให้ซึมผ่านเข้าไปได้ การทดสอบทำโดยนำแผ่นทดสอบปิดปากหลอดทดลองที่มีน้ำในปริมาณที่กำหนด แล้วทำการคว่ำหลอดทดลองเพื่อให้น้ำสัมผัสกับฟิล์มแล้วทิ้งไว้ตามระยะเวลาที่กำหนด เมื่อครบระยะเวลาแล้ว นำแผ่นทดสอบออกจากน้ำแล้วซับด้วยกระดาษซับ ตรวจสอบฟิล์มเพื่อดูรอยพองหรือขอบบวมพร่องอื่น ๆ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 คุณลักษณะของสารประกอบซิลิอกเซน

จากการวิเคราะห์ตรวจสอบสารประกอบซิลิอกเซนที่เตรียมได้ด้วยเครื่อง ATR-IR ดังรูปที่ 4.1 พบว่าสารประกอบซิลิอกเซนทุกแบบแสดงสเปกตรัมปรากฏที่เลขคลื่นในช่วง $3,000-3,500\text{cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงหมู่ O-H ในโครงสร้างของเอทานอล น้ำ และซิลีนอล(Si-OH) ซึ่งเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของสาร TEOS และ VTOS และช่วง $2,900-3,000\text{ cm}^{-1}$, $1,277-1,449\text{ cm}^{-1}$ และ $810-880\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงถึงหมู่ C-H จากโครงสร้างของ TEOS, VTOS และเอทานอล นอกจากนี้พบสเปกตรัมที่เลขคลื่น $1,043\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่ C-O-C ในเอทานอล $1,086\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่ C-O-Si ใน TEOS และ VTOS กับพันธะซิลิอกเซน (Si-O-Si) ที่มีโครงสร้างเป็นวง (cyclic structure) ที่เลขคลื่น $1,120\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงพันธะซิลิอกเซน (Si-O-Si) ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง (linear structure) และที่เลขคลื่น 963 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ C-H ใน TEOS และ VTOS ดังนั้นจากการวิเคราะห์สเปกตรัมที่ได้พบว่าสารประกอบที่เตรียมได้แต่ละแบบเกิดพันธะซิลิอกเซนที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง



รูปที่ 4.1 IR สเปกตรัมของสารประกอบซิลิอกเซนแบบ Si 1-1, Si 2-1, Si 1-2 และ Si 2-2

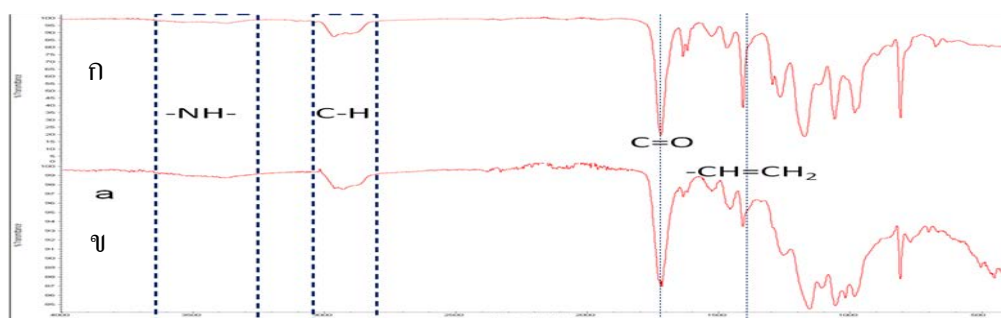
4.2 การเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต

การเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน ($>C=CH_2$) เกิดจากสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต เมื่อผ่านการบ่มด้วยรังสียูวีทำให้สาร UA และ TMPTA เกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์โดยแสงที่มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระและกลายเป็นพอลิยูรีเทนอะคริเลต โดยสารเคลือบที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนในปริมาณมากกว่าแสดงว่าฟิล์มสารเคลือบที่ได้หลังบ่มเกิดการแห้งตัวที่ดีกว่า จากการเติมสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงในปริมาณ 1 phr, 2phr, 3phr และ 4 phr ลงในสูตร UA1 ที่ประกอบด้วย UA กับ TMPTA ในอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก พบว่าการเติมสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงปริมาณ 3 phr และ 4 phr ให้ฟิล์มสารเคลือบมีการแห้งตัวในระดับที่ดีโดยทดสอบด้วยวิธีแตะสัมผัส (touch dry test) จึงนำสูตรสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต UA1-Da3 และ UA1-Da4 ที่เติมสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง Darocur 1173 ในปริมาณ 3 phr และ 4 phr และ สูตร UA1-Ir3 และ UA1-Ir4 ที่เติมสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง Irgacure 754 ในปริมาณ 3 phr และ 4 phr ศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง และความเข้มข้นของรังสียูวีที่ใช้ในการบ่มต่อการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตโดยวิเคราะห์สารเคลือบก่อนบ่มและฟิล์มสารเคลือบบนแผ่นกระจกหลังบ่มแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมงด้วยเครื่อง ATR-IR ผลของสเปกตรัมที่วิเคราะห์ได้ของสูตร UA1-Ir4, UA1-Da4 และ UA1-Da4 ที่ใช้ความเข้มข้นของรังสียูวีในการบ่มเท่ากับ 6,000 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร ดังรูปที่ 4.2-4.4 แล้วนำสเปกตรัมที่ได้คำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่ จากการวิเคราะห์สารเคลือบก่อนบ่มพบว่าสารเคลือบทุกสูตรแสดงสเปกตรัมลักษณะเหมือนกัน โดยสเปกตรัมปรากฏที่เลขคลื่นในช่วง $3,300-3,500\text{ cm}^{-1}$ และ $2,900-3,000\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่ N-H และ C-H นอกจากนี้ยังพบสเปกตรัมที่เลขคลื่น $1,721\text{ cm}^{-1}$, $1,524\text{ cm}^{-1}$ และ $1,457\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่คาร์บอนิล ($>C=O$), หมู่ยูรีเทน (HNCOO) และหมู่เมทิลีน ($-CH_2-$) ตามลำดับ และที่ $1,635\text{ cm}^{-1}$ และ $1,407\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่ไวนิล ($-CH=CH_2$) จากการวิเคราะห์ฟิล์มสารเคลือบหลังบ่มพบว่าสารเคลือบทุกสูตรแสดงสเปกตรัมลักษณะเหมือนกัน โดยสเปกตรัมปรากฏเลขคลื่นเหมือนสารเคลือบก่อนบ่มแต่พบว่าสเปกตรัมของหมู่ไวนิล ($-CH=CH_2$) มีความสูงลดลง แสดงถึงการเกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ฟิล์มหลังบ่มพบว่าสเปกตรัมที่เลขคลื่น $400^{-1}-1,300\text{ cm}^{-1}$ เกิดการทับซ้อนกับสเปกตรัมของแผ่นแก้วที่เป็นฐานเคลือบจึงไม่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์

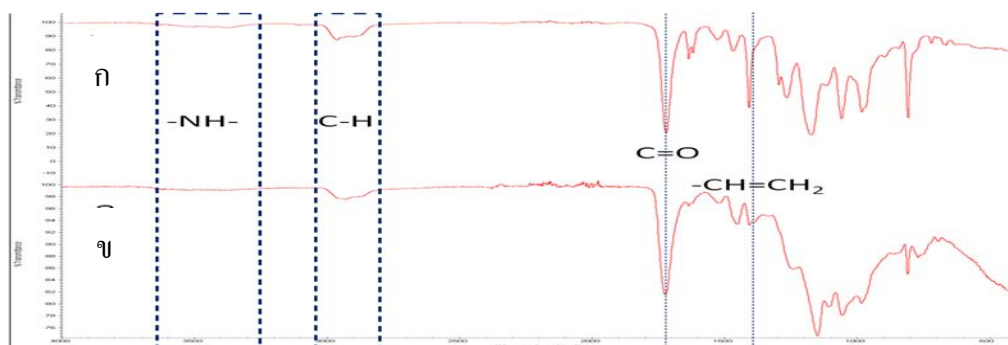
การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสูตรสารเคลือบผิว UA1-Da3, UA1-Ir3, UA1-Da4 และ UA1-Ir4 เพื่อเปรียบเทียบผลของการเติมสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง

2 ชนิดได้แก่ Darocur 1173 และ Irgacure 754 ในปริมาณ 3 phr และ 4 phr ต่อปริมาณ การเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน โดยคงที่ค่าความเข้มของรังสียูวีในการบ่มเท่ากับ 3,000 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร จากการวิเคราะห์ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน ได้จากการคำนวณด้วยสมการในหัวข้อที่ 3.9 พบว่าสูตรสารเคลือบผิว UA1-Da3, UA1-Ir3, UA1-Da4 และ UA1-Ir4 เกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่ในปริมาณร้อยละ 38.7, 34.3, 53.0 และ 33.8 ของปริมาณหมู่ไว้นิลทั้งหมดตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ผลของชนิดสารริเริ่ม ปฏิริยาด้วยแสงพบว่าสูตรที่เติม Darocure 1173 (UA1-Da3 และ UA1-Da4) ทำให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงของพันธะคู่ได้มากกว่าสูตรที่เติม Irgacur 754 (UA1-Ir3 และ UA1-Ir4) ในส่วนผล ของปริมาณสารริเริ่มปฏิริยาด้วยแสงมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Ruize และคณะ [9] ที่ พบว่าเมื่อปริมาณ Darocure 1173 เพิ่มขึ้นจาก 3 phr เป็น 4 phr ทำให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงของ พันธะคู่มากขึ้น แต่เมื่อปริมาณ Irgacur 754 เพิ่มขึ้นให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่ลดลง เล็กน้อย ดังนั้นสูตร UA1-Da4 ซึ่งใช้สารริเริ่มปฏิริยาด้วยแสง Darocure 1173 ในปริมาณ 4 phr เป็นสูตรที่มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนสูงสุด

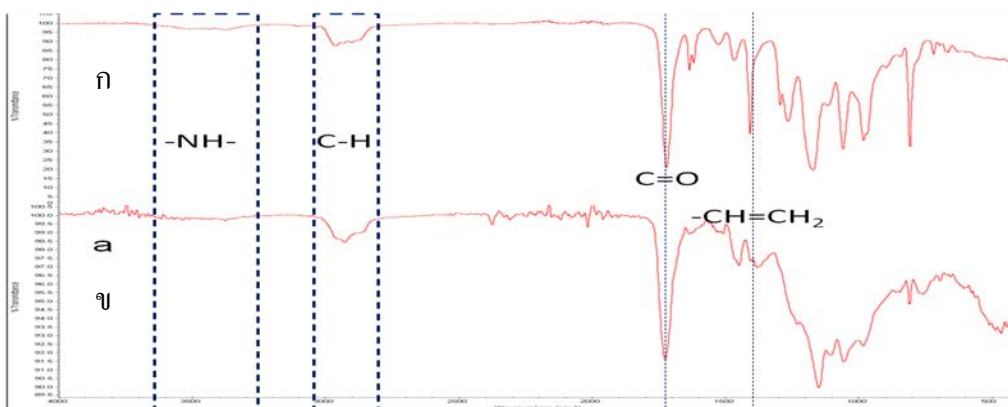
จากการเปรียบเทียบผลของความเข้มของรังสียูวีที่ใช้ในการบ่มจาก 3,000 เพิ่มขึ้นเป็น 6,000 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตรต่อการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน โดยได้นำสูตร UA1-Da4 ใช้ในการทดลอง ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการวิจัยของ Ruize และคณะ [9] เช่นกัน โดยพบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มของรังสีเพิ่มขึ้น โดยมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 58.4 ของปริมาณหมู่ไว้นิลทั้งหมด และจากการทดสอบระดับการแห้งตัวด้วยวิธีแตะด้วยนิ้ว (Touch dry test) พบว่าทำให้ฟิล์ม มีการแห้งตัวที่ดีกว่า ดังนั้นจึงเลือกสูตร UA1-Da4 นำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งของสารเคลือบผิวอินทรีย์ ในสารเคลือบผิวไฮบริด โดยใช้ ความเข้มของรังสียูวีในการบ่มเท่ากับ 6,000 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร



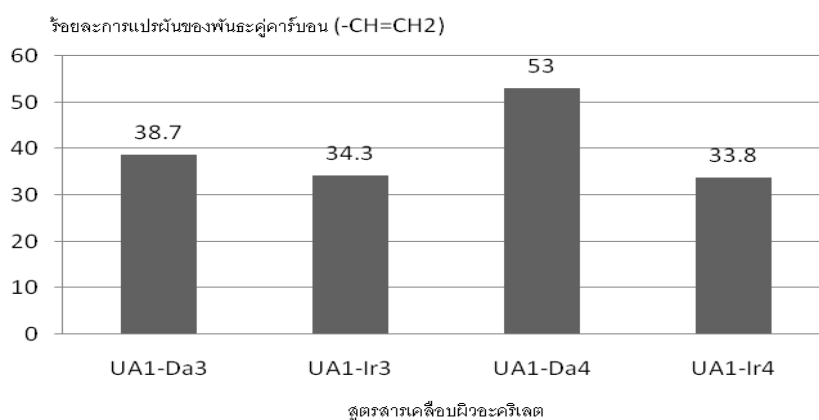
รูปที่ 4.2 IR สเปกตรัมของสูตร UA1-Ir4 ก่อนทำการบ่ม (ก) และหลังทำการบ่ม (ข)



รูปที่ 4.3 IR สเปกตรัมของสูตรUA1-Da4 ก่อนทำการบ่ม (ก) และหลังทำการบ่ม (ข)



รูปที่ 4.4 IR สเปกตรัมของสูตรUA1-Da4 ที่ใช้ความเข้มของรังสียูวีในการบ่มเท่ากับ 6,000 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตรก่อนทำการบ่ม (ก) และหลังทำการบ่ม (ข)

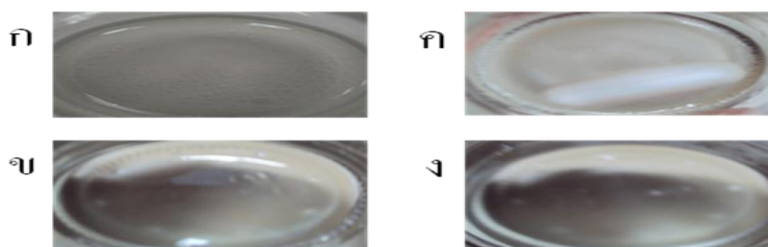


รูปที่ 4.5 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสูตรสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต

4.3 คุณลักษณะและสมบัติทางกายภาพของสารเคลือบผิวไฮบริด

4.3.1 ลักษณะภายนอกของสารเคลือบผิวไฮบริด

จากการศึกษาลักษณะภายนอกของสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่ทำการเติมสารประกอบไฮล็คอกเซนแบบ Si 1-1, Si1-2, Si2-1 และ Si2-2 ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงดังรูปที่ 4.6 พบว่าสูตรสารเคลือบผิวที่เติม Si 1-1 และ Si 2-1 เกิดการแยกตัวกันของสารอย่างชัดเจนโดยส่วนสารเคลือบกระจายตัวในสารประกอบไฮล็คอกเซนเนื่องจากในสารประกอบไฮล็คอกเซนประกอบด้วยน้ำ เอทานอล ทำให้สารประกอบมีความเป็นขั้วสูงจึงไม่เข้ากับสารเคลือบผิวที่มีความเป็นขั้วต่ำ แต่สูตรสารเคลือบผิวที่เติม Si 1-2 และ Si 2-2 ไม่พบการแยกตัวของสารเนื่องจากในการเตรียมใช้น้ำและเอทานอลในปริมาณที่น้อยกว่าแบบ Si 1-1 และ Si 2-1



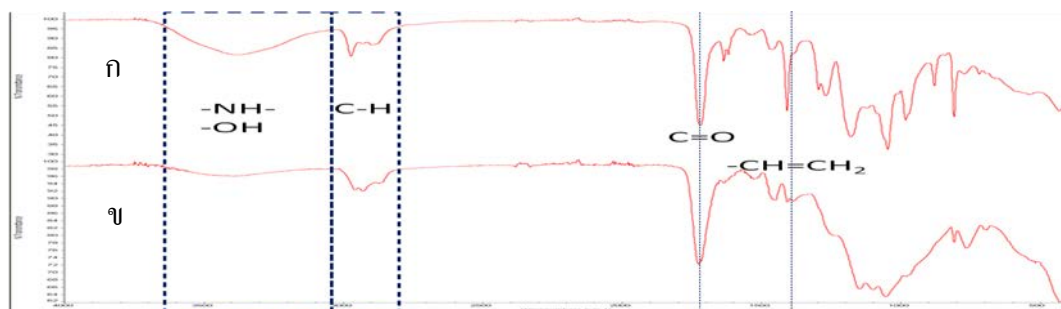
รูปที่ 4.6 ลักษณะภายนอกของสารเคลือบผิวไฮบริดที่เติมสารประกอบไฮล็คอกเซนแบบ Si1-1 (ก) แบบSi1-2 (ข) แบบSi2-1 (ค) และแบบSi2-2 (ง)

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน

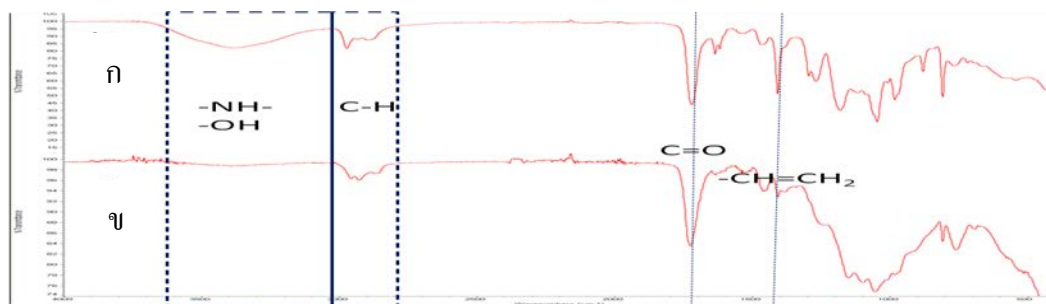
จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3 พบว่าสูตร UA1-Da4 ที่ใช้ความเข้มข้นของรังสียูวีในการบ่มเท่ากับ 6,000 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตรเกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนเพียงร้อยละ 58.4 ของปริมาณหมู่ไวนิลทั้งหมด อาจเกิดได้จาก 2 สาเหตุได้แก่ จากการศึกษาของ Studer และคณะ [11] พบว่าออกซิเจนในอากาศยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์โดยเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของมอนอเมอร์เรียกกระบวนการดังกล่าวว่า การยับยั้งโดยออกซิเจน (oxygen inhibition) และจากการศึกษาของ Kahraman และคณะ [13] พบว่าเกิดจากสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตเกิดการเชื่อมขวางมากจนโมเลกุลเกิดการเคลื่อนย้ายได้ยากต่อการเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์. ในส่วนผลของการเติมสารประกอบไฮล็คอกเซนต่อการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่ จากงานวิจัยของ Kahraman และคณะ [9] พบว่าการเติมสารประกอบ

ไซลิลอกเซนทำให้การเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่ลดลงเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นของสารประกอบไซลิลอกเซนขัดขวางปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ระหว่างการบ่มโดยเกิดจากหมู่ไวนิลในสารประกอบไซลิลอกเซนเข้าทำปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์กับหมู่ไวนิลในส่วนของสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตได้และสารประกอบไซลิลอกเซนเกิดปฏิกิริยาควบแน่นต่อไปจนกลายเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่เข้าทำปฏิกิริยาของสายไซโพลิเมอร์ จากการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารประกอบไซลิลอกเซนต่อการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสารเคลือบผิวไฮบริดโดยวิเคราะห์สารเคลือบก่อนบ่มและฟิล์มสารเคลือบบนแผ่นแก้วหลังบ่มแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง ATR-IR สเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์สูตรที่เติมสารประกอบไซลิลอกเซนแบบ Si 1-1, Si1-2, Si 2-1 และ Si 2-2 ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักดังรูปที่ 4.7-4.10 จากการวิเคราะห์สารเคลือบก่อนบ่มพบว่าสูตรสารเคลือบทุกสูตรแสดงสเปกตรัมปรากฏที่เลขคลื่นเหมือนกับสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต แต่พบว่าสเปกตรัมของสูตรที่เติมสารประกอบไซลิลอกเซนในปริมาณร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก ปรากฏที่เลขคลื่นในช่วง $3,000-3,500\text{ cm}^{-1}$ มีพื้นที่ขยายกว้างขึ้นเนื่องจากการทับซ้อนกันของสเปกตรัมระหว่างหมู่ N-H จากส่วนสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตกับหมู่ O-H จากเอทานอล น้ำ และหมู่ไฮเลนอล (Si-OH) ในสารประกอบไซลิลอกเซน จากการวิเคราะห์ฟิล์มสารเคลือบหลังบ่มพบว่าสเปกตรัมมีลักษณะคล้ายกับสารเคลือบผิวก่อนบ่ม แต่พบว่าสเปกตรัมของหมู่ไวนิล ($1,635\text{ cm}^{-1}$ และ $1,410\text{ cm}^{-1}$) มีความสูงลดลงแสดงถึงการเกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน นอกจากนี้พบว่าสูตรที่เติมสารประกอบไซลิลอกเซนในปริมาณร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก ปรากฏสเปกตรัมของหมู่ N-H และ O-H ($3,000-3,500\text{ cm}^{-1}$) มีความกว้างของพื้นที่ลดลง แสดงว่าสารไฮเลนอลเกิดปฏิกิริยาควบแน่น และน้ำหรือเอทานอลเกิดการระเหยในขณะทำการบ่ม ผลการตรวจสอบปริมาณของสารประกอบไซลิลอกเซนต่อการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนดังรูปที่ 4.11 โดยใช้วิธีในการคำนวณค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่เหมือนกับสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต จากการวิเคราะห์ผลของปริมาณสารประกอบไซลิลอกเซนพบว่าสูตรที่เติมสารประกอบไซลิลอกเซนแบบ Si 1-1 ในปริมาณร้อยละ 4-20 โดยน้ำหนัก มีค่าการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่ต่ำกว่าสูตร UA1-Da4 ซึ่งสอดคล้องกับการวิจัยของ Kahraman และคณะ [13] โดยเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นขัดขวางปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ แต่ค่าการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ Si 1-2 เพิ่มขึ้น จนกระทั่งสูตรที่เติม Si 1-2 ในปริมาณร้อยละ 40 มีค่าการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่มากกว่าสูตร UA1-Da4 ซึ่งไม่สอดคล้องกับงานวิจัยที่อ้างอิง แต่จากการศึกษาของ KICKELBICK [4] ได้แสดงว่าสารเคลือบผิวอนินทรีย์มีความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สได้ต่ำ

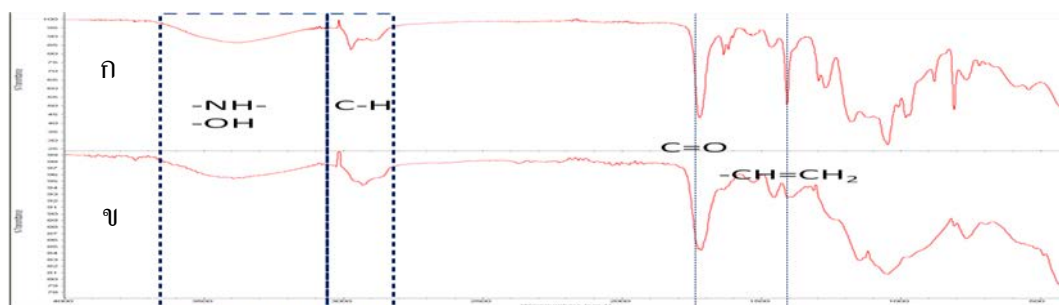
การเติมสารประกอบไฮดรอกซีเบนแบบ Si 1-1 ในปริมาณมากขึ้นจึงช่วยให้ก๊าซออกซิเจนซึมผ่านได้น้อยลงในขณะที่ทำการบ่ม จึงลดปัจจัยการเกิด การยับยั้งโดยออกซิเจน (oxygen inhibition) ในส่วนของสูตรที่เติมสารประกอบไฮดรอกซีเบนแบบ Si 2-1 พบว่าการเติมในปริมาณร้อยละ 4-40 โดยน้ำหนัก มีค่าการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกันโดยมีค่าต่ำกว่าสูตร UA1-Da4 ซึ่งเกิดจากปัจจัยการขัดขวางของปฏิกิริยาการควบแน่นต่อการเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ จากการวิเคราะห์ผลของชนิดสารประกอบไฮดรอกซีเบนที่เติมในสารเคลือบผิวต่อการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน โดยคงที่ปริมาณการเติมสารประกอบไฮดรอกซีเบนเป็นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักดังรูปที่ 4.12 พบว่าสูตรที่เติมสารประกอบไฮดรอกซีเบนแบบ Si1-1 และแบบ Si 1-2 มีค่าการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่มากกว่าสูตรที่เติมสารประกอบไฮดรอกซีเบนแบบ Si 2-1 และ Si 2-2 เนื่องจากการสารประกอบไฮดรอกซีเบนแบบ Si 2-1 และ Si 2-2 มีองค์ประกอบของหมู่ไวโนลของ VTOS ในสารประกอบไฮดรอกซีเบนในปริมาณมากกว่าแบบ Si 1-1 และ Si 1-2 ทำให้มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาควบแน่นขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ในระหว่างการบ่มได้มากกว่า และจากการเปลี่ยนชนิดของสารประกอบไฮดรอกซีเบนจากการเติมแบบ Si 1-1 เป็น แบบ Si 1-2 พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของพันธะลดลงเพียงเล็กน้อยจากร้อยละ 62.3 เปลี่ยนเป็น 60 ของปริมาณหมู่ไวโนลทั้งหมดซึ่งมากกว่าสูตรที่ไม่มีการเติมสารประกอบไฮดรอกซีเบน และจากการเติมแบบ Si 2-1 เป็น แบบ Si 2-2 พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่มีค่าไม่แตกต่างกันเท่ากับร้อยละ 53.7 และ 54.5 ตามลำดับ



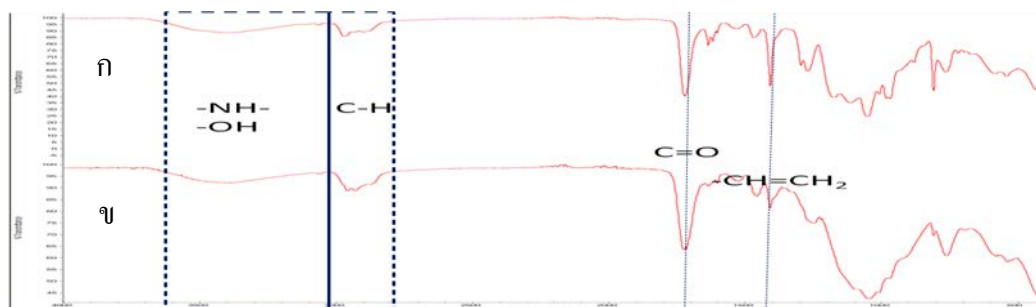
รูปที่ 4.7 IR สเปกตรัมของสูตร UA1-Da4:Si1-1 60:40 ก่อนทำการบ่ม (ก) และหลังทำการบ่ม (ข)



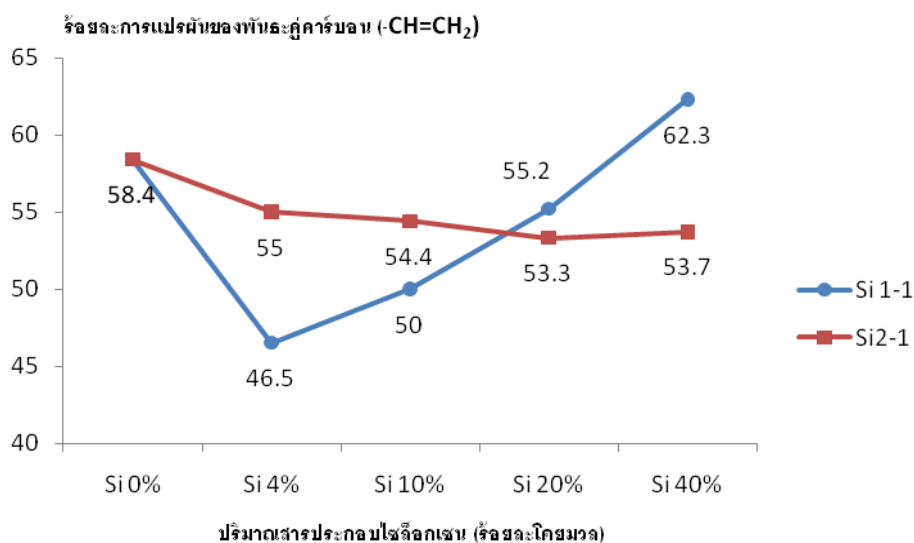
รูปที่ 4.8 IR สเปกตรัมของสูตร UA1-Da4:Si2-1 60:40 ก่อนทำการบ่ม (ก)
และหลังทำการบ่ม (ข)



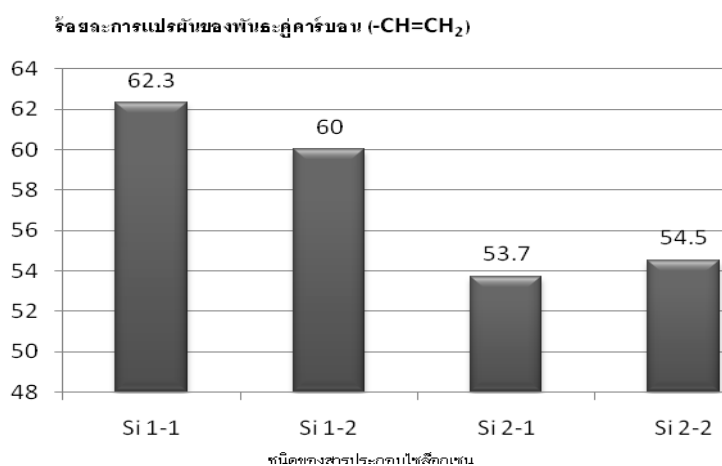
รูปที่ 4.9 IR สเปกตรัมของสูตร UA1-Da4:Si1-2 60:40 ก่อนทำการบ่ม (ก)
และหลังทำการบ่ม (ข)



รูปที่ 4.10 IR สเปกตรัมของสูตร UA1-Da4:Si2-2 60:40 ก่อนทำการบ่ม (ก)
และหลังทำการบ่ม (ข)



รูปที่ 4.11 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่ไม่ทำการเติมและทำการเติมสารประกอบไซลิกเซนแบบ Si 1-1 และ Si 2-1 ในปริมาณร้อยละ 4-40 โดยน้ำหนัก



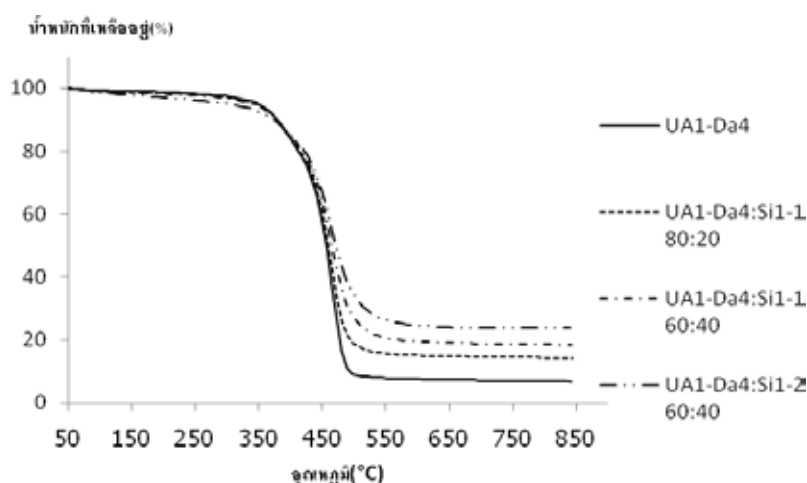
รูปที่ 4.12 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่ไม่ทำการเติมและทำการเติมสารประกอบไซลิกเซนแบบ Si 1-1 Si 2-1 Si 1-2 และ Si 2-2 ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

4.3.3 เสถียรภาพทางความร้อน

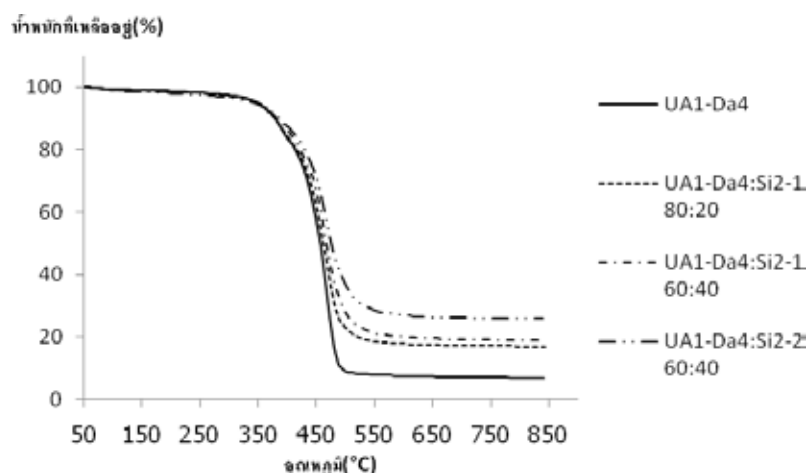
เสถียรภาพทางความร้อนของสารเคลือบผิวไฮบริดทำการตรวจสอบด้วยเครื่อง TGA โดยสารเคลือบผิวที่นำมาวิเคราะห์มีลักษณะเป็นเกล็ดเล็ก ๆ ที่ได้มาจากการชุบฟิล์มหลังการบ่มออกจากแผ่นกระจก โดยทำการวิเคราะห์อุณหภูมิที่สารเกิดการสลายตัวและปริมาณสารที่

เหลืออยู่ จากการวิเคราะห์ผลของสูตรที่เติมสารประกอบซิลิอกเซนแบบ Si 1-1 และ Si 1-2 ต่อการสลายตัวด้วยความร้อนดังรูปที่ 4.13 และสูตรที่เติมสารประกอบซิลิอกเซนแบบ Si 2-1 และ Si 2-2 การสลายตัวด้วยความร้อนดังรูปที่ 4.14 พบว่าผลที่ได้ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Amerio และคณะ [17] ที่พบว่าสูตรสารเคลือบผิวทุกสูตรเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 330 ถึง 500 องศาเซลเซียส โดยเป็นการสลายตัวในส่วนของสายโซ่ในโครงสร้างของพอลิยูรีเทนอะคริเลตและระหว่างพอลิยูรีเทนอะคริเลตกับพอลิซิลิอกเซนและในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 500 ถึง 850 องศาเซลเซียสพบว่าสารเคลือบผิวเกิดการสลายตัวเพียงเล็กน้อยและพบการตกค้างของชาร์

จากการวิเคราะห์ผลของปริมาณและชนิดของสารประกอบซิลิอกเซนในสารเคลือบผิวไฮบริดต่อปริมาณของชาร์ตกค้างอยู่ดังตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณของชาร์ตกค้างอยู่มากขึ้นเมื่อปริมาณสารประกอบซิลิอกเซนเพิ่มขึ้น และในสูตรที่เติมสารประกอบซิลิอกเซนในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักพบว่าปริมาณชาร์ตที่ตกค้างอยู่เพิ่มขึ้นเมื่อเปลี่ยนชนิดของสารประกอบซิลิอกเซนที่ใช้เติมจากแบบ Si 1-1 เปลี่ยนเป็น Si 1-2 และจาก Si 2-1 เปลี่ยนเป็น Si 2-2 โดยการเติม Si 1-2 และ Si 2-2 มีปริมาณชาร์ตที่ตกค้างอยู่ใกล้เคียงกันเท่ากับร้อยละ 24 และ 26 ตามลำดับ ชาร์ตดังกล่าวส่วนใหญ่มาจากพอลิซิลิอกเซน (SiO_2) ที่ได้จากสารประกอบซิลิอกเซนหลังจากผ่านการบ่มด้วยรังสียูวีซึ่งมีความทนต่อความร้อน และบางส่วนได้จากชาร์ของคาร์บอนในสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตแสดงว่าสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่เติมสารประกอบซิลิอกเซนแบบ Si 1-2 และ Si 2-2 มีปริมาณของพอลิซิลิอกเซนใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.13 การสลายตัวด้วยความร้อนของสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่ไม่มีการเติมและมีการเติมสารประกอบซิลิอกเซนแบบ Si 1-1 ในปริมาณ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก และแบบ Si 1-2 ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.14 การสลายตัวด้วยความร้อนของสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่ไม่มีการเติมและมีการเติมสารประกอบซิลิอกเซนแบบ Si 2-1 ในปริมาณร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก และ แบบ Si 2-2 ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1 ปริมาณซาร์ของสูตรสารเคลือบผิวไฮบริด

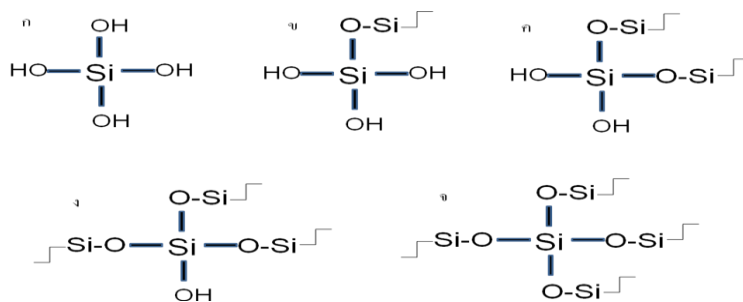
สูตรสารเคลือบผิว	ปริมาณซาร์ที่ตกค้าง (% w/w)	
	ทางทฤษฎี	จากการทดลอง
UA1-Da4	0	7
UA1-Da4:Si 1-1 80:20	10	14
UA1-Da4:Si 1-1 60:40	20	18
UA1-Da4:Si 1-2 60:40	25	24
UA1-Da4:Si 2-1 80:20	10	17
UA1-Da4:Si 2-1 60:40	20	19
UA1-Da4:Si 2-2 60:40	26	26

4.3.4 การวิเคราะห์ระดับการเชื่อมขวางในโครงสร้างของพอลิซิลิอกเซน

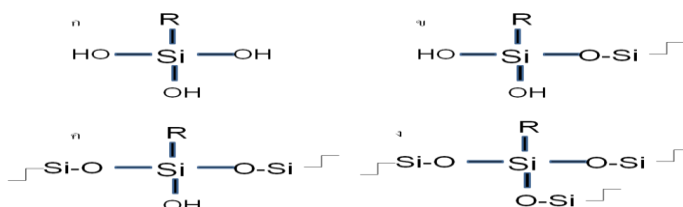
จากผลการตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อนพบว่าสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่เติมสารประกอบซิลิอกเซนแบบ Si 1-2 และ Si 2-2 ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักมีปริมาณพอลิซิลิอกเซนที่เท่ากัน จึงทำการตรวจสอบระดับการเชื่อมขวางในโครงสร้างของพอลิซิลิอกเซน

จากจำนวนหมู่แอลคอกซีของไฮเลนอลจาก TEOS และ VTOS ที่เกิดพันธะซิลิอกเซน (Si-O-Si) ด้วยเครื่อง $^{29}\text{Si-NMR}$ เพื่อคัดเลือกสูตรที่มีโครงสร้างของระดับการเชื่อมขวางของโครงสร้างพอลิซิลิอกเซนที่มากกว่า โดยสารไฮเลนอลจาก TEOS ที่ไม่เกิดพันธะซิลิอกเซน และที่เกิดพันธะซิลิอกเซน 1 พันธะ, 2 พันธะ, 3 พันธะ และ 4 พันธะ ดังรูปที่ 4.15 ก-จ และโครงสร้างของไฮเลนอลจาก VTOS ที่ไม่เกิดพันธะซิลิอกเซน ที่เกิดพันธะซิลิอกเซน 1 พันธะ, 2 พันธะ และ 3 พันธะ ดังรูปที่ 4.16 ก-ง ผลของสูตรที่ทำการเติมสารประกอบซิลิอกเซนแบบ Si 1-2 และแบบ Si 2-2 ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักที่วิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 4.17 พบว่าสัญญาณที่ปรากฏใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Siramanont และคณะ [18] พบว่าสูตรที่เติมสารประกอบซิลิอกเซนแบบ Si 1-2 และ Si 2-2 ปรากฏสัญญาณที่ -98 ppm ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างของไฮเลนอลจาก TEOS ที่เกิดพันธะซิลิอกเซน 3 พันธะ ซึ่งแสดงถึงพันธะซิลิอกเซนที่มีโครงสร้างเป็นวง และสัญญาณที่ -78 ppm และ -69 ppm แสดงถึงโครงสร้างของไฮเลนอลจาก VTOS ที่เกิดพันธะซิลิอกเซน 3 พันธะ และ 2 พันธะ ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงพันธะซิลิอกเซนที่มีโครงสร้างเป็นวง นอกจากนี้ปรากฏสัญญาณ -57 ppm ซึ่งแสดงโครงสร้างของไฮเลนอลจาก VTOS ที่เกิดพันธะซิลิอกเซน 1 พันธะซึ่งแสดงถึงพันธะซิลิอกเซนที่มีโครงสร้างเป็นตรงเท่านั้น ดังนั้นจากการวิเคราะห์แสดงว่าการบ่มสารเคลือบผิวด้วยรังสียูวีทำให้สารประกอบซิลิอกเซนเกิดปฏิกิริยาไซลเจลและเกิดพันธะซิลิอกเซน (Si-O-Si) ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงกลายเป็นวงทำให้สารเคลือบผิวมีโครงสร้างการเชื่อมขวางในระดับสูง

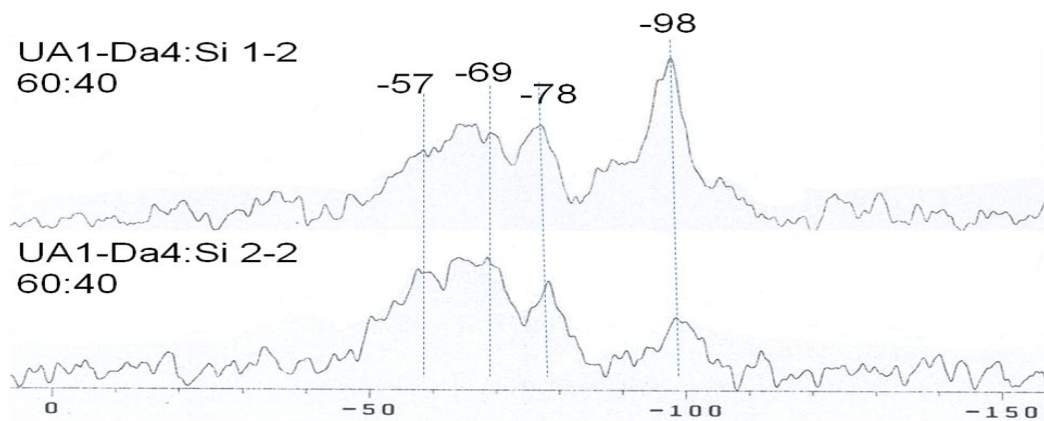
จากการวิเคราะห์ผลชนิดของสารประกอบซิลิอกเซนที่เติมในสารเคลือบผิวไฮบริดต่อระดับการเชื่อมขวางของพอลิซิลิอกเซนพบว่าการเติมสารประกอบซิลิอกเซนแบบ Si 1-2 แสดงสัญญาณที่ -98 มีความสูงมากกว่าและสัญญาณที่ -57 มีความสูงน้อยกว่าการเติม Si 1-2 โดยที่ความสูงของสัญญาณที่ -79 และ -69 มีความสูงใกล้เคียงกัน และแสดงว่าสูตรที่ Si 1-2 มีปริมาณของไฮเลนอลจาก TEOS ที่เกิดพันธะซิลิอกเซน 3 พันธะมากกว่าและไฮเลนอลจาก VTOS ที่เกิดพันธะซิลิอกเซน 1 พันธะน้อยกว่าสูตรที่เติม Si 2-2 โดยที่โครงสร้างลักษณะอื่น ๆ มีปริมาณใกล้เคียงกัน แสดงว่าการเติมสารประกอบซิลิอกเซนแบบ Si 1-2 มีปริมาณพันธะซิลิอกเซนที่มีโครงสร้างเป็นวงมากกว่าและมีพันธะซิลิอกเซนที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงน้อยกว่า ดังนั้นสูตรที่เติมสารประกอบซิลิอกเซนแบบ Si 1-2 มีระดับการเชื่อมขวางในโครงสร้างของพอลิซิลิอกเซนที่มากกว่าสูตรที่เติมแบบ Si 2-2



รูปที่ 4.15 โครงสร้างซิลเลนอลจาก TEOS ที่ไม่เกิดพันธะไฮดรอกซิล (ก) เกิดพันธะไฮดรอกซิล 1 พันธะ (ข) 2 พันธะ (ค) 3 พันธะ (ง) และ 4 พันธะ (จ)



รูปที่ 4.16 โครงสร้างซิลเลนอลจาก VTOS ที่ไม่เกิดพันธะไฮดรอกซิล (ก) เกิดพันธะไฮดรอกซิล 1 พันธะ (ข) 2 พันธะ (ค) และ 3 พันธะ (ง)

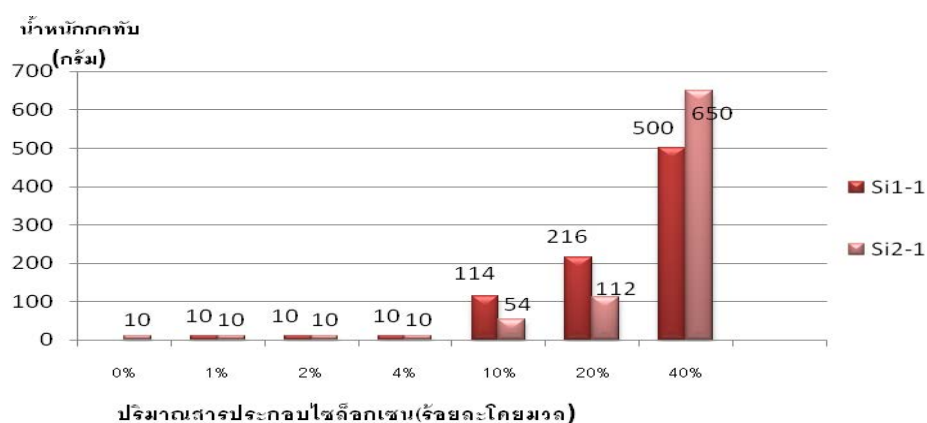


รูปที่ 4.17 ^{29}Si -NMR กราฟของสารเคลือบผิวไฮบริดที่ทำการเติมสารประกอบไฮดรอกซิลแบบ Si 1-2 และ Si 2-2 ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

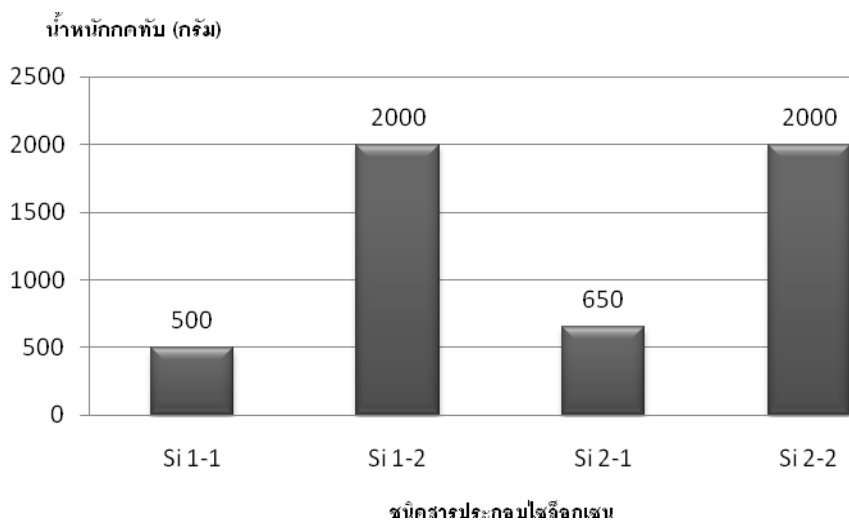
4.3.5 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มไฮบริดที่บ่มด้วยรังสียูวีบนแผ่นอะคริลิกใส

(1) ความแข็ง

ฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริดที่มีความหนาเท่ากับ 30 ไมโครเมตรบนแผ่นอะคริลิกใสนำมาทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D 2197-98 โดยความแข็งของฟิล์มวัดจากน้ำหนักที่น้อยที่สุดที่ซีกดทับแท่งเข็มแล้วทำให้เกิดรอยบนฟิล์ม จากการวิเคราะห์ผลของปริมาณและชนิดของสารประกอบไฮลิกอกเซนต่อความแข็งของฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริดดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ พบว่าการเติมสารประกอบไฮลิกอกเซนในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักช่วยปรับปรุงสมบัติความแข็งของฟิล์มไฮบริดได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มจากสูตรที่มีสารเคลือบผิวยูรีเทนอะครีเลตเพียงอย่างเดียว และจากการเติมสารประกอบไฮลิกอกเซนในปริมาณเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 10 เป็น 20 และ 40 โดยน้ำหนักพบว่าความแข็งของฟิล์มไฮบริดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารประกอบไฮลิกอกเซนเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ณพรัตน์ [12] เนื่องจากฟิล์มมีปริมาณพอลิไฮลิกอกเซนมากขึ้น ในส่วนของชนิดของสารประกอบไฮลิกอกเซนโดยคงที่ปริมาณที่เติมในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าการเติมสารประกอบไฮลิกอกเซนแบบ Si 1-1 เปลี่ยนเป็นแบบ Si 1-2 และจากแบบ Si 2-1 เปลี่ยนเป็นแบบ Si 2-2 ช่วยทำให้ฟิล์มไฮบริดมีความแข็งเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากมีปริมาณพอลิไฮลิกอกเซนมากขึ้นโดยที่สูตรที่เติมสารประกอบไฮลิกอกเซนแบบ Si 1-2 และแบบ Si 2-2 มีความแข็งที่ดีเหมือนกันโดยค่าน้ำหนักที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดรอยบนฟิล์มมีค่าเท่ากับ 2 กิโลกรัม แสดงว่าสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่มีปริมาณพอลิไฮลิกอกเซนมากกว่าร้อยละ 20 ช่วยปรับความแข็งของฟิล์มให้ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 4.18 สมบัติด้านความแข็งของฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริดที่ไม่มีการเติมและเติมสารประกอบไฮลิกอกเซนแบบ Si 1-1 และ Si 2-1 ในปริมาณร้อยละ 4-40 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.19 สมบัติด้านความแข็งของฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริดที่เติมสารประกอบไฮลิกเซนแบบ Si 1-1 Si 1-2 Si 2-1 และ Si 2-2 ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

(2) การติดแน่น

จากการทดสอบการติดแน่นของฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริดตามมาตรฐาน ASTM D3359-02 Method B ดังตารางที่ 4.2 โดยการติดแน่นของฟิล์มวัดจากระดับข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นบนฟิล์มหลังการทดสอบเปรียบเทียบกับภาพมาตรฐาน และรายงานผลเป็นระดับ ซึ่งแบ่งระดับตั้งแต่ 0B-5B โดยระดับ 5B แสดงถึงฟิล์มติดแน่นกับวัสดุที่เคลือบได้ดีที่สุด และระดับ 0B แสดงถึงฟิล์มติดแน่นกับวัสดุที่เคลือบได้ไม่ดีที่สุด พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Karatus และคณะ[16] โดยฟิล์มที่ใช้สารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตเพียงอย่างเดียวแสดงค่าการติดแน่นในระดับ 5B ซึ่งแสดงถึงการติดแน่นที่ดีที่สุด และเมื่อทำการเติมสารประกอบไฮลิกเซนแบบ Si 1-1, Si 1-2, Si 2-1 และ Si 2-2 ลงในสารเคลือบผิวในปริมาณต่าง ๆ พบว่าฟิล์มมีค่าการติดแน่นในช่วง 4B ถึง 5B แสดงว่าการเติมสารประกอบไฮลิกเซนในปริมาณต่าง ๆ ไม่มีผลทำให้สมบัติการติดแน่นต่ำลงเนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) ในสารประกอบไฮลิกเซนเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่คาร์บอนิลในแผ่นอะคริลิกใส

ตารางที่ 4.2 การติดแน่นของสูตรสารเคลือบผิวไฮบริด

สูตรสารเคลือบผิว	ระดับการติดแน่น
UA1-Da4	5B
UA1-Da4:Si 1-1 99:1	4B
UA1-Da4:Si 1-1 98:2	5B
UA1-Da4:Si 1-1 96:4	5B
UA1-Da4:Si 1-1 90:10	5B
UA1-Da4:Si 1-1 80:20	5B
UA1-Da4:Si 1-1 60:40	5B
UA1-Da4:Si 1-2 60:40	5B
UA1-Da4:Si 2-1 99:1	4B
UA1-Da4:Si 2-1 98:2	5B
UA1-Da4:Si 2-1 96:4	4B
UA1-Da4:Si 2-1 90:10	5B
UA1-Da4:Si 2-1 80:20	5B
UA1-Da4:Si 2-1 60:40	5B
UA1-Da4:Si 2-2 60:40	5B

ดังนั้นจากการตรวจสอบคุณลักษณะและทดสอบสมบัติทางกายภาพของสารเคลือบผิวไฮบริด จึงคัดเลือกสารเคลือบผิวสูตร UA1-Da4: Si 1-2 60:40 นำไปทดลองเคลือบลงบนฐานฟันปลอมอะคริลิก เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนพร้อมทั้งมีปริมาณของพอลิไฮล๊อกเซนในปริมาณที่ดีที่สุดที่มีระดับการเชื่อมขวางของโครงสร้างในระดับสูงทำให้ฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริดแสดงสมบัติทางด้านความแข็งและการติดแน่นที่ดี

4.4 การปรับสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่บ่มด้วยรังสียูวีบนฐานพื้นปลอมอะคริลิกเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องบนผิวฟิล์ม

จากการวิจัยในขั้นต้นได้คัดกรองสูตรสารเคลือบผิวจนได้สูตรที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดคือสูตรสารเคลือบผิวไฮบริด UA1-Da4:Si 1-2 60:40 แต่เมื่อทดลองนำมาเคลือบลงบนฐานพื้นปลอมอะคริลิกกว้าง 3 ซม. ยาว 3 ซม. และหนา 0.1 ซม. โดยวิธีการจุ่มและใช้ความเข้มข้นของรังสียูวีในการบ่มเท่ากับ 6,000 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตรพบว่าฟิล์มของสารเคลือบผิวหลังบ่มเกิดรอยแตกดังตารางที่ 4.3 ซึ่งอาจเกิดจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อนในขณะทำการบ่มทำให้ฐานพื้นปลอมอะคริลิกและสารเคลือบผิวเกิดการขยายตัวแต่สารเคลือบผิวไฮบริดขยายตัวได้น้อยกว่าเนื่องจากสารเคลือบผิวเกิดโครงสร้างแบบร่างแหที่มีระดับการเชื่อมขวางสูงในขณะบ่ม นอกจากนี้พบว่าฐานพื้นปลอมที่ได้เกิดการโค้งงออย่างมาก ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลขององค์ประกอบในสารเคลือบผิวไฮบริดที่มีต่อการเกิดรอยแตกดังตารางที่ 4.3 พบว่าการใช้สาร UA เป็นองค์ประกอบอย่างเดียวนำมาเคลือบลงบนฐานพื้นปลอมฟิล์มที่ได้เกิดรอยแตก ในส่วนของสูตรสารเคลือบผิว UA1-Da4 และ UA1-Da4:Si 1-2 60:40 ฟิล์มที่ได้เกิดรอยแตกที่รุนแรงขึ้นตามลำดับ



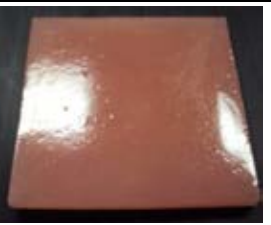
แนวทางแก้ไขการโค้งงอของฐานพื้นปลอมทำโดยการลดความเข้มข้นของรังสียูวีในการบ่มจาก 6,000 เปลี่ยนเป็น 3,000 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร และในส่วนการแก้ไขการเกิดรอยแตกทำโดยการปรับสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดด้วยการเปลี่ยนองค์ประกอบในสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตและลดปริมาณการเติมสารประกอบไซลิกเซนเพื่อทำให้ฟิล์มที่ได้สามารถขยายตัวได้มากขึ้น จากการปรับสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดเพื่อแก้ไขการเกิดรอยแตก ลักษณะของฟิล์มที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าฟิล์มที่ได้มีความหนาประมาณ 30-50 ไมโครเมตรจากการวัดด้วยเครื่องวัดความหนาด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิก โดยจากการเปลี่ยนองค์ประกอบสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต (ไม่มีการเติมสารประกอบไซลิกเซน) เริ่มจากการเปลี่ยนตัวเชื่อมขวางวงไวซินิด TMPTA เปลี่ยนเป็น TPGDA โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง UA กับ TPGDA เท่ากับ 25:75, 50:50 และ 75:25 โดยน้ำหนัก พบว่าการใช้สาร TPGDA ในปริมาณร้อยละ 25 ทำให้ฟิล์มเกิดรอยแตกเพียงเล็กน้อยเนื่องจาก TMPTA มีหมู่ไวนิล (-CH=CH₂) ถึง 3 หมู่ แต่ TPGDA มีหมู่ไวนิล (-CH=CH₂) เพียง 2 หมู่ จึงลดระดับการเชื่อมขวางได้และในโครงสร้างของ TPGDA ประกอบด้วยพันธะ -O- ทำให้ฟิล์มเกิดการขยายตัวได้มากขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มมีระดับการแห้งตัวที่ดีกว่าการเติม TPGDA ในปริมาณร้อยละ 50 และ 75 โดยน้ำหนักจากการทดสอบด้วยวิธีแตะด้วยนิ้ว (touch dry test) จากนั้นเลือกอัตราส่วนดังกล่าวมาทำการปรับปรุงเพื่อไม่ให้เกิดรอยแตก โดยทำการเปลี่ยนการใช้สาร UA เป็น สาร UA ที่มีการผสมตัวเชื่อมขวางวงไวซินิด HDDA

(UA+HDDA) โดยอัตราส่วนระหว่าง UA+HDDA กับ TPGDA ที่ใช้เท่ากับ 75 :25 โดยน้ำหนักโดยเรียกว่าสูตร UA1-1-Da4 พบว่าฟิล์มที่ได้ไม่เกิดรอยแตกเนื่องจากโครงสร้างของ HDDA มีสายโซ่คาร์บอนอยู่ในโครงสร้างทางเคมีที่ทำให้ฟิล์มขยายตัวได้มากขึ้น ดังนั้นจึงนำสูตร UA1-1-Da4 ทำการเติมสารประกอบไซลิลอกเซนแบบ Si 1-2 ในปริมาณ 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ลงในสูตร UA1-1-Da4 เรียกว่าสูตร UA1-1-Da4:Si1-2 70:30 และ UA1-1-Da4:Si1-2 60:40 ตามลำดับ พบว่าฟิล์มจากสูตรที่เติมสารประกอบไซลิลอกเซนในปริมาณร้อยละ 30 ไม่เกิดรอยแตก แต่สูตรที่เติมสารประกอบไซลิลอกเซนในปริมาณร้อยละ 40 เกิดรอยแตก ดังนั้นจึงนำสูตร UA1-1-Da4:Si1-2 70:30 ไปพัฒนาต่อไป

ตารางที่ 4.3 ลักษณะการแตกของฟิล์มเนื่องจากองค์ประกอบในสารเคลือบผิวไฮบริด

สูตรสารเคลือบผิว	ข้อบกพร่อง	รูปฟิล์ม
UA1-Da4:Si1-2 60:40 W1	เกิดรอยแตกมีลักษณะเป็นเส้นขนาดใหญ่ทั่วฟิล์ม	
UA 100%	เกิดรอยแตกมีลักษณะเป็นเส้นบาง ๆ บริเวณขอบฟิล์ม	
UA : TMPTA 50:50	เกิดรอยแตกมีลักษณะเป็นเส้นขนาดใหญ่ทั่วฟิล์ม	

ตารางที่ 4.4 ลักษณะของฟิล์มสารเคลือบบนฐานของพินปลอมอะคริลิกเพื่อแก้ไขการเกิดรอยแตก

สูตรสารเคลือบผิว	ปริมาณ Si 1-2 (%w/w)	ข้อบกพร่อง	รูปฟิล์ม
UA:TPGDA 75:25	0	เกิดรอยแตกมี ลักษณะเป็นเส้น บาง ๆ	
UA+HDDA:TPGDA 75:25 (UA1-1-DA4)	0	ไม่เกิดรอยแตก	
UA1-1-Da4: Si1-2 60:40 W1	40	เกิดรอยแตกมี ลักษณะเป็นเส้น ขนาดใหญ่ที่มุม ด้านล่างทางขวาและ	
UA1-1-Da4: Si1-2 70:30 W1	30	ไม่เกิดรอยแตก แต่พบ ตาปลาและ ฟองอากาศทั่วฟิล์ม	

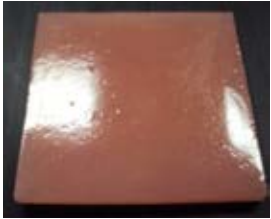
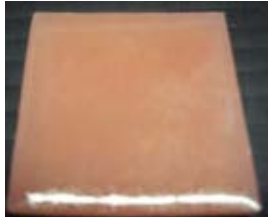
การเกิดรอยแตกของฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริดหลังการบ่มแก้ไขได้ด้วยการปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณในสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตและลดปริมาณการเติมสารประกอบไฮดรอกซีซิลอน แต่ฟิล์มที่ได้นั้นพบปัญหาอื่น ๆ ได้แก่ ตาปลา (fish eye) และฟองอากาศ จึงทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยฟิล์มแห้งบนฐานพินปลอมทำการบ่มด้วยความเข้มข้นเท่ากับ 3,000 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตรและทำการวัดความหนาด้วยเครื่องวัดความหนาด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกพบว่าฟิล์มมีความหนาประมาณ 30-50 ไมโครเมตร การเกิดตาปลาบนฟิล์มแก้ไขโดยการเติมสารช่วยเปียกในสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตมากขึ้นจาก 1 phr เป็น 4 phr ผลที่ได้ดังตารางที่ 4.5 โดยจากการเติมสารช่วยเปียกมากขึ้นพบว่าสารช่วยเปียกในปริมาณ 4 phr ช่วยทำให้ฟิล์มไฮบริดหลังการบ่มเกิดตาปลาบนพื้นผิวลดลงมากเนื่องจากสารช่วยเปียกช่วยทำให้สารเคลือบไหลบนพื้นผิวของฐานพินปลอมได้ง่ายขึ้นและอาจช่วยทำให้สารเคลือบผิว

ยูรีเทนอะคริเลตและสารประกอบไฮลิกอกเซนเกิดความเข้ากันได้มากขึ้น และพบว่าฟิล์มที่ได้จากสูตรที่เติมสารช่วยเปียกในปริมาณ 4 phr มีการแห้งตัวในระดับที่ดีจากการทดสอบด้วยวิธีการแตะด้วยนิ้ว แต่การเติมสารช่วยเปียกในปริมาณมากขึ้นอาจทำให้การแห้งตัวของฟิล์มลดลงจึงไม่ทำการเติมสารช่วยเปียกเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงนำสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่มีปริมาณสารช่วยเปียกในส่วนในสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตเท่ากับ 4 phr ไปพัฒนาต่อไป

ในส่วนของฟองอากาศที่เกิดขึ้นแก้ไขโดยการเปลี่ยนวิธีการขึ้นรูปฟิล์มจากการจุ่มเป็นปาดด้วยแปรง และทำการลดความหนืดด้วยการเติมสาร TMPTA ผลที่ได้ดังตารางที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ พบว่าการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการจุ่มและการปาดด้วยแปรงให้ความหนาที่ใกล้เคียงกัน แต่การขึ้นรูปฟิล์มด้วยการปาดด้วยแปรงพบฟองอากาศในฟิล์มน้อยกว่า ดังนั้นจึงเลือกวิธีขึ้นรูปโดยปาดด้วยแปรงไปพัฒนาต่อไป

จากการปรับความหนืดของสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตด้วยการลดปริมาณการใช้ UA+HDDA แทนที่ด้วยการเติมสาร TMPTA ที่มีความหนืดต่ำกว่าเพื่อลดการเกิดฟองอากาศและช่วยเพิ่มระดับการแห้งตัวของสารเคลือบผิวได้ โดยได้ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง UA+HDDA, TPGDA และ TMPTA เท่ากับ 70:25 :5 และ 60:25:10 โดยน้ำหนัก เรียกว่าสูตร UA1-2-Da4 และ UA1-3-Da4 ตามลำดับ และทำการเติมสารประกอบไฮลิกอกเซนในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าฟิล์มเกิดฟองอากาศน้อยมาก แต่ฟิล์มที่เติมสูตร UA1-3-Da4 เกิดรอยแตก ดังนั้นจึงเลือกสูตรสารเคลือบผิวไฮบริด UA1-2-Da4:Si1-2 70:30 W4 ที่ประกอบด้วยสูตรสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต UA1-2-Da4 ที่ประกอบด้วย UA+HDDA TPGDA กับ TMPTA ในอัตราส่วน 70:25:5 โดยน้ำหนัก และใช้สารช่วยเปียกและสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง Darocur 1173 ในปริมาณ 4 phr ซึ่งเติมสารประกอบไฮลิกอกเซนในปริมาณร้อยละ 30 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพกับการใช้สารเคลือบทางการค้า




ตารางที่ 4.5 ลักษณะของฟิล์มสารเคลือบบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิกเพื่อแก้ไขการเกิดตาปลา

สูตรสารเคลือบผิว	ปริมาณสาร ช่วยเปียก(phr)	ข้อบกพร่อง	รูปฟิล์ม
UA1-1-Da4: Si1-2 70:30 w1	1	เกิดตาปลาและ ฟองอากาศทั่วฟิล์ม	
UA1-1-Da4:Si1-2 70:30 w4	4	เกิดฟองอากาศทั่ว ฟิล์ม	

ตารางที่ 4.6 ลักษณะของฟิล์มสารเคลือบบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิกเพื่อแก้ไขการเกิดฟองอากาศโดยการเปลี่ยนวิธีการขึ้นรูป

สูตรสารเคลือบผิว	การขึ้นรูป ฟิล์ม	ข้อบกพร่อง	รูปฟิล์ม
UA1-1-Da4:Si1-2 70:30 w4	จุ่ม	เกิดฟองอากาศ ทั่วฟิล์ม	
UA1-1-Da4:Si1-2 70:30 w4	ปาดด้วย แปรง	เกิดฟองอากาศ เล็กน้อย	

ตารางที่ 4.7 ลักษณะของฟิล์มสารเคลือบบนฐานพื้นปอลอเมอะคริลิกเพื่อแก้ไขการเกิดฟองอากาศ โดยการลดปริมาณ UA+HDDA และแทนที่ด้วย TMPTA

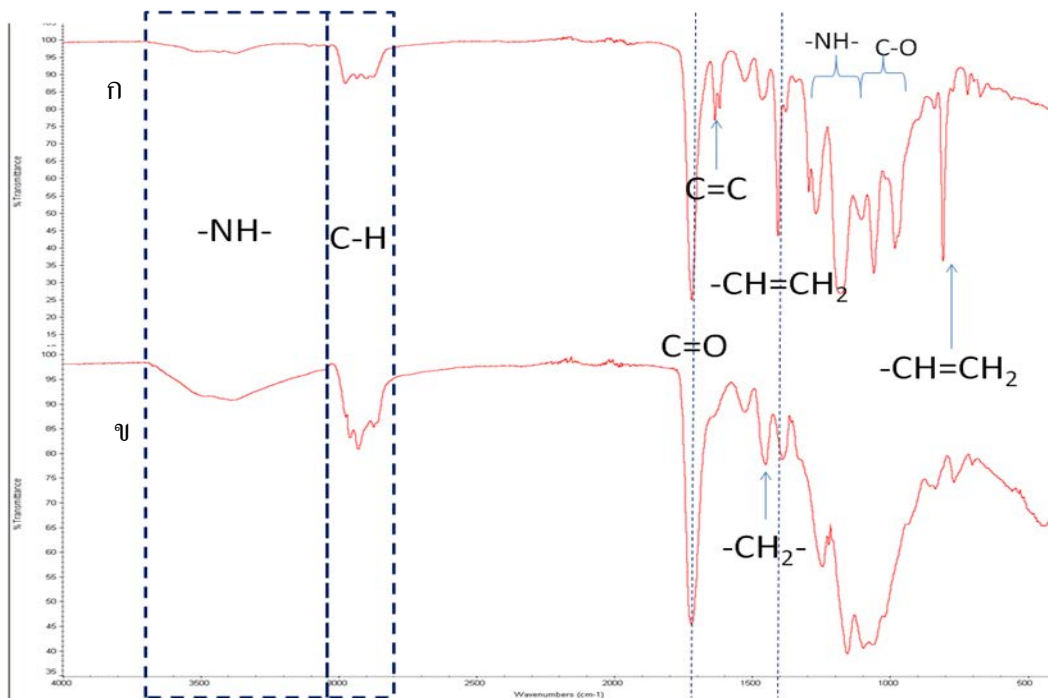
สูตรสารเคลือบผิว	ปริมาณ TMPTA ในสาร		ข้อบกพร่อง	รูปฟิล์ม
	เคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต (%w/w)			
UA1-1-Da4:Si1-2 70:30 w4	0		เกิดฟองอากาศเล็กน้อย	
UA1-2-Da4:Si1-2 70:30 w4	5		ไม่เกิดตาปลาและฟองอากาศ	
UA1-3-Da4:Si1-2 70:30 w4	15		เกิดรอยแตกมีลักษณะเป็นเส้นขนาดใหญ่ทั่วฟิล์ม	

4.4.1 การเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสารเคลือบผิวไฮบริดที่บ่มด้วยรังสียูวีบนฐานเคลือบฐานพื้นปอลอเมอะคริลิก

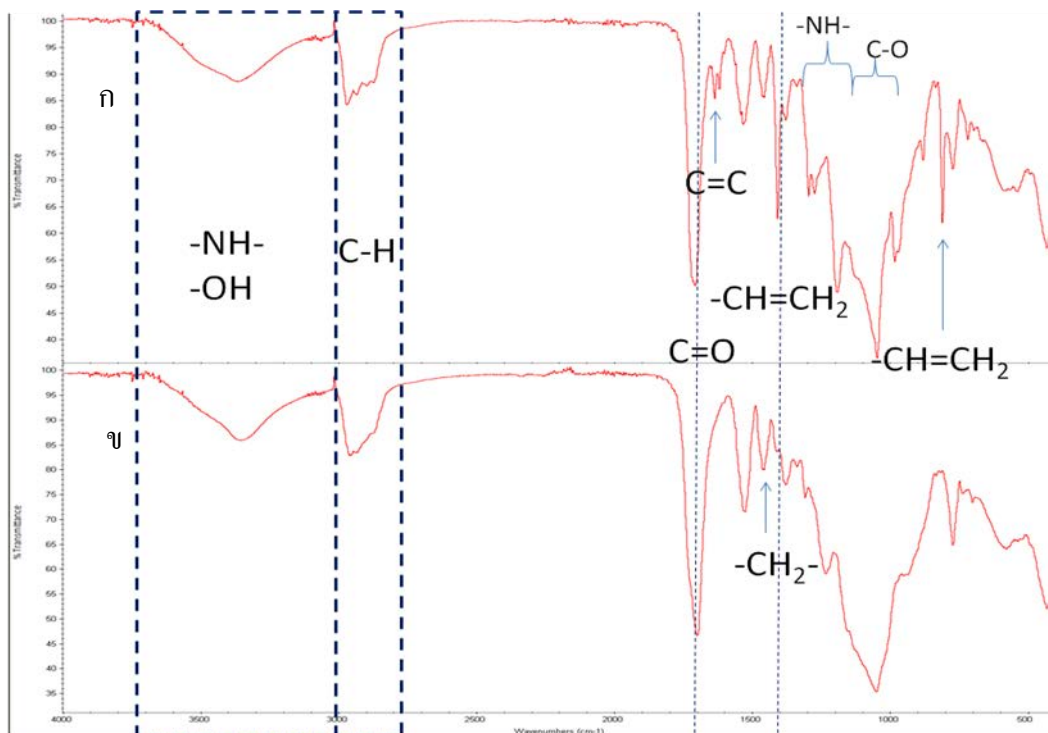
จากการทดลองได้ทำการศึกษาผลของการเติมสารประกอบไฮล็กเซน ปริมาณสารช่วยเป็ยก และการใช้สาร TMPTA ต่อการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน โดยทำการวิเคราะห์สารเคลือบผิวไฮบริดก่อนทำการบ่มบนฐานพื้นปอลอเมอะคริลิกและสารเคลือบหลังทำการบ่มบนฐานพื้นปอลอเมอะคริลิกแล้วทิ้งขึ้นงานไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง ATR-IR ผลของสเปกตรัมที่วิเคราะห์ได้ของสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดดังรูปที่ 4.20-4.23 จากการวิเคราะห์สารเคลือบก่อนทำการบ่มพบว่าสูตรที่ไม่มี การเติมสารประกอบไฮล็กเซน (UA1-2-Da4) แสดงสเปกตรัมที่ปรากฏเลขคลื่นในช่วงประมาณ $3,300-3,500\text{ cm}^{-1}$ และ $1,250-1,290\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่ N-H ในช่วง $2,900-3,000\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่ C-H และในช่วง $1,060-1,250\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่ C-O นอกจากนี้ยังพบสเปกตรัมที่เลขคลื่น $1,721\text{ cm}^{-1}$, $1,524\text{ cm}^{-1}$ และ $1,457\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่คาร์บอนิล ($>C=O$), หมู่ยูรีเทน (HNCOO)

และหมู่เมทิลีน (-CH₂-) ตามลำดับ และที่ 1,635 cm⁻¹ 1,407 cm⁻¹ และ 810 cm⁻¹ แสดงถึง หมู่ไวนิล (-CH=CH₂) ในส่วนของสเปกตรัมของสารเคลือบก่อนบ่มที่ทำการเติมสารประกอบ ไฮลิกอกเซนพบว่าสารเคลือบผิวแสดงสเปกตรัมปรากฏที่เลขคลื่นคล้ายกับสูตรที่ไม่มีการเติม สารประกอบไฮลิกอกเซน แต่สเปกตรัมมีความแตกต่างของเลขคลื่นในช่วง 3,300-3,600 cm⁻¹ มีความกว้างของพื้นที่มากขึ้นเนื่องจากเกิดการทับซ้อนสเปกตรัมของหมู่ O-H จากหมู่ไฮเลนอล (Si-OH) น้ำ และเอทานอลในสารประกอบไฮลิกอกเซน ในส่วนของสเปกตรัมที่แสดงถึงพันธะ ไฮลิกอกเซน (Si-O-Si) โดยทั่วไปพบเลขคลื่นในช่วง 1,086 cm⁻¹-1,200 cm⁻¹ แต่พบได้ไม่ชัดเจน เนื่องจากเกิดการทับซ้อนกับสเปกตรัมของส่วนสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต และจากการ วิเคราะห์สารเคลือบผิวหลังบ่มพบว่าสูตรที่มีการเติมและไม่มีการเติมสารประกอบไฮลิกอกเซนเกิด การลดลงของสเปกตรัมของหมู่ไวนิล(1,635cm⁻¹, 1407cm⁻¹ และ 810cm⁻¹) แสดงถึงการเกิดการ เปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอน นอกจากนี้พบว่าสูตรที่เติมสารประกอบไฮลิกอกเซนแสดง สเปกตรัมที่เลขคลื่น ในช่วงที่แสดงถึงหมู่ O-H มีความกว้างของพื้นที่ลดลงซึ่งเกิดจากการ เกิดปฏิกิริยาควบนั่นของไฮเลนอลและการระเหยของเอทานอลและน้ำ

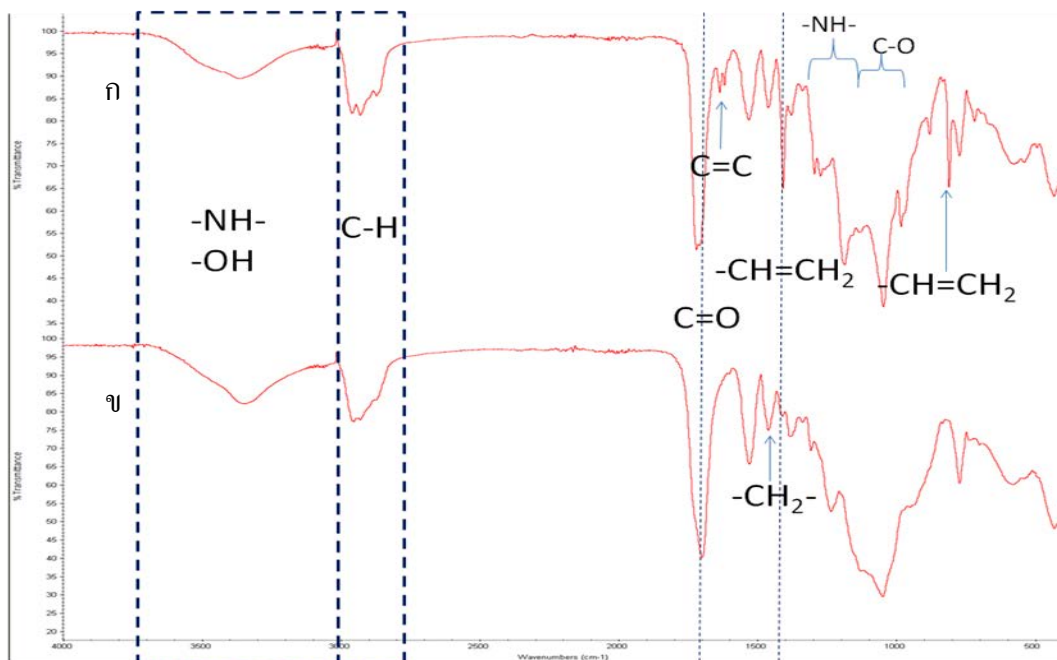
จากการวิเคราะห์ผลของการเติมสารประกอบไฮลิกอกเซนแบบ Si 1-2 ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ปริมาณของสารช่วยเปียกและการเติมสาร TMPTA ต่อการเปลี่ยนแปลงของพันธะ คู่คาร์บอนของสารเคลือบผิวไฮบริดดังรูปที่ 4.24 โดยค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่ คาร์บอนคำนวณด้วยสมการในหัวข้อที่ 3.9 พบว่าสูตรที่ทำการเติมสารประกอบไฮลิกอกเซนแบบ Si 1-2 ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่มากกว่าสูตรที่ ไม่มีการเติมสารประกอบไฮลิกอกเซน เนื่องจากการเติม Si 1-2 ช่วยลดการเกิด การยับยั้งโดย ออกซิเจน (oxygen inhibition) แต่พบว่าเมื่อทำการเติมสารช่วยเปียกเพิ่มขึ้นจาก 1 phr เป็น 4 phr สารเคลือบมีค่าการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ลดลง จึงทำการปรับปรุงโดยการเติมสาร TMPTA แทนที่การใช้ปริมาณสาร UA+HDDA พบว่าค่าการเปลี่ยนแปลงของสารเคลือบเพิ่มขึ้นเพียง เล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kunwong และคณะ [19] เนื่องจากโครงสร้าง TMPTA ประกอบด้วยหมู่ไวนิล 3 หมู่



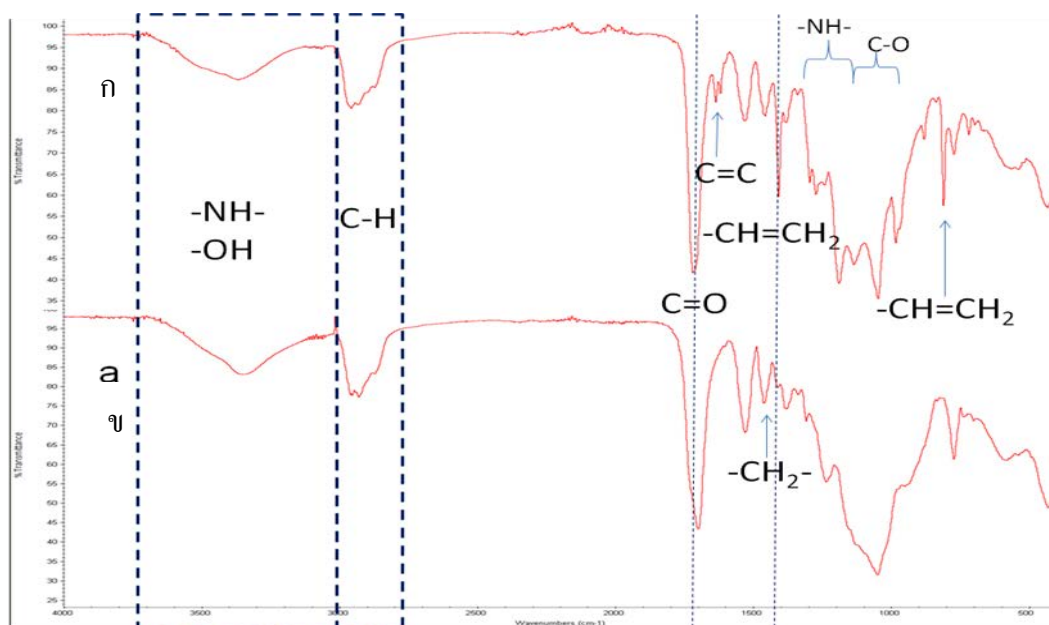
รูปที่ 4.20 IR สเปกตรัมของสูตร UA1-1-Da4 ก่อนทำการบ่ม (ก) หลังทำการบ่ม (ข)



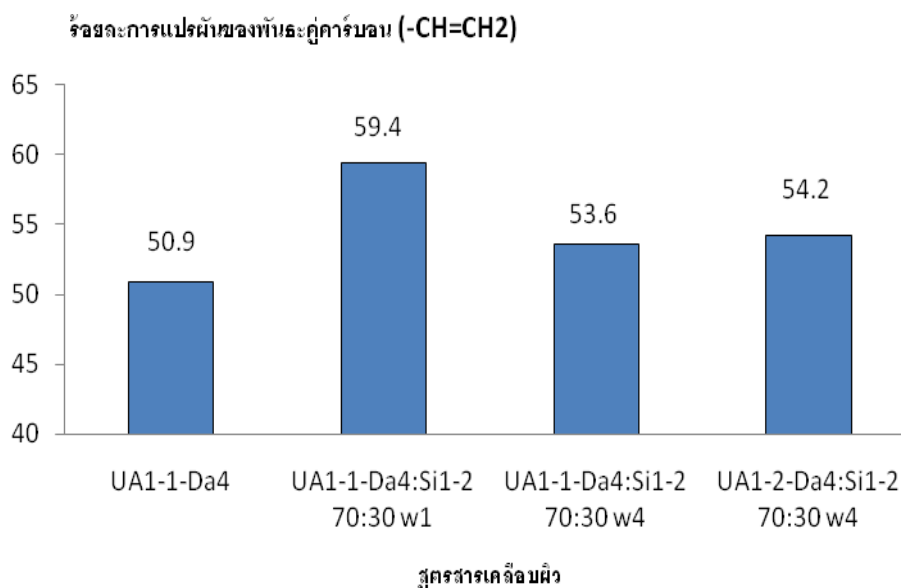
รูปที่ 4.21 IR สเปกตรัมของสูตร UA1-1-Da4:Si1-2 70:30 W1 ก่อนทำการบ่ม (ก) หลังทำการบ่ม (ข)



รูปที่ 4.22 IR สเปกตรัมของสูตร UA1-1-Da4:Si1-2 70:30 W4 ก่อนทำการบ่ม (ก)
หลังทำการบ่ม (ข)



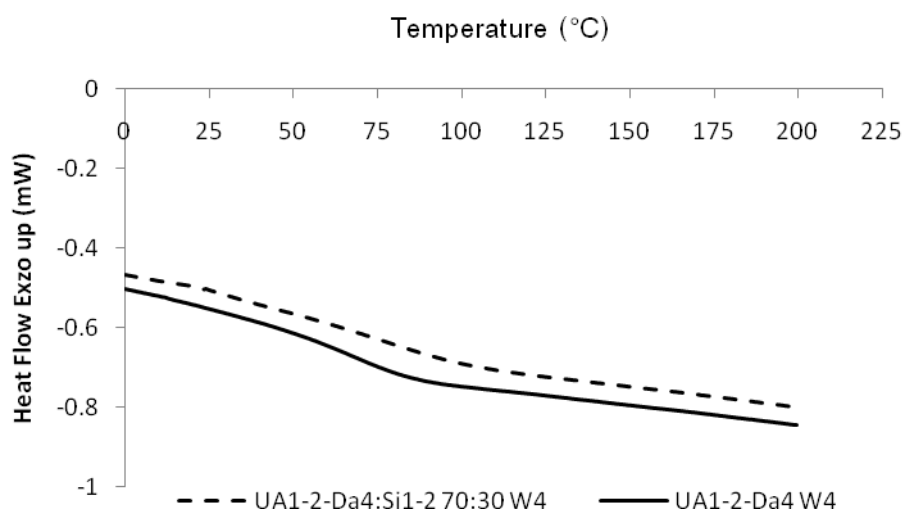
รูปที่ 4.23 IR สเปกตรัมของสูตร UA1-2-Da4:Si1-2 70:30 W4 ก่อนทำการบ่ม (ก)
หลังทำการบ่ม (ข)



รูปที่ 4.24 ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนของสารเคลือบผิวไฮบริดที่พัฒนาเพื่อเคลือบลงบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิก

4.4.2 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่ใช้เคลือบบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิก

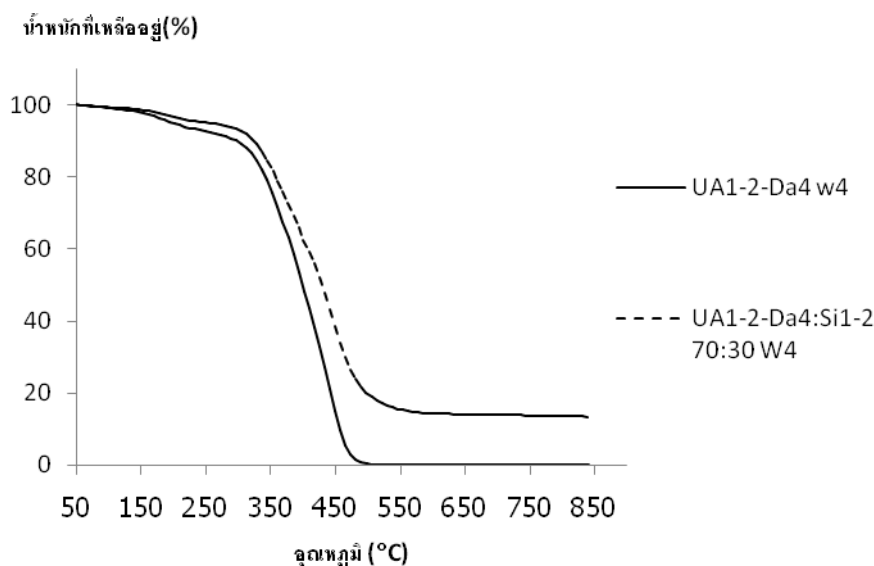
อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วของสารเคลือบผิววิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC จากการวิเคราะห์ผลของการเติมสารประกอบไฮลิกเซนแบบ Si 1-2 ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักต่ออุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วดังรูปที่ 4.25 พบว่าสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่ไม่มีการเติมสารประกอบไฮลิกเซน (UA1-2-Da4) และสูตรที่ทำการเติมสารประกอบไฮลิกเซนแบบ 1-2 ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (UA1-2-Da4:Si1-2 70:30 W4) มีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วเท่ากับ 67.1 °C และ 81.0 °C ตามลำดับ การเติมสารประกอบไฮลิกเซนทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วมีค่าสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Malucelli และคณะ [15] เนื่องจากสารประกอบไฮลิกเซนเกิดพันธะโควาเลนต์กับสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตทำให้โครงสร้างของฟิล์มสารเคลือบมีการเชื่อมขวางสูงขึ้นจึงจำกัดการเคลื่อนไหวของโครงสร้างได้มากขึ้น



รูปที่ 4.25 อุณหภูมิสถานะแก้วของสารเคลือบผิวไฮบริด
สูตร UA1-2-Da4 และสูตร UA1-2-Da4:Si1-2 70:30 W4

4.4.3 เสถียรภาพทางความร้อนของสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่ใช้เคลือบบนฐาน พื้นปอลิเมอร์อะคริลิก

เสถียรภาพทางความร้อนของสารเคลือบผิววิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA จากการวิเคราะห์ผลของการเติมสารประกอบไฮล๊อกเซนแบบ Si 1-2 ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักต่อเสถียรภาพทางความร้อนดังรูปที่ 4.26 พบว่าสูตรที่เติมสารประกอบไฮล๊อกเซนแบบ Si 1-2 ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (UA1-2-Da4:Si1-2 70:30 W4) มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าสูตรที่ไม่มีการเติมสารประกอบไฮล๊อกเซน (UA1-2-Da4) โดยสูตรที่ไม่มีการเติมเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส และสูตรที่ทำการเติมเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง 500 ซึ่งเป็นการสลายตัวของพันธะที่เกิดการเชื่อมขวาง และในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 500 ถึง 850 องศาเซลเซียสพบว่าสารเคลือบผิวเกิดการสลายตัวเพียงเล็กน้อยและสูตรที่ทำการเติมเกิดการตกค้างอยู่ของซาร์ในปริมาณร้อยละ 13 โดยน้ำหนัก แต่สูตรที่ไม่ทำการเติมสารประกอบไฮล๊อกเซนไม่พบปริมาณซาร์ตกค้างอยู่



รูปที่ 4.26 การสลายตัวด้วยความร้อนของสารเคลือบผิวไฮบริด
สูตร UA1-2-Da4 และสูตร UA1-2-Da4:Si1-2 70:30 W4

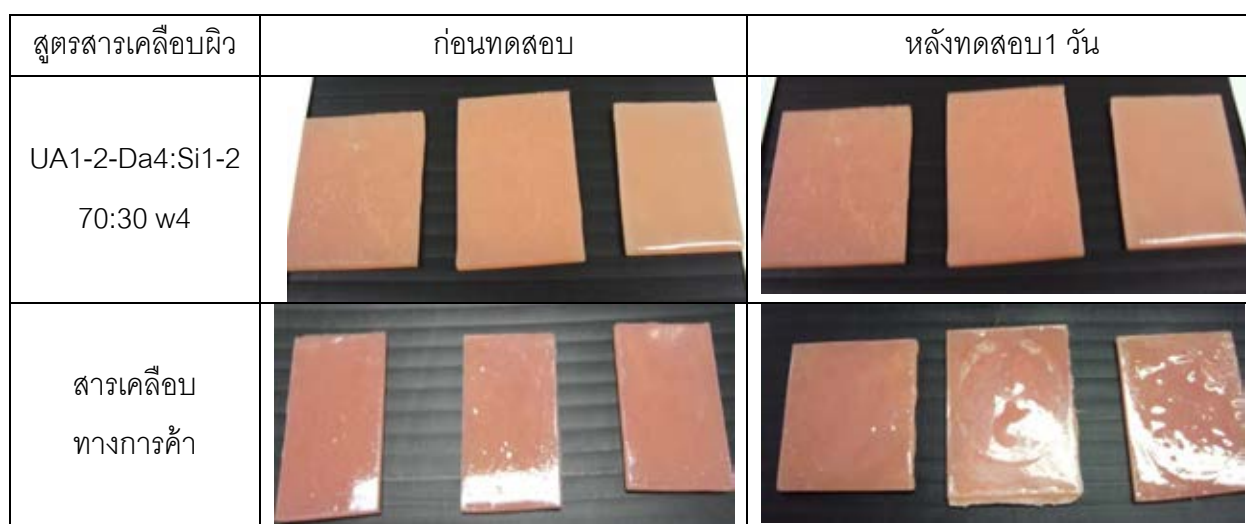
4.5 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริดบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิก

ฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริด (UA1-2-Da4:Si 1-2 70:30 W4) และฟิล์มที่ได้จากสารเคลือบทางการค้า (ESEP Vitrebond™) ที่มีความหนาของฟิล์มประมาณ 30 ไมโครเมตรซึ่งขึ้นรูปด้วยปาดด้วยแปรงบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิกทดสอบสมบัติทางกายภาพได้แก่ ความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D 2197-98 การติดแน่นตามมาตรฐาน ASTM D3359 Method B-02 ความเงาตามมาตรฐาน ASTM D 523-89 และความทนน้ำ จากการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพระหว่างฟิล์มทั้งสองแบบดังตารางที่ 4.8 พบว่าฟิล์มสารเคลือบไฮบริดมีสมบัติการติดแน่นและความแข็งที่ดีกว่าการใช้สารเคลือบทางการค้าอย่างชัดเจน โดยฟิล์มไฮบริดมีการติดแน่นในระดับ 5B ซึ่งหมายถึงการติดแน่นในระดับที่ดีมากแต่ฟิล์มจากสารเคลือบทางการค้ามีการติดแน่นในระดับ 0B ซึ่งหมายถึงการติดแน่นในระดับที่ต่ำที่สุด และการทดสอบสมบัติด้านความแข็งพบว่าน้ำหนักที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดรอยบนฟิล์มไฮบริดเท่ากับ 2 กิโลกรัม แต่ฟิล์มจากสารเคลือบทางการค้าพบว่าน้ำหนัก 10 กรัมทำให้สารเคลือบผิวเกิดรอยบนฟิล์มได้ ในส่วนของการทดสอบสมบัติด้านความเงาพบว่าฟิล์มที่ได้จากสูตรสารเคลือบผิวไฮบริดและสารเคลือบทางการค้ามีค่าความเงาเท่ากับ 89.2 และ 86.7 แสดงว่าฟิล์มสารเคลือบทั้งสองมีความเงาในระดับสูงพอ ๆ กัน และจากการทดสอบความทนน้ำดังรูปที่ 4.27 พบว่าฟิล์มสารเคลือบผิวไฮบริดไม่เกิดข้อบกพร่องหลังทำการทดสอบโดยการแช่น้ำเป็นเวลาเป็นเวลา 1 วัน แต่การใช้สารเคลือบทางการค้าพบว่า

ฟิล์มสารเคลือบสารเกิดการบวมและหลุดล่อนออกจากพื้นผิวของฐานพื้นปลอมอะคริลิกหลังทำการทดสอบโดยการแช่น้ำเป็นเวลา 1 วัน การที่สมบัติทางกายภาพทางด้านความแข็งแรง การติดแน่น และความทนน้ำของฟิล์มจากสารเคลือบทางการค้าไม่ดีเนื่องจากสารเคลือบทางการค้าที่ใช้เป็นแบบที่บ่มด้วยแสงขาว (visible light) จึงอาจไม่เหมาะกับการบ่มด้วยรังสียูวี

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบความแข็งแรง การติดแน่น และความเงาของฟิล์มสารเคลือบจากสูตร UA1-2-Da4:Si1-2 70:30 W4และการใช้สารเคลือบทางการค้า

สมบัติทางกาย	UA1-2-Da4 70:25:5:Si 1-2 70:30 w4	สารเคลือบทางการค้า
ความแข็งแรง (g)	2000	10
การติดแน่น	5B	0B
ความเงา	89.2	86.7



รูปที่ 4.27 ฟิล์มสารเคลือบไฮบริด UA1-2-Da4:Si1-2 70:30 W4 และฟิล์มจากสารเคลือบทางการค้า ก่อนและหลังทดสอบความทนน้ำ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

(1) สูตรสารเคลือบผิว UA1-Da4 การแปรผันของพันธะคู่คาร์บอนของสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตมากที่สุด โดยสูตร UA1-Da4 ใช้สารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงชนิด Darocure 1173 ในปริมาณ 4 phr และใช้ความเข้มข้นของรังสียูวีในการบ่มเท่ากับ 6,000 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร

(2) สารประกอบไฮลิกเซนทุกแบบที่เตรียมได้พอลิไฮลิกเซนที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงและเกิดพอลิไฮลิกเซนที่มีโครงสร้างเป็นวงหลังผ่านการบ่มด้วยรังสียูวี

(3) สูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่ประกอบด้วยสารประกอบไฮลิกเซนแบบ Si 1-2 และ Si 2-2 มีความคงสภาพได้ดี เนื่องจากไม่พบการแยกตัวหลังจากทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(4) สูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่ประกอบด้วยสารประกอบไฮลิกเซนแบบ Si1-1 และ Si 1-2 ในปริมาณ 40 โดยน้ำหนักเกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนได้มากกว่าการใช้สารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตเพียงอย่างเดียว

(5) สูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่ประกอบด้วยสารประกอบไฮลิกเซนมีปริมาณชาร์ที่ตกค้างอยู่มากกว่าสูตรที่มีสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตเพียงอย่างเดียว โดยสูตรที่ใช้สารประกอบไฮลิกเซนแบบ Si 1-2 และ Si 2-2 .ในปริมาณร้อยละ 40 มีปริมาณชาร์สูงกว่าสูตรอื่น ๆ โดยมีค่าเท่ากับเท่ากับ 24 และ 26 โดยน้ำหนักตามลำดับ และสูตรอื่น ๆ มีปริมาณชาร์ลดลงในช่วงร้อยละ 0-19 โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารประกอบไฮลิกเซนที่ใช้

(6) สูตรสารเคลือบผิวไฮบริดที่เติมสารประกอบไฮลิกเซนในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักแบบ Si 1-2 เกิดการเชื่อมขวางในโครงสร้างของพอลิไฮลิกเซนมากกว่าสูตรที่เติมสารประกอบไฮลิกเซนแบบ Si 2-2

(7) फिल्मไฮบริดบนแผ่นอะคริลิกใสที่มีสมบัติด้านความแข็งที่ดีคือสูตร UA1-Da4 ที่ทำการเติมสารประกอบไฮลิกเซนแบบ Si 1-2 และ Si 2-2 .ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก โดยทนน้ำหนักกดทับได้ถึง 2 กิโลกรัม และสมบัติด้านความแข็งลดลงโดยทนน้ำหนักกดทับได้ในช่วงน้ำหนัก 10-650 กรัม โดยขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบไฮลิกเซนในสารเคลือบตั้งแต่ร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนัก

(8) พิล์มจากสูตร UA1-Da4 ที่ไม่มีการเติมและทำการเติมสารประกอบไซลิลอกเซนในปริมาณร้อยละ 1-40 โดยน้ำหนักสามารถยึดติดบนแผ่นอะคริลิกใสได้ดี

(9) พิล์มสารเคลือบบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิกจากสูตรสารเคลือบผิวไฮบริด UA1-Da4:Si1-2 70:30 ที่ประกอบด้วย UA1-Da4 ที่เติมสารประกอบไซลิลอกเซนแบบ Si 1-2 ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักเกิดการรอยแตก แต่จากการแก้ไขสูตรที่เคลือบลงบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิกได้โดยฟิล์มไม่เกิดการรอยแตกและไม่พบข้อบกพร่องอื่น ๆ คือสูตรสารเคลือบไฮบริด UA1-2-Da4:Si1-2 70:30 w4 ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบไซลิลอกเซนแบบ Si 1-2 ในปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักและสารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลตสูตร UA1-2-Da4 ในปริมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนักที่มีองค์ประกอบของ UA+HDDA TPGDA และ TMPTA ในอัตราส่วนร้อยละ 70:25:5 โดยน้ำหนัก โดยขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการปาดด้วยฟู่กัน และใช้ความเข้มของรังสีในการบ่มเท่ากับ 3,000 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร

(10) พิล์มไฮบริดจากสูตร UA3-2:Si1-2 70:30 w4 บนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิกมีสมบัติด้านความแข็งแรงที่ดีโดยทนน้ำหนักกดทับได้ถึง 2 กิโลกรัม ยึดติดกับฐานพื้นปอลิเมอร์ได้ดี มีความเงาสูง และมีความทนน้ำ แต่ฟิล์มจากการใช้สารเคลือบทางการค้ามีสมบัติทางด้านความแข็งแรง การยึดติด และความทนน้ำต่ำแต่มีความเงาสูง

5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) เพื่อเพิ่มปริมาณการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่คาร์บอนควรมีการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในระหว่างทำการบ่ม โดยการเติมสารเติมแต่งที่สามารถจับโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนได้ และทำให้สามารถลดปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสงและค่าความเข้มของรังสียูวีที่ใช้ในการบ่มได้เนื่องจากการใช้ค่าความเข้มในปริมาณมากมีผลทำให้ฐานเคลือบที่ไม่ทนต่อความร้อนเกิดการเสียรูปร่าง

(2) สารเคลือบผิวไฮบริดที่เตรียมได้เมื่อเก็บไว้เป็นเวลานานพบว่าสารเคลือบเปลี่ยนแปลงจากของเหลวหนืดกลายเป็นเจลเนื่องจากสารประกอบไซลิลอกเซนที่ทำการเติมสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อได้ ดังนั้นจึงต้องการทำการศึกษาวิจัยระยะเวลาที่สารเคลือบผิวสามารถคงสภาพเป็นของเหลวหนืดได้ และทำการเติมสารเติมแต่งที่สามารถช่วยทำให้สารเคลือบผิวคงสภาพได้นานขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] Anthony, J., and Loewy, Z. Factors involved in microbial colonization of oral prostheses. General Dentistry (2009) : 136-143
- [2] Wang, D., and Bierwagen, G. P. Sol-gel coatings on metals for corrosion protection. Progress in Organic Coatings 64 (2009) : 327-338
- [3] รองศาสตราจารย์ อรุณา สรวารี. สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และ แล็กเกอร์). พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [4] KICKELBICK, G. Hybrid Materials. Synthesis, Characterization, and Applications. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007.
- [5] Mehnert, R., Pincus, A., Janorsky, I., Stowe, R., and Berejka, A. Volume 1 UV & EB Curing Technology & Equipment. London,UK : John Wiley & Sons, SITA Technology Limited, 2007.
- [6] ราชโรจน์ เจริญศักดิ์. สารเคลือบผิวเชิงประกอบอินทรีย์/อนินทรีย์ระบบพอลิออล-ไอโซไซยาเนต/ไซลเจล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [7] Keijman, J.M. Inorganic organic hybrid coatings in the protection coatings industry [Program PDF. File]. 2004 The Netherlands:AMERON International. [2012,January10]
- [8] จุฬาลักษณ์ พิทักษ์ภากร, วัลลา ฟองชัยญา. การทดสอบการติดสีของสารเคลือบผิวที่บ่มด้วยรังสียูวีเพื่อประยุกต์ใช้ในงานวัสดุฐานพื้นปลอม. โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [9] Ruize, C.S.B., Machado, L.D.B., Volponi, J.E., and Pino, E.S. Influence of sample composition and processing parameters on the UV cure of clear coatings. Nuclear Instruments and Method in Physics Research B 208 (2003) : 309-313.
- [10] Kim, H.D., Jee, D.J., Choi, J.H. and Park, C.C. Effect of Molecular Structure on Properties of a series of UV-cured Polyurethane Acrylates. Polymer (Korea) 18,1 (1994) : 38-45.

- [11] Studer, K., Decker, C., Beck, E., and Schwalm, R. Overcoming oxygen inhibition in UV-curing of acrylate coatings by carbon dioxide inerting, Part I. Progress in Organic Coatings 48 (2003) : 92–100.
- [12] ณพรัตน์ วจนทินกร. การสังเคราะห์วัสดุไฮบริดสารอินทรีย์/อนินทรีย์สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นสารเคลือบผิว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542
- [13] Kahraman, M.V., Kugu, M., Menciloglu, Y., Apohan, N.K., and Gungor, A. The novel use of organo alkoxy silane for the synthesis of organic–inorganic hybrid coatings. Journal of Non-Crystalline Solids 352 (2006) : 2143–2151.
- [14] Lee, S., Oh, K.K., Park, S., Kim, J.S., and Kim, H. Scratch resistance and oxygen barrier properties of acrylate-based hybrid coatings on polycarbonate substrate. Korean Journal of Chemical Engineering 26,6 (2009) : 1550-1555.
- [15] Malucelli, G., Priola, A., Sangermano, M., Amerio, E., Zini, E., and Fabbri, E. Hybrid nanocomposites containing silica and PEO segments preparation through dual-curing process and characterization. Polymer 46 (2005) : 2872-2879.
- [16] Karatus, S., Kizilkaya, C., Kayaman-Apohan, N., and Gungor, A. Preparation and characterization of sol-gel derived UV-curable organo-silica-titania hybrid coatings. Progress in Organic Coatings 60 (2007) : 140-147.
- [17] Amerio, E., Sangermano, M., Malucelli, G., Priola, A., and Voit, B. Preparation and characterization of hybrid nanocomposite coatings by photopolymerization and sol-gel process. Polymer 46 (2005) : 11241–11246
- [18] Siramanont, J., Tangpasuthadol, V., Intasiri, A., Na-Ranong, N., and Kiatkamjornwong, S. Sol-Gel Process of Alkyltriethoxysilane in Latex for Alkylated Silica Formation in Natural Rubber. Polymer Engineering and Science (2009) : 1099-1106
- [19] Kunwong, D., Sumanochitraporn, N., and Kaewpirom, S. Curing behavior of a UV-curable coating based on urethane acrylate oligomer : the influence of reactive

- monomers. Songklanakarin Journal Science Technology 33,2 (2011) : 201-207
- [20] Vernice, A.M., and others. ASTM D 3359-02 Standard Test Method for Measuring Adhesion by Tape Test¹. Annual Book of ASTM STANDARDS section 6 Paints Related coatings and Aromatics Volume 6.01, pp. 399-405. United State, 2008.
- [21] Vernice, A.M., and others. ASTM D 2197-98 Standard Test Method for Adhesion of Organic Coatings by Scrape Adhesion¹. Annual Book of ASTM STANDARDS section 6 Paints Related coatings and Aromatics Volume 6.01, pp. 235-237. United States, 2008.
- [22] Vernice, A.M., and others. ASTM D 523-80 Standard Test Method for Specular Gloss¹. Annual Book of ASTM STANDARDS section 6 Paints Related coatings and Aromatics Volume 6.01, pp. 29-33. United State, 2008.
- [23] Rubio, F., Rubio, J., and Oteo, J.L. A FT-IR study of the hydrolysis of tetraethylorthosilicate (TEOS). Spectroscopy Letters 31,1 (1998) : 199-219
- [24] Soloukhina, V.A., Willem, P., Brokken-Zijp, J.C.M., Loos, J., and Gijsbertus D.W. Mechanical properties of silica-(meth)acrylate hybrid coatings on polycarbonate substrate. Polymer 43 (2002) : 6169-6181
- [25] Medda S.K., Kundu, D., and De, G. Inorganic-organic hybrid coatings on polycarbonate. Spectroscopic studies on the simultaneous polymerization of methacrylate and silica networks. Journal of Non-Crystalline Solids 318 (2003) : 149-156
- [26] Karatas, S., Hosgör, Z., Apohan, N.K., and Güngör, A. Preparation and characterization of photopolymerizable organic-inorganic hybrid materials by the sol-gel method. Journal of Polymer Research 17 (2010) : 247-254
- [27] Han, Y.H., Taylor, A., Mantle, M.D., and Knowles, K.M. UV curing of organic-inorganic hybrid coating materials. Journal Sol-Gel Science Technology 43 (2007) : 111-123
- [28] Gireesh, K.B., Jena, K. K., Allauddin, S., Radhika, K.R., Narayan, R., and Raju,

- K.V.S.N. Structure and thermo-mechanical properties study of polyurethane-urea/glycidoxypropyltrimethoxysilane hybrid coatings. Progress in Organic Coatings 68 (2010) : 165–172
- [29] Monge, S., Zhang, X., Giani, O., and Robin, J.J. Organic/inorganic hybrid materials from polypeptide-based block copolymers. Reactive & Functional Polymers 69 (2009) : 380–384
- [30] Decker, C., Viet, T.N.T., Decker, D., and Weber-Koehl, E. UV-radiation curing of acrylate/epoxide systems. Polymer 42 (2001) : 5531-5541

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตาราง ก-1 น้ำหนักที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดรอยขีดข่วนของสูตรสารเคลือบผิว

สูตรสารเคลือบผิว	น้ำหนักกดทับน้อยที่สุดที่ทำให้เกิดรอย (g)					ค่าเฉลี่ย	S.D.
	1	2	3	4	5		
UA1-Da4	10	10	10	10	10	10	0
UA1-Da4:Si 1-1 99:1	10	10	10	10	10	10	0
UA1-Da4:Si 1-1 98:2	10	10	10	10	10	10	0
UA1-Da4:Si 1-1 96:4	10	10	10	10	10	10	0
UA1-Da4:Si 1-1 90:10	100	100	140	150	80	114	29.66
UA1-Da4:Si 1-1 80:20	230	200	180	250	220	216	27.02
UA1-Da4:Si 1-1 60:40	500	500	500	500	500	500	0
UA1-Da4:Si 1-2 60:40	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	0
UA1-Da4:Si 2-1 99:1	10	10	10	10	10	10	0
UA1-Da4:Si 2-1 98:2	10	10	10	10	10	10	0
UA1-Da4:Si 2-1 96:4	10	10	10	10	10	10	0
UA1-Da4:Si 2-1 90:10	10	50	10	190	10	54	69.74
UA1-Da4:Si 2-1 80:20	10	20	220	190	120	112	85.65
UA1-Da4:Si 2-1 60:40	650	650	650	650	650	650	0
UA1-Da4:Si 2-2 60:40	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	0
UA1-2-Da4-2:Si 1-2 70:30w4	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	0
สารเคลือบทางการค้า	10	10	10	10	10	10	0

ตาราง ก-2 ระดับการติดตั้งของสูตรสารเคลือบผิว

สูตรสารเคลือบผิว	ระดับการติดตั้ง					ฐานนิยม
	1	2	3	4	5	
UA1-Da4	5B	5B	5B	4B	4B	5B
UA1-Da4:Si 1-1 99:1	4B	4B	5B	5B	4B	4B
UA1-Da4:Si 1-1 98:2	5B	5B	5B	5B	5B	5B
UA1-Da4:Si 1-1 96:4	5B	5B	5B	4B	5B	5B
UA1-Da4:Si 1-1 90:10	4B	5B	5B	4B	5B	5B
UA1-Da4:Si 1-1 80:20	5B	5B	5B	5B	4B	5B
UA1-Da4:Si 1-160:40	5B	5B	5B	4B	4B	□B
UA1-Da4:Si 1-2 60:40	5B	5B	5B	5B	5B	5B
UA1-Da4:Si 2-1 99:1	4B	5B	4B	4B	5B	4B
UA1-Da4:Si 2-1 98:2	5B	5B	4B	5B	5B	5B
UA1-Da4:Si 2-1 96:4	4B	4B	5B	5B	4B	4B
UA1-Da4:Si 2-1 90:10	5B	5B	5B	5B	5B	5B
UA1-Da4:Si 2-1 80:20	4B	5B	5B	5B	5B	5B
UA1-Da4:Si 2-1 60:40	5B	5B	5B	5B	5B	5B
UA1-Da4:Si 2-2 60:40	5B	5B	5B	5B	5B	5B
UA1-2-Da4-2:Si 1-2 70:30w4	5B	5B	5B	5B	5B	5B
สารเคลือบทางการค้า	0B	0B	0B	0B	0B	0B

ตาราง ก-3 ความสูงของ IR สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันและค่าการแปรผันของพันธะคู่คาร์บอนของ สารเคลือบผิวยูรีเทนอะคริเลต

สูตรสารเคลือบผิว	ความสูงของ IR สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชัน (cm)				ค่าการแปรผัน ของพันธะคู่ คาร์บอน(%)
	หมู่คาร์บอนิล(1,721cm ⁻¹)		หมู่ไวนิล(1,407cm ⁻¹)		
	ก่อนบ่ม	หลังบ่ม	ก่อนบ่ม	หลังบ่ม	
UA1-Da3	17	17	13.2	8.1	38.7
UA1-Ir3	17.1	17.1	13.1	8.6	34.3
UA1-Da4	17	17	13.2	6.2	53.0
UA1-Ir4	17.1	17.1	13	8.6	33.8

ตาราง ก-4 ความสูงของ IR สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันและค่าการแปรผันของพันธะคู่คาร์บอนของ สารเคลือบไฮบริดบนฐานพื้นปอลิเมอร์อะคริลิก

สูตรสารเคลือบผิว	ความสูงของ IR สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชัน (cm)				ค่าการแปรผัน ของพันธะคู่ คาร์บอน(%)
	หมู่คาร์บอนิล(1,721cm ⁻¹)		หมู่ไวนิล(1,407cm ⁻¹)		
	ก่อนบ่ม	หลังบ่ม	ก่อนบ่ม	หลังบ่ม	
UA1-Da4-1	15.8	15.□	9.6	4.7	50.8
UA1-Da4-1:Si 1-2 70:30 w1	12.7	12.7	9.4	3.8	59.4
UA1-Da4-1:Si 1-2 70:30 w4	12.0	12.0	8.6	4.0	53.6
UA1-Da4-2:Si 1-2 70:30 w4	14.1	14.1	9.6	4.4	54.2

ตาราง ก-5 ความสูงของ IR สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันและค่าการแปรผันของพันธะคู่คาร์บอนของ

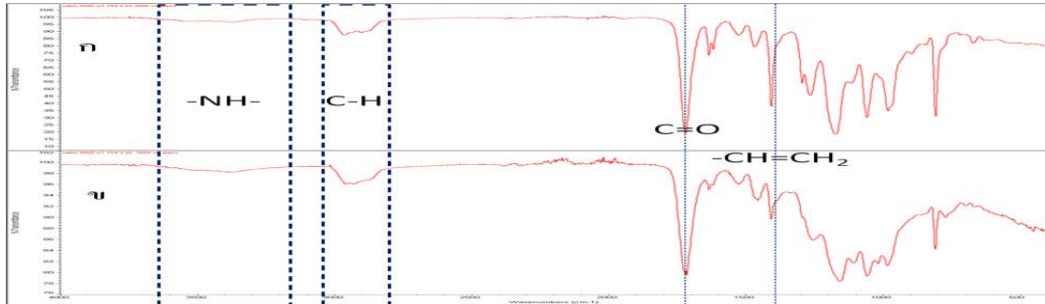
สารเคลือบไฮบริดบนแผ่นแก้ว

สูตรสารเคลือบผิว	ความสูงของ IR สเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชัน (cm)				ค่าการแปรผัน ของพันธะคู่ คาร์บอน(%)
	หมู่คาร์บอนิล($1,721\text{cm}^{-1}$)		หมู่ไวนิล($1,407\text{cm}^{-1}$)		
	ก่อนบ่ม	หลังบ่ม	ก่อนบ่ม	หลังบ่ม	
UA1-Da4 6000	12.2	12.3	9.3	3.9	58.4
UA1-Da4:Si 1-1 96:4	□6.9	16.9	12.9	6.9	46.5
UA1-Da4:Si 1-1 90:10	16.7	16.7	12.8	6.4	50.0
UA1-Da4:Si 1-1 80:20	16.5	16.5	12.7	5.7	55.2
UA1-Da4:Si 1-1 60:40	12.8	6.8	11.0	2.2	62.3
UA1-Da4:Si 1-2 60:40	9.7	9.7	8.0	3.2	60
UA1-Da4:Si 2-1 96:4	13.4	13.6	10.3	4.7	55.0
UA1-Da4:Si 2-1 90:10	13.1	13.1	10.3	4.7	54.5
UA1-Da4:Si 2-1 80:20	11.8	11.7	9.5	4.4	53.3
UA1-Da4:Si 2-1 60:40	13.3	7.5	11.5	3.0	53.7
UA1-Da4:Si 2-2 60:40	9.2	9.0	8.0	3.6	54.5

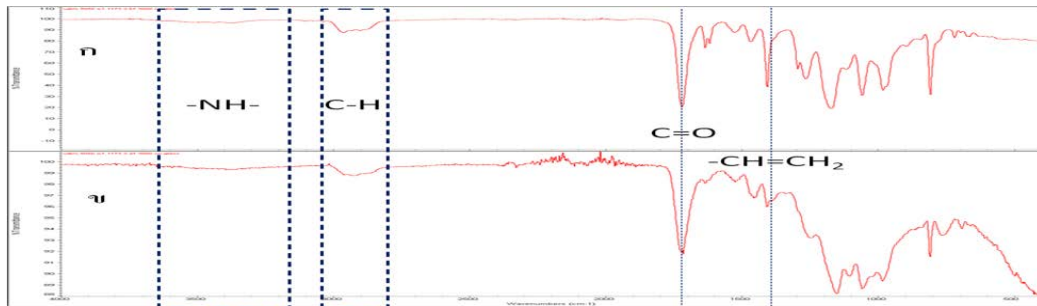
ตารางที่ ก-6 ค่าความเงาของสารเคลือบสูตร UA1-Da4-2:Si1-2 70:30 W4 และสูตรที่ใช้เรซินทางการค้า

สูตรสารเคลือบผิว	ค่าความเงา					ค่าเฉลี่ย	S.D.
	1	2	3	4	5		
UA1-Da4-2:Si1-2 70:30 W4	89.6	89.1	89.2	89.2	88.9	89.2	0.25
สารเคลือบทางการค้า	86.7	86.3	86.9	87.0	86.7	86.7	0.27

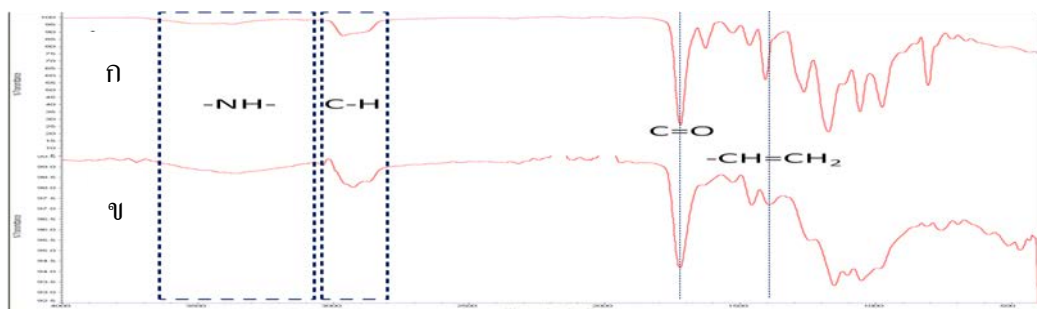
ภาคผนวก ข



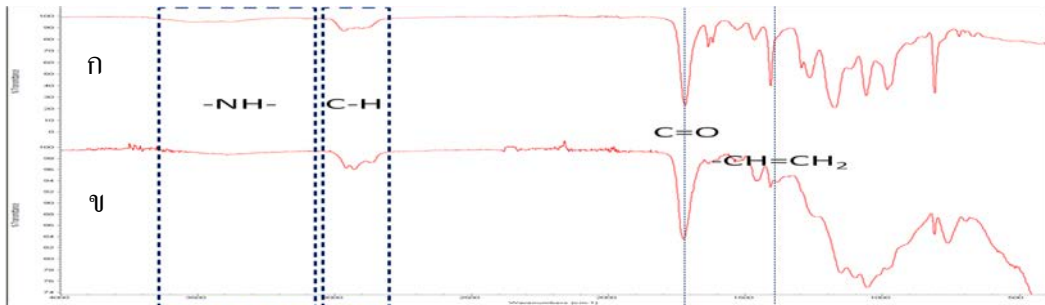
รูปที่ ข-1 แสดง IR สเปกตรัมของสูตร UA1-Ir3 ก่อนทำการบ่ม (ก) และหลังทำการบ่ม (ข)



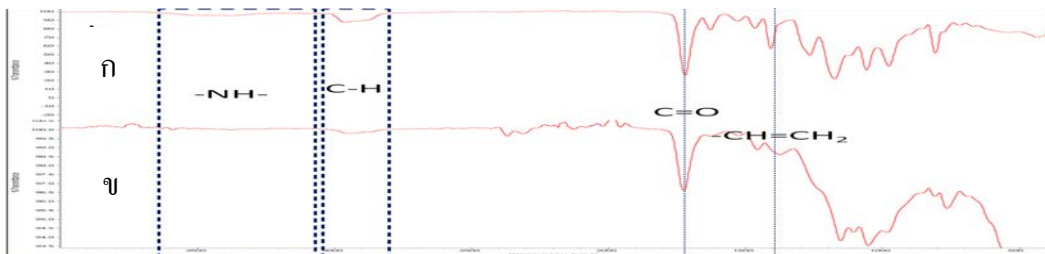
รูปที่ ข-2 แสดง IR สเปกตรัมของสูตร UA1-Da3 ก่อนทำการบ่ม (ก) และหลังทำการบ่ม (ข)



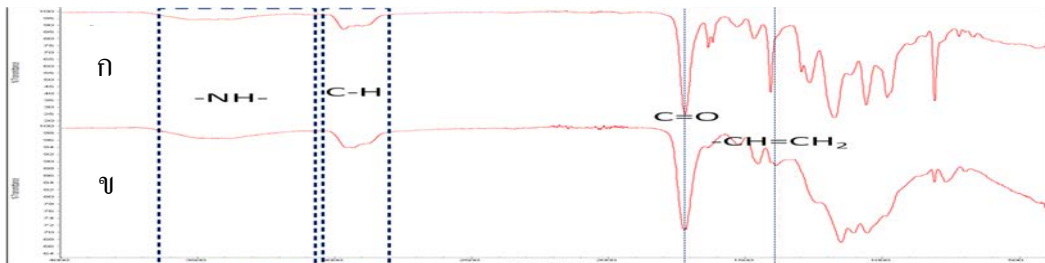
รูปที่ ข-3 แสดง IR สเปกตรัมของสูตร UA1-Da4:Si 1-1 96:4 ก่อนทำการบ่ม (ก) และหลังทำการบ่ม (ข)



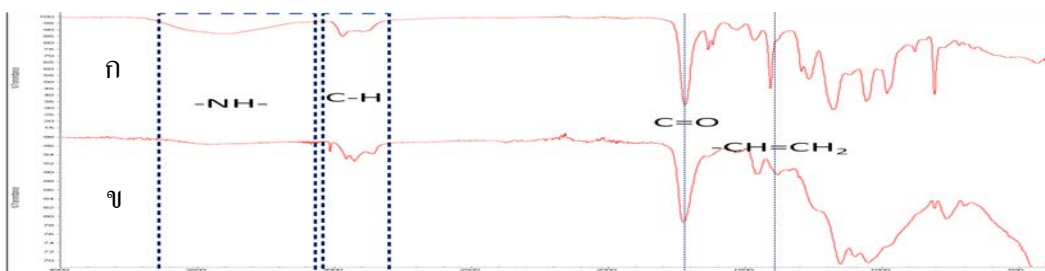
รูปที่ ข-4 แสดง IR สเปกตรัมของสูตรUA1-Da4: Si 2-1 96:4 ก่อนทำการบ่ม (ก)
และหลังทำการบ่ม (ข)



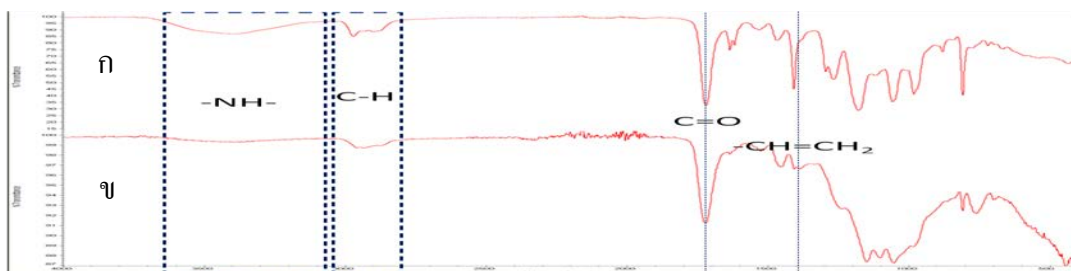
รูปที่ ข-5 แสดง IR สเปกตรัมของสูตรUA1-Da4: Si 1-1 90:10 ก่อนทำการบ่ม (ก)
และหลังทำการบ่ม (ข)



รูปที่ ข-6 แสดง IR สเปกตรัมของสูตรUA1-Da4: Si 2-1 90:10 ก่อนทำการบ่ม (ก)
และหลังทำการบ่ม (ข)

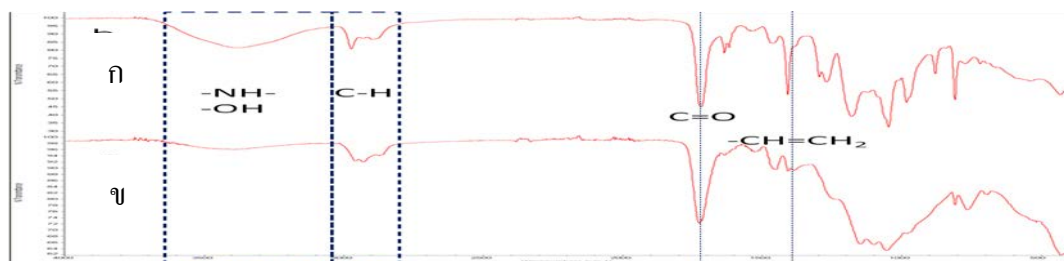


รูปที่ ข-7 แสดง IR สเปกตรัมของสูตรUA1-Da4: Si 1-1 80:20 ก่อนทำการบ่ม (ก)
และหลังทำการบ่ม (ข)



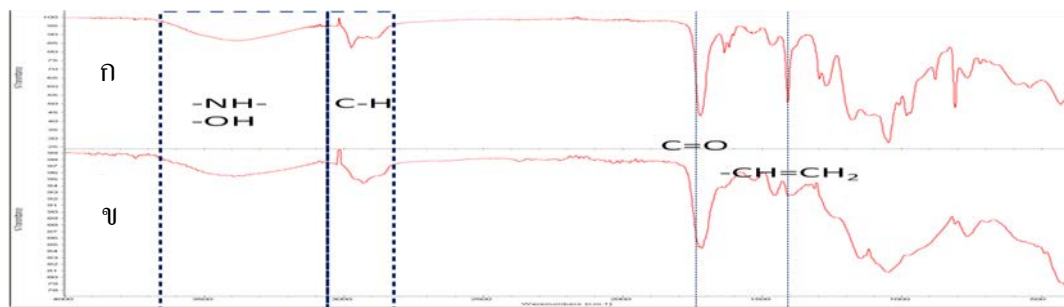
รูปที่ ข-8 แสดง IR สเปกตรัมของสูตร UA1-Da4:Si2-1 80:20 ก่อนทำการบ่ม (ก)

และหลังทำการบ่ม (ข)



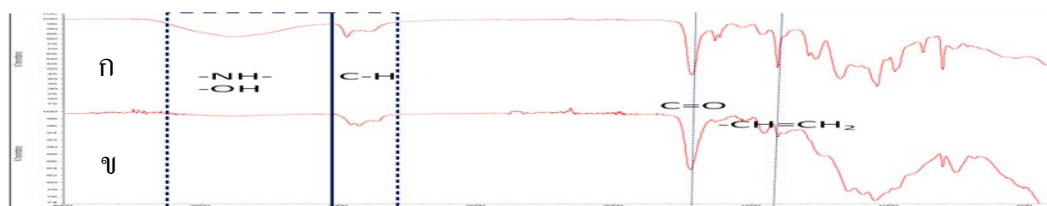
รูปที่ ข-9 แสดง IR สเปกตรัมของสูตร UA1-Da4:Si1-1 60:40 ก่อนทำการบ่ม (ก)

และหลังทำการบ่ม (ข)



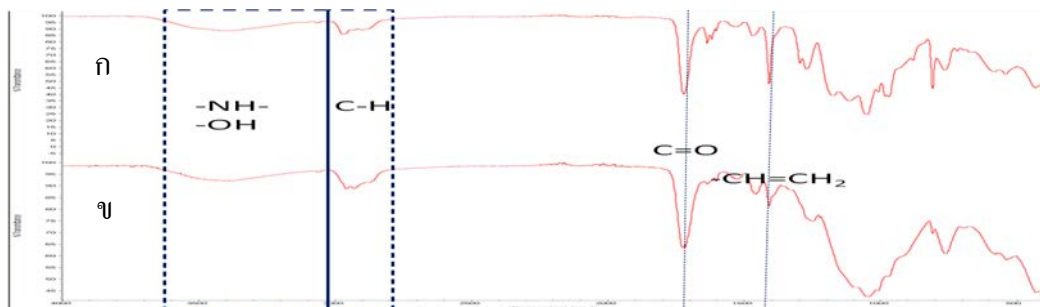
รูปที่ ข-10 แสดง IR สเปกตรัมของสูตร UA1-Da4:Si1-2 60:40 ก่อนทำการบ่ม (ก)

และหลังทำการบ่ม (ข)



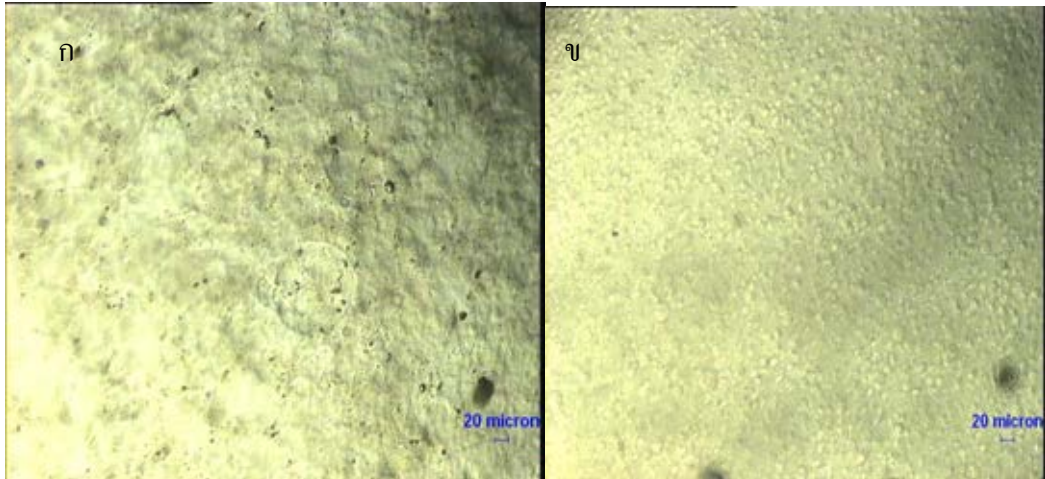
รูปที่ ข-11 แสดง IR สเปกตรัมของสูตร UA1-Da4:Si2-1 60:40 ก่อนทำการบ่ม (ก)

และหลังทำการบ่ม (ข)



รูปที่ ข-12 แสดง IR สเปกตรัมของสูตรUA1-Da4:Si2-2 60:40 ก่อนทำการบ่ม (ก) และหลังทำการบ่ม (ข)

ภาพผนวก ค



รูปที่ ค-1 พื้นผิวของฐานพื้นปลอมก่อนทำการเคลือบ (ก) และหลังทำการเคลือบและทำการบ่มด้วยรังสียูวี (ข) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ (กำลังขยาย 200 เท่า) รุ่น OLYMPUS SZ40

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย วีพอล ประมวลกิจจา เกิดวันที่ 3 กรกฎาคม 2530 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2551 จากนั้นศึกษา ต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคต้นปีการศึกษา 2552 และสำเร็จ การศึกษาในภาคปลายปี 2554 รวมระยะเวลาในการศึกษา 3 ปี