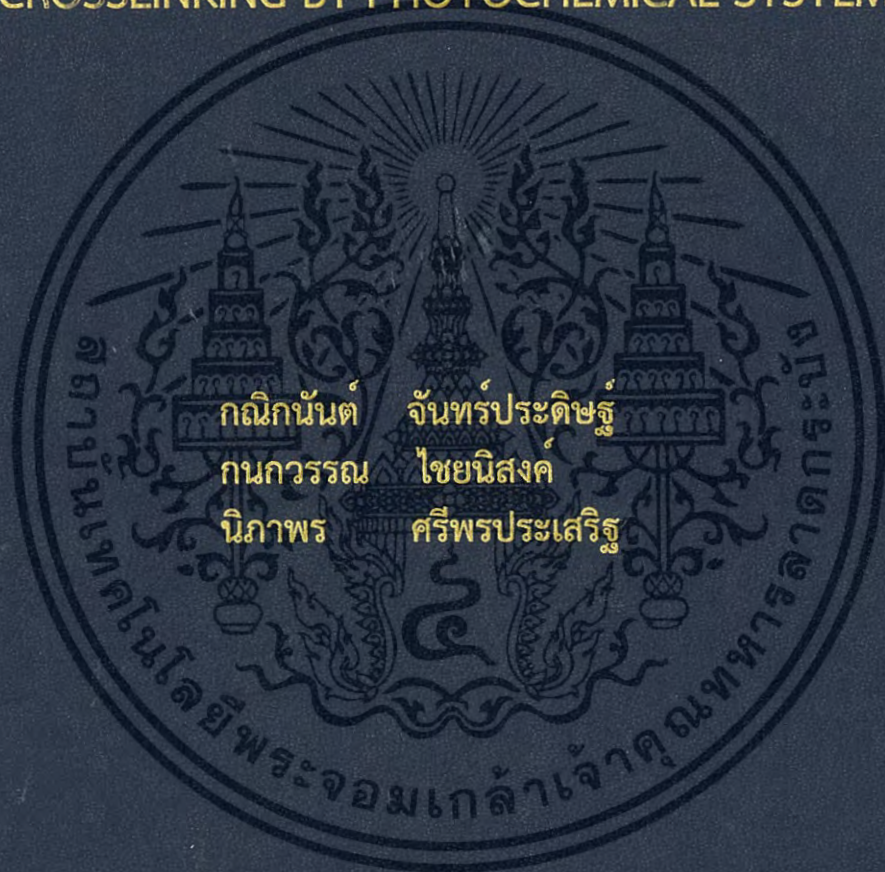


การศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มจากพอลิไวนิล-
แอลกอฮอล์ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก และน้ำมันละหุ่ง
เชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสง

STUDY ON WATER RESISTANCE PROPERTIES OF OLEIC
ACID MODIFIED POLY(VINYL ALCOHOL) AND CASTOR
OIL CROSSLINKING BY PHOTOCHEMICAL SYSTEMS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มจากพอลิไวนิล-
แอลกอฮอล์ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก และน้ำมันละหุ่ง
เชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสง

STUDY ON WATER RESISTANCE PROPERTIES OF OLEIC
ACID MODIFIED POLY(VINYL ALCOHOL) AND CASTOR
OIL CROSSLINKING BY PHOTOCHEMICAL SYSTEMS



กณิกนันต์ จันทร์ประดิษฐ์
กนกวรรณ ไชยนิสงค์
นิภาพร ศรีพรประเสริฐ

ส.ท.
ก/ร/ก
2558

เลขหมู่.....149265
เลขทะเบียน.....
วันเดือนปี.....30 ธ.ค. 2558

12882069
b.....
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON WATER RESISTANCE PROPERTIES OF OLEIC
ACID MODIFIED POLY(VINYL ALCOHOL) AND CASTOR
OIL CROSSLINKING BY PHOTOCHEMICAL SYSTEMS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มจากพอลิไวนิล-แอลกอฮอล์ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก และน้ำมันละหุ่งเชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสง

Study on Water Resistance Properties of Oleic Acid Modified Poly(Vinyl Alcohol) and Castor Oil Crosslinking by Photochemical Systems

ชื่อนักศึกษา

นางสาวกนิกนันต์ จันทร์ประดิษฐ์ รหัสนักศึกษา 55050555

นางสาวกนกวรณ ไชยนิสงค์ รหัสนักศึกษา 55050559

นางสาวนิภาพร ศรีพรประเสริฐ รหัสนักศึกษา 55050706

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทธวูธ มนต์วิเศษ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2558

| | |
|---|--------------------|
| คณะกรรมการสอบ | ลายมือชื่อ |
| ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ประธานกรรมการ | <i>Bea</i> |
| ดร.การุณย์ สาดอ่อน กรรมการ | <i>Mahef Sadee</i> |
| ผศ.ดร.ภัทธวูธ มนต์วิเศษ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา | <i>ฐิ</i> |

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | | |
|--------------------|---|----------------|-----------------------|
| หัวข้อโครงการพิเศษ | การศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก และน้ำมันละหุ่งเชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสง | | |
| ชื่อนักศึกษา | นางสาวกณิกนันต์ | จันทร์ประดิษฐ์ | รหัสนักศึกษา 55050555 |
| | นางสาวกนกวรรณ | ไชยนิสงค์ | รหัสนักศึกษา 55050559 |
| | นางสาวนิภาพร | ศรีพรประเสริฐ | รหัสนักศึกษา 55050706 |
| ปริญญา | วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) | | |
| ภาควิชา | เคมี | | |
| คณะ | วิทยาศาสตร์ | | |
| มหาวิทยาลัย | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) | | |
| ปีการศึกษา | 2558 | | |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผศ.ดร.ภัทธวูธ มนต์วิเศษ | | |

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มที่มีองค์ประกอบของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก และน้ำมันละหุ่ง โดยสูตรฟิล์มมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก (PO) ต่อน้ำมันละหุ่ง (C) เป็น 100:0, 99:1, 97:3, 95:5 โดยน้ำหนัก มีวิธีการเชื่อมโยงฟิล์ม 3 ระบบด้วยกัน คือ ระบบที่ฉายแสง, ระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น และระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต จากนั้นนำฟิล์มที่ได้มาทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ การทดสอบค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น, การทดสอบหาปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่, การทดสอบหาปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม, การทดสอบสมบัติเชิงกล ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 5% และ 75±15%, การทดสอบมุมสัมผัส, การทดสอบการดูดความชื้น และการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ จากการทดสอบพบว่าฟิล์มที่มีน้ำมันละหุ่งเป็นองค์ประกอบมีสมบัติการต้านทานน้ำที่ดี การทดสอบสมบัติเชิงกลที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 5% และ 75±15% พบว่าการปรับปรุงฟิล์มไม่มีผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ การดูดความชื้น พบว่าฟิล์มที่มีน้ำมันละหุ่งเป็นองค์ประกอบค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย และการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ พบว่าฟิล์มทุกสูตรมีค่าการซึมผ่านไอน้ำต่ำ โดยปริมาณน้ำมันละหุ่ง และระบบเชื่อมโยงไม่มีผลต่อค่าการซึมผ่านไอน้ำ จากผลการวิจัยพบว่าฟิล์มที่มีสมบัติการต้านทานน้ำที่ดีที่สุด คือ ฟิล์มสูตร PO97C3IV ซึ่งใช้ระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น

คำสำคัญ : กรดโอเลอิก น้ำมันละหุ่ง พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ฟิล์ม

| | | | |
|----------------------|--|----------------|---------------------|
| Title | Study on Water Resistance Properties of Oleic Acid Modified Poly(Vinyl Alcohol) and Castor Oil Crosslinking by Photochemical Systems | | |
| Students | Miss Kaniknan | Chanpradit | Student ID 55050555 |
| | Miss Kanokwan | Chainisong | Student ID 55050559 |
| | Miss Nipaporn | Sripornprasert | Student ID 55050706 |
| Degree | Bachelor of Science Industrial Chemistry | | |
| Department | Chemistry | | |
| Faculty | Science | | |
| University | King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) | | |
| Academic Year | 2015 | | |
| Advisor | Asst.Prof.Dr.Pathavuth Monvisade | | |

Abstract

This special project studied on the preparation of films consisting mainly of oleic acid-modified poly (vinyl alcohol) and castor oil. The weight ratios of oleic acid-modified poly (vinyl alcohol) (PO) and castor oil (C) were varied at 100:0, 99:1, 97:3 and 95:5 by weight. Methods for crosslinking i.e., no irradiation, irradiating under visible light and irradiating under UV light were varied to obtain the films. After that, the properties of the films i.e., water content (%WC), solid remain (%SR), swelling (%S), tensile properties at 5 and 75±15 %RH, contact angle, moisture uptake and water vapor permeability were investigated. The results showed that water resistance of the films was enhanced when castor oil was incorporated. The tensile results of the films revealed that there was no significant in tensile properties both conditions at 5 and 75±15 %RH. The moisture uptake results of the films contained castor oil showed the negligible declination of the value in comparison with non-incorporated films. In addition to water vapor permeability results, all films provided low water vapor permeability value. The amount of castor oil and crosslinking system did not affect water permeability of the films. All in all, the most prominent film in this project was PO97C3IV crosslinked by irradiating under visible light.

Keywords : Oleic acid, Castor oil, Poly(vinyl alcohol), Film

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ดีด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์ และบุคคลหลายฝ่ายที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อความสำเร็จของโครงการพิเศษนี้ ทางคณะผู้จัดทำโครงการพิเศษนี้จึงขอขอบพระคุณผู้ให้ความช่วยเหลือ ดังนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการดำเนินโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภัทธวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ช่วยให้ปรึกษาคำแนะนำ แก้ไข อบรมให้ทำงานอย่างมีระเบียบรอบคอบ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือตลอดการดำเนินโครงการพิเศษนี้ ทำให้การจัดทำโครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี คณะผู้ศึกษารู้อีกขาบซึ่งเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ และ ดร.การุณย์ สาดอ่อน คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่ให้ความอนุเคราะห์ตรวจทาน และแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเคมี และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือฯ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ในการวิเคราะห์และทดสอบชิ้นงานตลอดการดำเนินโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา รุ่นพี่ และเพื่อน ๆ ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความช่วยเหลือ คำแนะนำ และกำลังใจ จนการดำเนินโครงการพิเศษนี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ประโยชน์ และความรู้อันพึงมีจากโครงการพิเศษนี้ขอมอบแต่บิดา มารดา ครอบครัว ผู้มีพระคุณ และคณาจารย์ทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้ศึกษาขออนุมรับ และขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

กณิกนันต์

จันทร์ประดิษฐ์

กนกวรรณ

ไชยนิสงค์

นิภาพร

ศรีพรประเสริฐ

สารบัญ

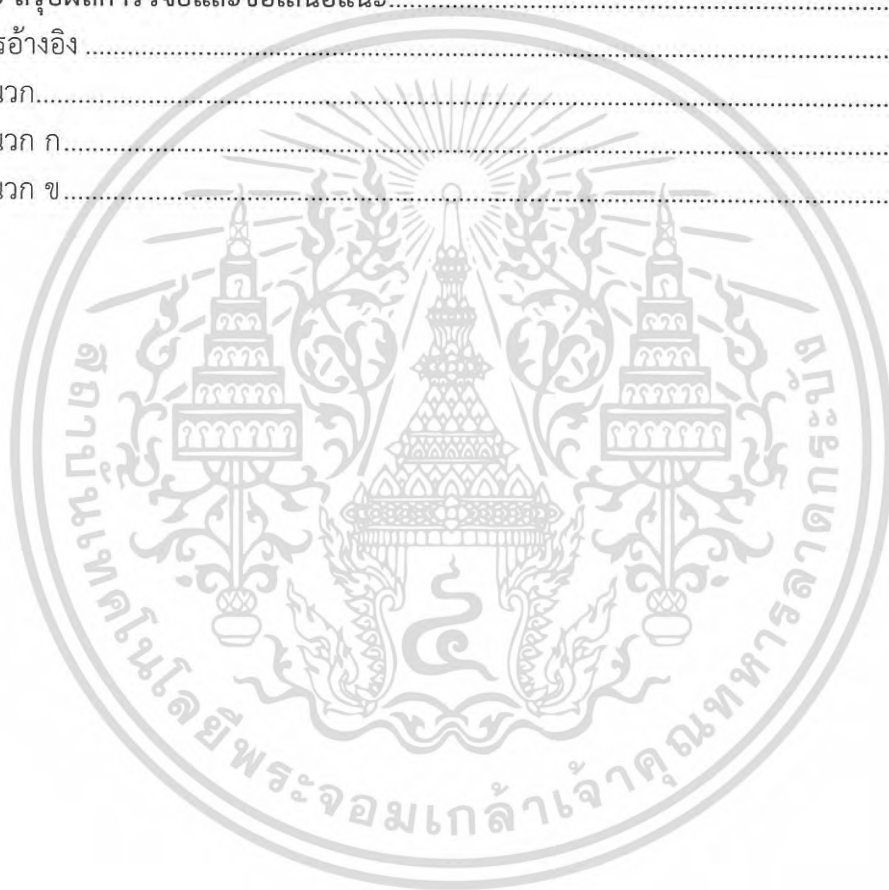
| | หน้า |
|--|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญรูป..... | ซ |
| คำย่อ/สัญลักษณ์ | ญ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 3 |
| 2.1 फिल्म | 3 |
| 2.1.1 फिल्मเคลือบแมททัลไลซ์ (Metallized film)..... | 3 |
| 2.1.2 फिल्मผนึกสุญญากาศ (Skin vacuum)..... | 3 |
| 2.1.3 फिल्मหดพอลิเอทิลีน (PE Shrink film)..... | 3 |
| 2.1.4 फिल्मพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol))..... | 3 |
| 2.1.5 फिल्मป้องกันการขีดข่วน (Protection film) | 4 |
| 2.1.6 फिल्मยืดพันพาเลท (LLDPE) | 4 |
| 2.1.7 फिल्मโอพีพี (Oriented film)..... | 4 |
| 2.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol))..... | 4 |
| 2.2.1 การเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์..... | 4 |
| 2.2.2 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์..... | 5 |
| 2.2.3 การใช้งานพอลิไวนิลแอลกอฮอล์..... | 6 |
| 2.3 กรดไขมัน (Fatty acid)..... | 6 |
| 2.2.1 กรดโอเลอิก (Oleic acid)..... | 8 |
| 2.2.2 น้ำมันละหุ่ง (Castor oil) | 9 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 2.4 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification)..... | 10 |
| 2.5 ระบบเชื่อมโยง | 11 |
| 2.5.1 ระบบความร้อน (Thermal)..... | 12 |
| 2.5.2 ระบบรีดอกซ์ (Redox)..... | 14 |
| 2.5.3 ระบบฉายแสง (Photochemical)..... | 15 |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 16 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย | 18 |
| 3.1 สารเคมี | 18 |
| 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ..... | 18 |
| 3.3 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์..... | 20 |
| 3.4 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ตัดแปร | 20 |
| 3.5 การเตรียมสูตรฟิล์ม | 21 |
| 3.6 การขึ้นรูปฟิล์ม | 22 |
| 3.7 การทดสอบ (Testing)..... | 22 |
| 3.7.1 ความหนาของฟิล์ม..... | 22 |
| 3.7.2 การทดสอบค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น (%Water content (%WC)) | 22 |
| 3.7.3 การทดสอบหาปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ (%Solid remain (%SR)) | 22 |
| 3.7.4 การทดสอบหาปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม (%Swelling (%S))..... | 23 |
| 3.7.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล | 23 |
| 3.7.6 การทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle) | 24 |
| 3.7.7 การทดสอบการดูดความชื้น (Moisture uptake)..... | 24 |
| 3.7.8 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability (WVP))..... | 24 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล | 26 |
| 4.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม..... | 28 |
| 4.2 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม..... | 30 |
| 4.2.1 ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น (%Water content (%WC))..... | 30 |
| 4.2.2 ปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ (%Solid remain (%SR))..... | 34 |
| 4.2.3 ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม (%Swelling (%S))..... | 35 |
| 4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม..... | 36 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 4.3.1 ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Tensile strength)..... | 36 |
| 4.3.2 ค่าYoung's modulus..... | 37 |
| 4.3.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)..... | 38 |
| 4.4 การทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle)..... | 39 |
| 4.5 การทดสอบการดูดความชื้น (Moisture uptake) | 40 |
| 4.6 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability (WVP)) | 40 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 42 |
| เอกสารอ้างอิง | 44 |
| ภาคผนวก..... | 47 |
| ภาคผนวก ก..... | 48 |
| ภาคผนวก ข..... | 50 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 สมบัติทั่วไปของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์..... | 5 |
| 2.2 สูตรโครงสร้างของกรดไขมันอิ่มตัว และแหล่งอาหาร..... | 7 |
| 2.3 สูตรโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัว จำนวนพันธะคู่ และแหล่งอาหาร..... | 8 |
| 2.4 สมบัติของน้ำมันละหุ่ง..... | 9 |
| 2.5 กรดไขมันที่สำคัญของน้ำมันละหุ่ง | 10 |
| 2.6 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของตัวริเริ่มปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ที่แตกตัวโดยความร้อน | 13 |
| 3.1 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 18 |
| 3.2 สูตรฟิล์มที่ศึกษา | 21 |
| ก-1 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้นที่ 24 ชั่วโมงของฟิล์มสูตรต่าง ๆ..... | 48 |
| ก-2 ค่าปริมาณของแข็งคงเหลือของฟิล์มหลังแช่น้ำกลั่น 24 ชั่วโมงของฟิล์มสูตรต่าง ๆ..... | 48 |
| ก-3 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มสุดท้ายของฟิล์มที่ 24 ชั่วโมงของฟิล์มสูตรต่าง ๆ..... | 49 |
| ก-4 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น (%WC), ค่าปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ (%SR) และค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม (%S) ที่ 24 ชั่วโมง..... | 49 |
| ข-1 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดก่อนขึ้นงานฉีกขาดของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ความชื้นสัมพัทธ์ 5% | 50 |
| ข-2 ค่ายังมอดูลัสของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 5%..... | 52 |
| ข-3 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 5%..... | 54 |
| ข-4 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดก่อนขึ้นงานฉีกขาดของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75±15% | 56 |
| ข-5 ค่ายังมอดูลัสของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75±15% | 58 |
| ข-6 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75±15% | 60 |
| ข-7 ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสที่นาที่เริ่มต้น (1 นาที) ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ | 62 |
| ข-8 ค่าการทดสอบมุมสัมผัสด้วยน้ำกลั่นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ..... | 62 |
| ข-9 รูปการทดสอบมุมสัมผัสด้วยน้ำกลั่นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ..... | 63 |
| ข-10 ค่าการดูดความชื้น ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ | 66 |
| ข-11 ค่าการซึมผ่านไอน้ำ ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ($g/h \cdot m^2$)..... | 66 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์..... | 4 |
| 2.2 การสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซิเตต..... | 5 |
| 2.3 โครงสร้างของกรดโอเลอิก | 9 |
| 2.4 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน | 10 |
| 2.5 ปฏิกิริยาระหว่างกรดแอซิดิกกับเอทานอล | 10 |
| 2.6 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอทิลแอซิเตต..... | 11 |
| 2.7 ตัวอย่างของมอนอเมอร์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ผ่านกลไกแบบลูกโซ่..... | 11 |
| 2.8 ตัวอย่างของมอนอเมอร์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ผ่านกลไกแบบควบแน่นพอลิเมอร์ผ่านกลไกแบบควบแน่น..... | 11 |
| 2.9 ปฏิกิริยาการแตกตัวของ AIBN (ก) และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (ข)..... | 12 |
| 2.10 ปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารโพแทสเซียมเปอร์ออกไซด์โซเดียมเพอร์ออกไซด์..... | 14 |
| 2.11 ปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบเบนโซฟีโนน..... | 15 |
| 3.1 อุปกรณ์ฉายแสงระบบช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น | 19 |
| 3.2 อุปกรณ์ฉายแสงระบบอัลตราไวโอเล็ต | 19 |
| 3.3 กรอบสกรีน..... | 19 |
| 3.4 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์..... | 20 |
| 3.5 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ตัดแปรด้วยกรดโอเลอิก | 20 |
| 3.6 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า | 23 |
| 4.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และกรดโอเลอิก | 27 |
| 4.2 ตัวอย่างฟิล์มที่เตรียมได้ ความหนา 35 ± 5 ไมโครเมตร..... | 29 |
| 4.3 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้นที่ 24 ชั่วโมง | 30 |
| 4.4 โซเดียมเปอร์ซัลเฟตแตกตัวทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งอัลโลลิกหรือพันธะคู่ของกรดโอเลอิกและน้ำมันละหุ่ง | 31 |
| 4.5 อันตรกิริยาที่ตำแหน่งหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์หรือน้ำมันละหุ่ง | 33 |
| 4.6 ค่าปริมาณของแข็งคงเหลือหลังแช่น้ำกลั่น 24 ชั่วโมง | 34 |
| 4.7 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มภายหลังแช่น้ำกลั่น 24 ชั่วโมง | 35 |
| 4.8 ความแข็งแรงดึงสูงสุดก่อนชิ้นงานฉีกขาดของฟิล์มสูตรต่าง ๆ | 36 |
| 4.9 ค่า Young's Modulus ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ..... | 37 |
| 4.10 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มสูตรต่าง ๆ | 38 |
| 4.11 ค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ด้วยน้ำกลั่น..... | 39 |
| 4.12 ตัวอย่างลักษณะมุมสัมผัสที่เปลี่ยนแปลง a) ลักษณะเริ่มต้น b) มุมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นผิวฟิล์มเกิดการบวมตัว c) มุมที่แคบลง เนื่องจากน้ำซึมลงบนพื้นผิวฟิล์ม | 39 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.13 ค่าการดูดความชื้นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ..... | 40 |
| 4.14 ค่าการซึมผ่านไอน้ำของสูตรฟิล์มต่าง ๆ..... | 41 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

| คำย่อ/สัญลักษณ์ | คำอธิบาย |
|-----------------|--|
| P | พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol)) |
| PO | พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยกรดโอเลอิก |
| <i>p</i> -TSA | กรดพาราโทลูอินซัลโฟนิก (<i>p</i> -Toluene sulfonic acid) |
| C | น้ำมันละหุ่ง (Castor oil) |
| MO | เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange) |
| BP | เบนโซฟีโนน (Benzophenone) |
| I | ตัวริเริ่ม (Initiator) |
| V | ระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (Visible) |
| U | ระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet) |
| RH | ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) |
| %WC | ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น (%Water content) |
| %SR | ปริมาณของแข็งคงเหลือ (%Solid remain) |
| %S | ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม (%Swelling) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ฟิล์มเป็นพลาสติกชนิดหนึ่งที่น่ามาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันทั้งทางด้านอุปโภคบริโภค เช่น งานบรรจุภัณฑ์ และฟิล์มเคลือบผิว เป็นต้น ผลิตภัณฑ์ฟิล์มที่น่ามาใช้งานในชีวิตประจำวันส่วนใหญ่มีแหล่งวัตถุดิบจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ซึ่งส่วนใหญ่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ จึงมีต้นทุนในการกำจัดหลังการใช้งาน และยิ่งก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและผลกระทบต่อผู้บริโภค

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ โดยฟิล์มที่ได้มีสมบัติละลายได้ดีในน้ำ ด้านทานต่อน้ำมัน ไขมัน และสารละลายต่าง ๆ ได้ดีเยี่ยม รวมทั้งมีความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อแรงกระแทก ความทนทานต่อการฉีกขาด และการกั้นการแพร่ผ่านของก๊าซออกซิเจนสูง ทั้งยังสามารถย่อยสลายได้ดีในบ่อบำบัดน้ำเสีย พลาสติกในรูปแผ่นฟิล์มของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์หีบห่อทั่วไป และยังสามารถนำไปใช้ในด้านอื่น ๆ ได้แก่ ด้านการเกษตร ด้านสิ่งทอ ด้านการแพทย์ เป็นต้น [1]

อย่างไรก็ตามฟิล์มที่ได้จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ยังมีข้อด้อยเนื่องจากสมบัติการต้านทานน้ำที่ต่ำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีการปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยงานวิจัยก่อนหน้านี [2-4] ได้นำกรดไขมันไม่อิ่มตัว คือ กรดโอเลอิกมาปรับปรุงสมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อปรับโครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ให้มีความเป็นขั้วน้อยลงและต้านทานน้ำมากขึ้น นอกจากนี้พันธะคู่ในกรดไขมันไม่อิ่มตัวยังสามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงทำให้สมบัติการต้านทานน้ำดีขึ้น

ละหุ่งเป็นพืชน้ำมันที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย เป็นพืชในวงศ์เดียวกับยางพารา และมันสำปะหลัง โดยน้ำมันละหุ่งได้จากเมล็ดละหุ่ง ซึ่งภายในเมล็ดประกอบด้วยน้ำมันระเหยยากประมาณ 45-55% โปรตีน 15-20% ในน้ำมันมีองค์ประกอบสำคัญ คือ กรดริซิโนเลอิก น้ำมันละหุ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะ 0.958-0.969 ที่ 25°C จุดแข็งตัว -10 ถึง -18°C ค่าความหนืดอยู่ระหว่าง 935-1,033 centipoise ที่ 20°C น้ำมันละหุ่งมีสมบัติ ไม่แห้งง่าย มีความหนืด และเหนียวตกว่าน้ำมันชนิดอื่น ๆ จึงมีการนำมาใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น สี พลาสติก เครื่องสำอาง หมึกพิมพ์ น้ำมันหล่อลื่น และจาระบี [5-6] งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการนำน้ำมันละหุ่งมาเป็นส่วนผสมในการเตรียมฟิล์มร่วมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เพื่อให้ฟิล์มมีสมบัติการต้านน้ำที่ดีขึ้น และการใส่น้ำมันละหุ่งจะสามารถเพิ่มความหนืดของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทำให้ขึ้นรูปฟิล์มได้ง่ายขึ้น

ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการพัฒนาฟิล์มจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิกด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน และนำน้ำมันละหุ่งมาใช้เป็นองค์ประกอบ และเชื่อมโยงขณะขึ้นรูปฟิล์มด้วยระบบการฉายแสงช่วงคลื่น UV-Visible จากนั้นนำฟิล์มที่ได้ไปทดสอบเพื่อศึกษาสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ความหนาของแผ่นฟิล์ม, ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น, ปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่, ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม, สมบัติเชิงกล, มุมสัมผัส, การดูดความชื้น และการซึมผ่านไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยกรดโอเลอิก และน้ำมันละหุ่งให้มีความสามารถในการต้านทานน้ำ โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณน้ำมันละหุ่ง ผลของการใช้ระบบเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน คือ ระบบที่ไม่ฉายแสง ระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น และระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก

1.3.2 เตรียมสูตรฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิกกับน้ำมันละหุ่ง โดยการเชื่อมโยงฟิล์มด้วยระบบการฉายแสง คือ การเชื่อมโยงด้วยแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น และแสงอัลตราไวโอเล็ต เปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ฉายแสง

1.3.3 ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ความหนาของแผ่นฟิล์ม, ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น, ปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่, ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม, สมบัติเชิงกล, มุมสัมผัส, การดูดความชื้น และการซึมผ่านไอน้ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเตรียมฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก และน้ำมันละหุ่งให้มีความสามารถในการต้านทานน้ำที่ดี

1.4.2 ทราบปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการบวมตัว ความสามารถในการต้านทานน้ำ และสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 फिल्म (Film)

ฟิล์มมีบทบาทในชีวิตประจำวันของเราค่อนข้างมาก การใช้งานที่เห็นได้ชัด คือ ใช้ห่ออาหารกึ่งสำเร็จรูปและอาหารสด นอกจากนี้ยังได้มีการนำฟิล์มมาใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อใช้ห่อสินค้าหรือการรวมสินค้าเป็นหน่วยเดียวกัน รวมทั้งการห่อสินค้าบนแท่นรองรับเพื่อให้ง่ายต่อการลำเลียงขนส่ง ใช้ประโยชน์ในการช่วยยืดอายุสินค้าที่วางขายให้ผู้บริโภคสามารถมองเห็นสินค้าจากภายนอกได้ และช่วยป้องกันสิ่งปนเปื้อนในสินค้าอีกด้วย

ฟิล์มจัดเป็นพลาสติกประเภทหนึ่งที่มีสมบัติเฉพาะ คือ เหนียว ใส และมีความยืดหยุ่นสูง ทำให้สามารถใช้ห่อสินค้าได้โดยไม่ต้องใช้ความร้อนเพื่อให้แผ่นฟิล์มเกาะติดกัน จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้เป็นอย่างดีกับสินค้าที่อาจเสียหายได้ง่ายเมื่อโดนความร้อน เช่น ผลไม้ ผัก และอาหารสดต่าง ๆ เม็ดพลาสติกที่นิยมใช้ผลิตเป็นฟิล์ม คือ พอลิพรอพิลีน, พอลิเอทิลีน, พอลิไวนิลคลอไรด์ และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นต้น

สารเติมแต่งที่จำเป็นในการผลิตฟิล์ม ได้แก่ สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (Antioxidant) เพื่อป้องกันการสลายตัวของพลาสติกในกระบวนการผลิต สารเกาะติด (Cling agent) เพื่อช่วยให้ฟิล์มยึดติดกันได้ดีเมื่อนำมาใช้ห่อสินค้า และสารเติมแต่งอื่น ๆ เพื่อการใช้งานเฉพาะทาง เช่น สารป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV inhibitor) เพื่อยืดอายุของฟิล์ม สารป้องกันการเกาะติด (Antiblock agent) เพื่อป้องกันไม่ให้ฟิล์มเกาะติดกันแน่น เป็นต้น [11] อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญที่ผู้ใช้งานไม่ควรมองข้ามคือการเลือกใช้ฟิล์มให้เหมาะสมกับสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ สมบัติของฟิล์มที่สำคัญในการเลือกใช้ ได้แก่ ความยืดหยุ่น (Elasticity), การต้านทานแรงดึง (Tensile strength), ความสามารถในการยืดตัว (Stretch force), อัตราการซึมผ่านของก๊าซ (Gas transmission rate) และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapors transmission) โดยตัวอย่างของฟิล์มประเภทต่าง ๆ แสดงดังนี้

2.1.1 ฟิล์มเคลือบเมทัลไลซ์ : Metallized film

เป็นการนำฟิล์มพ่นเคลือบด้วยโลหะอะลูมิเนียม โดยระบบสุญญากาศใช้กับบรรจุภัณฑ์งานพิมพ์ระบบกราเวียร์ทั่วไป มีสีเงิน ช่วยยืดอายุการใช้งาน และสร้างความโดดเด่นให้กับผลิตภัณฑ์

2.1.2 ฟิล์มผนังสุญญากาศ : Skin vacuum

เป็นฟิล์มที่ใส เหนียว แข็งแรง มีสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของอากาศได้ดี และสามารถแนบติดกับสินค้าที่บรรจุภายในได้เสมือนเป็นชั้นผิว เนื่องจากบรรจุด้วยระบบสุญญากาศจึงสามารถรักษาความสดใหม่ให้กับสินค้าได้ยาวนาน

2.1.3 ฟิล์มหดพอลิเอทิลีน : PE Shrink film

เป็นฟิล์มที่ลักษณะขุ่น เหนียว แข็งแรงเป็นพิเศษ รับน้ำหนักสินค้าได้ดี เหมาะสำหรับงานห่อรัดสินค้าหรือผลิตภัณฑ์

2.1.4 ฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ : Poly(vinyl alcohol)

เป็นฟิล์มที่ใส แต่เปราะ เนื่องจากสมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ แต่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 फिल्मป้องกันการขีดข่วน : Protection film

เป็นฟิล์มชนิด Tape based PE มีกาวหนึ่งด้านสามารถแนบยึดติดพื้นผิวทุกชนิด และลอกออกง่ายไม่ติดคราบกาว ใช้สำหรับป้องกันพื้นผิวจากรอยขีดข่วน

2.1.6 फिल्मยืดพันพาลาเท : LLDPE

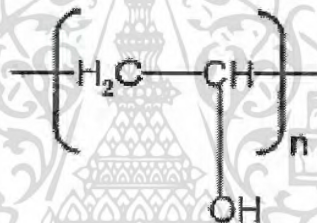
เป็นฟิล์มที่มีลักษณะใส เหนียว ไม่ฉีกขาดง่าย แม้ทำการห่อสินค้าที่มีมุมแหลม และสามารถยืดได้ค่อนข้างมาก 3-4 เท่า เหมาะสำหรับห่อหุ้มสินค้าที่มีขนาดใหญ่ ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำและฝุ่นละอองให้กับสินค้า

2.1.7 फिल्मโอพีพี : Oriented film

เป็นฟิล์มใส บาง ชนิดที่ผลิตด้วยความร้อน แต่มีสมบัติที่ทนทานมากกว่าฟิล์มที่ผลิตด้วยกรรมวิธีอื่น ๆ จึงเหมาะสำหรับเครื่องบรรจุหีบห่อที่มีความเร็วสูง เนื่องจากทนแรงดึงของเครื่อง ไม่ฉีกขาดง่าย [10]

2.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol))

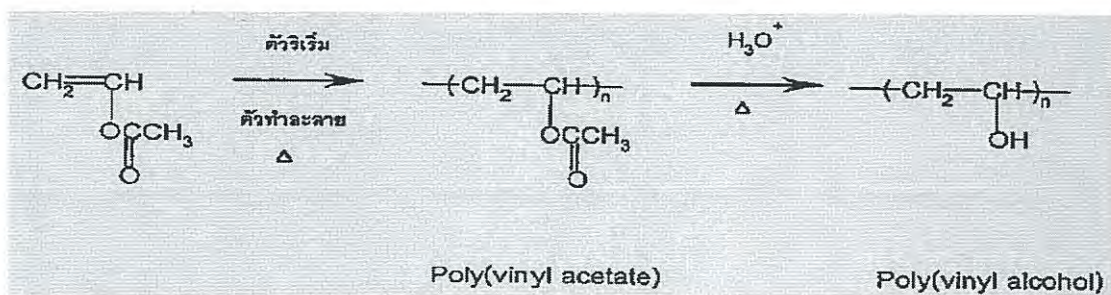
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีสูตรโครงสร้าง แสดงดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

2.2.1 การเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

การสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไม่สามารถเตรียมผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันจากมอนอเมอร์ไวนิลแอลกอฮอล์ (Vinyl alcohol) ได้ เนื่องจากมอนอเมอร์ดังกล่าวเป็นสารที่ไม่เสถียร จึงต้องเตรียมผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจากไวนิลอะซิเตต (Vinyl acetate) ตามด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสพอลิไวนิลอะซิเตตในเอทานอลในระบบที่มีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันจากหมู่อะซิเตตไปเป็นหมู่ไฮดรอกซี จะส่งผลให้สภาพขี้ของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น และละลายในน้ำได้ดีขึ้น การสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซิเตต [12] แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซิเตต

2.2.2 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่มีกลิ่น ละลายน้ำได้ และละลายในเอทานอลได้เล็กน้อย แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ใด ๆ ทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำมัน โดยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีสมบัติการก่อตัวเป็นฟิล์ม และการยึดติด (กาว) ที่ดีเยี่ยม อีกทั้งยังมีความแข็งแรงดี และความยืดหยุ่นสูง รวมถึงมีปริมาณออกซิเจนที่สูง และมีสมบัติป้องกันการระเหยของน้ำมันและกลิ่น ทั้งนี้สมบัติดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นด้วย หากมีความชื้นสูงขึ้น น้ำก็จะถูกดูดซับได้มากขึ้น โดยน้ำทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ ส่งผลให้ลดความแข็งแรงดีลง แต่จะเพิ่มแรงเหนียวและแรงยึดให้มากขึ้น โดยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 200°C และสามารถย่อยสลายได้โดยวิธีทางชีวภาพ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิส อย่างสมบูรณ์มีจุดหลอมเหลวที่ 230°C และที่ได้จากการไฮโดรไลซิสเป็นบางส่วนมีจุดหลอมเหลวที่ 180-190°C [13] สมบัติทั่วไปของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [14]

| | |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| ลักษณะภายนอก | เป็นผงสีขาวหรือเม็ดสีขาวจนถึงครีม |
| Specific gravity | 1.25-1.32 |
| ความหนาแน่น | 1.298 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร |
| อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว | 80°C |
| จุดหลอมเหลว | 230°C |
| จุดเดือด | 228°C |
| ความคงทนต่อน้ำมัน | ไม่ละลายในน้ำมัน |
| ความคงทนต่อสารละลาย | ไม่ละลายในตัวละลายอินทรีย์ |
| ความคงทนต่อกรด-เบส | อ่อนตัวและละลายได้ในทั้งกรดและเบส |

2.2.3 การใช้งานพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

การใช้งานพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [15] แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1. อาศัยสมบัติการละลายในน้ำ เช่น ใช้เป็นสารอิมัลชัน (thickening agent) เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง กาว ใช้เป็นตัวประสานในสี และใช้ทำแผ่นฟิล์มเคลือบกระดาษที่มีความใส เหนียวและทนต่อการขีดข่วน

2. นำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไปทำปฏิกิริยาเคมีแบบเชื่อมโยงซึ่งจะไม่สามารถละลายได้ในน้ำแล้วจึงนำมาใช้งาน ซึ่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่ละลายน้ำนี้สามารถดูดน้ำ และความชื้นได้เป็นอย่างดี (ประมาณ 30% w/w) จึงใช้เป็นเส้นใยแทนฝ้ายได้ ผ้าที่ทำด้วยเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์นี้สวมใส่สบาย ซักง่าย ทนทานต่อการสึกหรอ และสามารถคงรูปได้เป็นอย่างดี อีกทั้งนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น ด้านการแพทย์ ด้านเกษตรกรรม เป็นต้น

2.3 กรดไขมัน (Fatty acid)

กรดไขมันเป็นกรดที่ได้จากน้ำมัน ซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ที่ประกอบด้วยคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) โดยมีจำนวนของคาร์บอนเป็นเลขคู่ตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป มีสูตรทั่วไปคือ $R-COOH$ ลักษณะสูตรโครงสร้างของกรดไขมันประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เรียกว่า คาร์บอกซิล ($-COOH$) ซึ่งประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) อีกส่วนหนึ่งเรียกว่า สายโซ่ไฮโดรคาร์บอน (R) โดยมีธาตุคาร์บอนทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวกันเป็นสายโซ่ โดยปกติแล้วธาตุคาร์บอนจะมีอยู่ 4 แขนง แขนงที่เหลือจากการจับธาตุคาร์บอนด้วยกันจะไปจับกับธาตุไฮโดรเจน กรดไขมันมีอยู่หลายชนิด ทุกชนิดจะมีหน่วยคาร์บอกซิลอยู่หนึ่งหน่วยเหมือนกัน ส่วนที่แตกต่างกันคือ ลักษณะทางเคมีในส่วนของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน ทำให้กรดไขมันมีชื่อแตกต่างกันไป [17]

กรดไขมันแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่

1. กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid) คือ กรดไขมันที่ไม่มีพันธะคู่ (Double bond) มีแต่พันธะเดี่ยวหรือหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) อื่น ๆ ในสายโซ่ส่วนของไฮโดรคาร์บอน เป็นกรดไขมันที่โมเลกุลมีคาร์บอนกับไฮโดรเจนจับเกาะอยู่เต็มที่แล้ว ไม่สามารถรับไฮโดรเจนหรือธาตุอื่นเข้าไปในโมเลกุลได้อีก โดยที่สายโซ่ไฮโดรคาร์บอน (R) เท่ากับ C_nH_{2n+1} และ n เป็นตัวเลขที่แสดงถึงจำนวนคาร์บอนอะตอม กรดไขมันชนิดนี้พบมากในไขมันสัตว์ น้ำมันปาล์ม และน้ำมันมะพร้าว [16] ตัวอย่างกรดไขมันอิ่มตัว แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของกรดไขมันอิ่มตัว และแหล่งอาหาร [17-19]

| ชื่อกรดไขมันอิ่มตัว | สูตรโครงสร้าง | แหล่งอาหาร | จุดหลอมเหลว (°C) |
|-----------------------------------|--|-----------------------------|------------------|
| กรดบิวไทริก (Butyric acid) | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$ | เนย และไขมันเนย | -7.9 |
| กรดคาโปรอิก (Caproic acid) | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{COOH}$ | เนย และไขมันเนย | -3.4 |
| กรดคาโปรลิก (Caprylic acid) | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$ | น้ำมันมะพร้าว และไขมันนม | 16.7 |
| กรดคาปริก (Capric acid) | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$ | น้ำมันปาล์ม | 31.3-31.6 |
| กรดลอริก (Lauric acid) | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$ | น้ำมันมะพร้าว | 44.0-44.2 |
| กรดไมริสติก (Myristic acid) | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$ | น้ำมันมะพร้าว ไขมันสัตว์ | 53.9-54.4 |
| กรดปาล์มิติก (Palmitic acid) | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$ | น้ำมันพืชและ ไขมันสัตว์ | 62.7-63.1 |
| กรดสเตียริก (Stearic acid) | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$ | น้ำมันพืชและ ไขมันสัตว์ | 69.6 |
| กรดอะราซิดิก (Arachidic acid) | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{COOH}$ | น้ำมันถั่วลิสง | 75.4-76.5 |
| กรดเบฮีนิก (Behenic acid) | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{20}\text{COOH}$ | น้ำมันถั่วลิสง | 80.0-81.5 |
| กรดลิโนซีริก (Lignoceric acid) | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{22}\text{COOH}$ | น้ำมันถั่วลิสง | 84.2-86.0 |

2. กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) คือ กรดไขมันที่มีพันธะคู่ ในส่วนของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน มีจำนวนพันธะคู่อาจมีมากกว่า 1 ตำแหน่งขึ้นกับแต่ละชนิด กรดไขมันไม่อิ่มตัวส่วนใหญ่จะพบมากในไขมันพืช ยกเว้นน้ำมันปาล์ม และน้ำมันมะพร้าว การมีพันธะคู่อยู่มากเกินไปจะส่งผลให้น้ำมันเหม็นหืนได้ง่ายเมื่อตั้งทิ้งไว้ในอากาศ แต่พบว่าน้ำมันสัตว์มีกลิ่นเหม็นหืนเร็วกว่าน้ำมันพืชทั้ง ๆ ที่น้ำมันพืชมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากกว่าน้ำมันสัตว์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะน้ำมันพืชมีวิตามินอี ซึ่งเป็นสารป้องกันการเติมออกซิเจนอยู่แล้วตามธรรมชาติ ตัวอย่างกรดไขมันชนิดนี้ ได้แก่ กรดโอเลอิก กรดไลโนเลอิก เป็นต้น [17] ตัวอย่างกรดไขมันไม่อิ่มตัว แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัว จำนวนพันธะคู่ และแหล่งอาหาร [17-19]

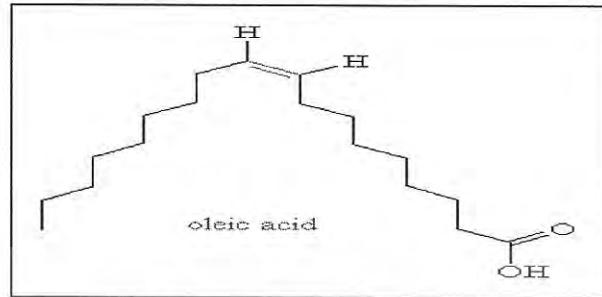
| ชื่อกรดไขมันไม่อิ่มตัว | สูตรโครงสร้าง | จำนวนพันธะคู่ | แหล่งอาหาร | จุดหลอมเหลว (°C) |
|---------------------------------------|---|---------------|--------------|------------------|
| กรดปาลมิโตเลอิก (Palmitoleic acid) | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$ | 1 | เนย | 0-0.5 |
| กรดโอเลอิก (Oleic acid) | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$ | 1 | น้ำมันมะกอก | 10.5-16.0 |
| กรดไลโนเลอิก (Linoleic acid) | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$ | 2 | น้ำมันลินซีด | -5.0 |
| กรดไลโนเลนิก (Linolenic acid) | $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$ | 3 | น้ำมันลินซีด | -11.0 |
| กรดอะราชิโดนิก (Arachidonic acid) | $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=(\text{CHCH}_2\text{CH})_3=\text{CH}(\text{CH}_2)_3\text{COOH}$ | 4 | เลซิทิน | -49.5 |

2.3.1 กรดโอเลอิก (Oleic acid)

กรดโอเลอิก [20] จัดเป็นกรดไขมันประเภทไม่อิ่มตัวที่พบมากในน้ำมันพืช เช่น น้ำมันมะกอก กรดไขมันชนิดนี้ทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทั้งที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิสูง เมื่อนำมาทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสถานะเป็นของเหลวคล้ายกับน้ำมัน มีสีน้ำตาลอมเหลือง กลิ่นเหมือนน้ำมัน จึงเหมาะแก่การศึกษาปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และกรดโอเลอิก โดยในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ให้มีความต้านทานน้ำดีขึ้น เนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่มีความเป็นขั้ว มีความชอบน้ำ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และกรดโอเลอิก ทำให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีกิ่งก้านที่ยาวขึ้น เพื่อลดความเป็นขั้วและความชอบน้ำลง สามารถต้านทานน้ำได้มากขึ้น

กรดโอเลอิก (รูปที่ 2.3) มีชื่อทางเคมีว่า Octadecenoic acid มีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะคู่ 1 ตำแหน่ง ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 9 จัดเป็น Monounsaturated fatty acid เนื่องจากมีตำแหน่งพันธะคู่ 1 ตำแหน่ง ดังนั้นรูปร่างของโมเลกุล Oleic acid จึงไม่ได้เป็นเส้นตรง แต่จะมีลักษณะหักมุมที่ตำแหน่งพันธะคู่ กรดโอเลอิกมักนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรม

เครื่องสำอาง อุตสาหกรรมผลิตสบู่ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมสารหล่อลื่น และอุตสาหกรรมเคลือบเงา เป็นต้น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของกรดโอเลอิก

2.3.2 น้ำมันละหุ่ง (Castor oil)

น้ำมันละหุ่งได้จากเมล็ดที่มีลักษณะเป็นทรงรี เปลือกเมล็ดสีน้ำตาลแดงประขาว หรือจุดสีน้ำตาลปนเทา มีสีแตกต่างกันไปขึ้นกับแต่ละพันธุ์ เนื้อในสีขาว (มีโปรตีนที่มีพิษ) ภายในเนื้อเมล็ดมีน้ำมันประมาณ 45-55% เป็นของเหลวข้น เหนียวใส ไม่มีสี หรือมีสีเหลืองอ่อน มีกลิ่นเล็กน้อย และโปรตีน 15-20% ซึ่งในน้ำมันมีองค์ประกอบสำคัญ คือ Triricinoleoylglycerol คิดเป็นประมาณ 90% ของกรดไขมันทั้งหมด ที่เหลือเป็น Linoleic acid, Oleic acid, Stearic acid เล็กน้อย [6] สมบัติบางประการของน้ำมันละหุ่ง แสดงตารางที่ 2.4

น้ำมันละหุ่งใช้เป็นสารเติมแต่งในผลิตภัณฑ์ของพอลิเมอร์ เช่น พลาสติก ยาง กาวบางประเภท และสี บางครั้งใช้เป็นสารหล่อลื่นในเครื่องมือ เพราะมันสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ และสามารถต้านทานที่อุณหภูมิสูงได้ [7]

ตารางที่ 2.4 สมบัติของน้ำมันละหุ่ง [6]

| | |
|----------------------|-------------------------|
| น้ำหนักโมเลกุล | 298 g.mol ⁻¹ |
| ความหนาแน่น ที่ 25°C | 0.961-0.963 g/mol |
| จุดหลอมเหลว | 5°C |
| จุดเดือด | 313°C |
| จุดแข็งตัว | (-10) - (-18)°C |
| ความหนืด ที่ 20°C | 935-1,033 centipoint |
| ดัชนีหักเห | 1.477-1.479 |
| ค่าความเป็นกรด | 3 |
| ค่า Iodine | 82-88 |
| ค่า Saponification | 179-185 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 กรดไขมันที่สำคัญของน้ำมันละหุ่ง [8-9]

| กรดไขมัน | ปริมาณ (%) |
|-------------------------|------------|
| Ricinoleic acid | 85-95 |
| Oleic acid | 2-6 |
| Linoleic acid | 1-5 |
| α -Linoleic acid | 0.5-1 |
| Palmitic acid | 0.5-1 |
| Stearic acid | 0.5-1 |
| Dihydroxystearic acid | 0.3-0.5 |
| Others | 0.2-0.5 |

2.4 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification reaction)

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน [21] เป็นปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดอินทรีย์ที่มีหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) กับแอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติเป็นกรดเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ประเภทเอสเทอร์ และน้ำ สามารถเขียนสมการทั่วไปของการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน แสดงดังสมการในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

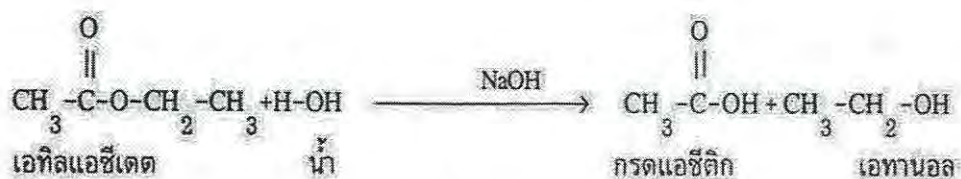
ตัวอย่าง ปฏิกิริยาระหว่างกรดแอสติกกับเอทานอลที่อุณหภูมิสูง โดยมีกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังสมการในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาระหว่างกรดแอสติกกับเอทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

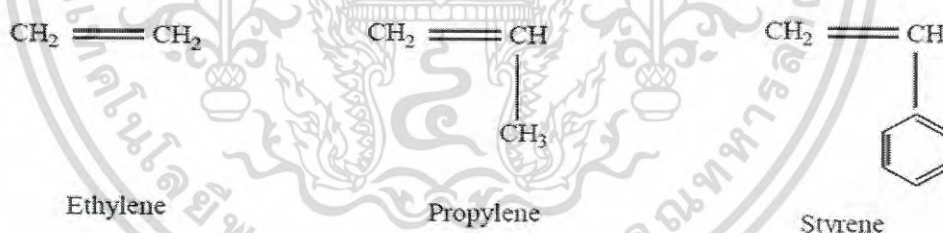
เอสเทอร์สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) แยกออกเป็นกรดคาร์บอกซิลิกและแอลกอฮอล์ เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน โดยมีกรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอทิลแอซิเตต แสดงดังสมการในรูปที่ 2.6



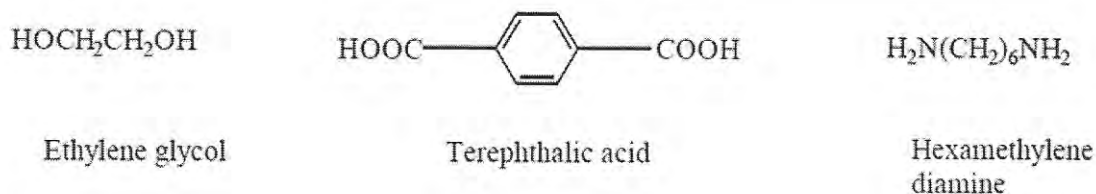
รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอทิลแอซิเตต

2.5 ระบบเชื่อมโยง

ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์มีหลายประเภท แต่โดยทั่วไปจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ ปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ (Chain addition polymerization) และปฏิกิริยาแบบควบแน่นหรือแบบขั้น (Condensation หรือ step growth polymerization) โดยปฏิกิริยาแต่ละประเภทจะเกี่ยวข้องกับสารตั้งต้นมอนอเมอร์ (Monomer) ที่มีโครงสร้างต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งปฏิกิริยาแบบลูกโซ่จะเกิดกับมอนอเมอร์ที่มีพันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอน เช่น เอทิลีน พรอพิลีน และสไตรีน แสดงดังรูปที่ 2.7 ในขณะที่ปฏิกิริยาแบบควบแน่นจะเกิดกับมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันตั้งแต่ 2 หมู่ขึ้นไป เช่น เอทิลีนไกลคอล เฮกซะเมทิลีนไดเอมีน และกรดเทเรพทาติก แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของมอนอเมอร์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ผ่านกลไกแบบลูกโซ่



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของมอนอเมอร์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ผ่านกลไกแบบควบแน่น

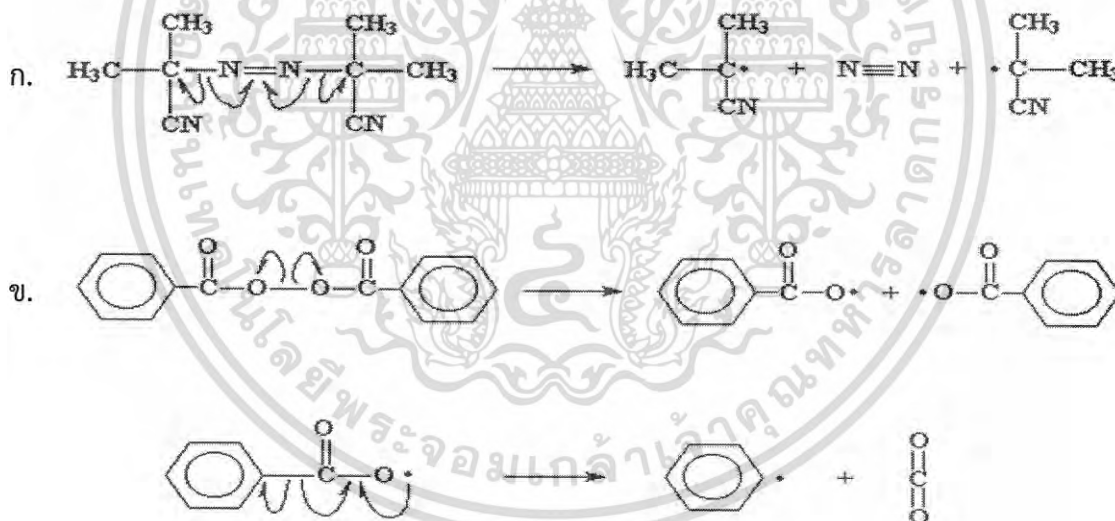
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยกลไกแบบลูกโซ่ โดยเกิดปฏิกิริยาผ่านสารที่ว่องไว (Active specie) ประเภทต่าง ๆ เช่น อนุมูลอิสระ (Free radical) ไอออนลบ (Anion) หรือไอออนบวก (Cation) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ที่เติมลงไป

โดยอนุมูลอิสระเกิดขึ้นได้โดยอาศัยตัวริเริ่มปฏิกิริยาประเภทต่าง ๆ เช่น ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกตัวด้วยความร้อน (Thermal initiator) ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกตัวโดยใช้แสง (Photo initiator) และตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกตัวโดยผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox initiator)

2.5.1 ระบบความร้อน (Thermal)

ในระบบความร้อนตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะมีการแตกตัวด้วยความร้อนมักเป็นสารประกอบประเภทเปอร์ออกไซด์ เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) ไดอะเซทิลเปอร์ออกไซด์ (Diacetyl peroxide) ไดเทอร์เทียรีบิวทิลเปอร์ออกไซด์ (Di-t-butylperoxide) โดยสารเปอร์ออกไซด์เหล่านี้จะเกิดการแตกตัวที่ตำแหน่งพันธะระหว่างออกซิเจนกับออกซิเจน นอกจากนั้นยังมีสารประกอบเอโซ เช่น เอโซบิสไอโซบิวทิลไนไตรล์ (Azobisisobutyronitrile) หรือ AIBN ที่เกิดการแตกตัวที่พันธะระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจนให้อนุมูลอิสระ แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยตัวริเริ่มปฏิกิริยาแต่ละชนิดจะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแตกตัวที่ต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาการแตกตัวของ AIBN (ก) และเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (ข)

ตารางที่ 2.6 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของตัวริเริ่มปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ที่แตกตัว โดยความร้อน

| ชื่อ | อุณหภูมิที่แตกตัว (°C) |
|--------------------------------|------------------------|
| Dibenzoyl peroxide | 40-90 |
| Di-t-butyl peroxide | 80-150 |
| Azo-bisisobutyronitrile (AIBN) | 20-100 |
| Hydrogen peroxide | 30-80 |
| Cumene hydroperoxide | 50-100 |

การแตกตัวของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเหล่านี้มีข้อสังเกตที่สำคัญ 2 ประการ คือ ประการแรก การแตกตัวไม่ได้เกิดขึ้นในเวลาเดียวกันทุกโมเลกุล แต่ปริมาณการแตกตัวจะเพิ่มขึ้นตามเวลาโดยมีค่าครึ่งชีวิต (Half-life) ของการแตกตัวเป็นดัชนีในการบ่งชี้ว่าตัวริเริ่มปฏิกิริยาชนิดใดแตกตัวได้เร็วหรือช้ากว่ากัน โดยถ้าหากค่าครึ่งชีวิตมีค่าน้อยก็แสดงว่าตัวริเริ่มปฏิกิริยานั้น ๆ สามารถแตกตัวได้เร็วจนมีความเข้มข้นลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มข้นที่ใส่ลงไปตอนเริ่มต้นภายในเวลาอันสั้น นอกจากนี้ค่าครึ่งชีวิตของตัวริเริ่มปฏิกิริยาแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาด้วย กล่าวคือถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นก็จะเกิดการแตกตัวได้มากขึ้น และทำให้ค่าครึ่งชีวิตมีค่าลดลง

ข้อสังเกตประการที่สอง อนุมูลอิสระที่เกิดจากการแตกตัวของตัวริเริ่มปฏิกิริยาเหล่านี้จะมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่จะไปทำหน้าที่กระตุ้นมอนอเมอร์ให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นเริ่มต้น โดยอนุมูลอิสระบางส่วนอาจจะเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ทำให้สูญเสียความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไป ซึ่งปฏิกิริยาข้างเคียงเหล่านี้อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Wastage reaction เช่น สารประกอบเบนโซิลเปอร์ออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 2.9 (ข) โดยอนุมูลอิสระของเบนโซิลที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรกสามารถแตกตัวต่อได้เป็นอนุมูลอิสระของฟีนิล และโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งอนุมูลอิสระของฟีนิลที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดการรวมตัวกันเองหรือรวมตัวกับอนุมูลอิสระของเบนโซิลซึ่งทำให้ได้โมเลกุลที่แตกตัวได้ยาก ในทำนองเดียวกันสาร AIBN แสดงดังรูปที่ 2.9 (ก) จะแตกตัวให้อนุมูลอิสระที่สามารถเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้เช่นกัน โดยอนุมูลอิสระคาร์บอนที่เกิดขึ้น 2 ตัวจะจับกันเองได้เป็นโมเลกุลที่แตกตัวได้ยากในสภาวะที่ทำปฏิกิริยา สำหรับกรณีของสารประกอบเปอร์ออกไซด์ชนิดอื่น ๆ เช่น ไดบิวทิลเปอร์ออกไซด์พบว่าอนุมูลอิสระบิวทิลที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวครั้งแรกจะค่อนข้างเสถียรและมีโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงน้อย

อาจกล่าวได้ว่า ตัวริเริ่มปฏิกิริยาประเภทที่แตกตัวโดยความร้อนอาจจะไม่ได้มีประสิทธิภาพในการทำหน้าที่กระตุ้นมอนอเมอร์ได้ทั้ง 100% และจะมีประสิทธิภาพมากน้อยแค่ไหนขึ้นอยู่กับความเสถียรของอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น [22]

2.5.2 ระบบรีดอกซ์ (Redox)

ปฏิกิริยารีดอกซ์ [23] เป็นปฏิกิริยาเกี่ยวกับการถ่ายโอน (ให้-รับ) อิเล็กตรอน แบ่งออกเป็น 2 ครั้งปฏิกิริยา (Half-reaction) คือ

1. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอน ซึ่งสารที่ให้อิเล็กตรอนจะมีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้น เรียกว่า เกิดออกซิเดชัน เช่น Zn เป็นสารที่ให้อิเล็กตรอน เกิดเป็น Zn^{2+} สารที่ให้อิเล็กตรอนเรียกว่า ตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) แสดงดังสมการที่ 2.1

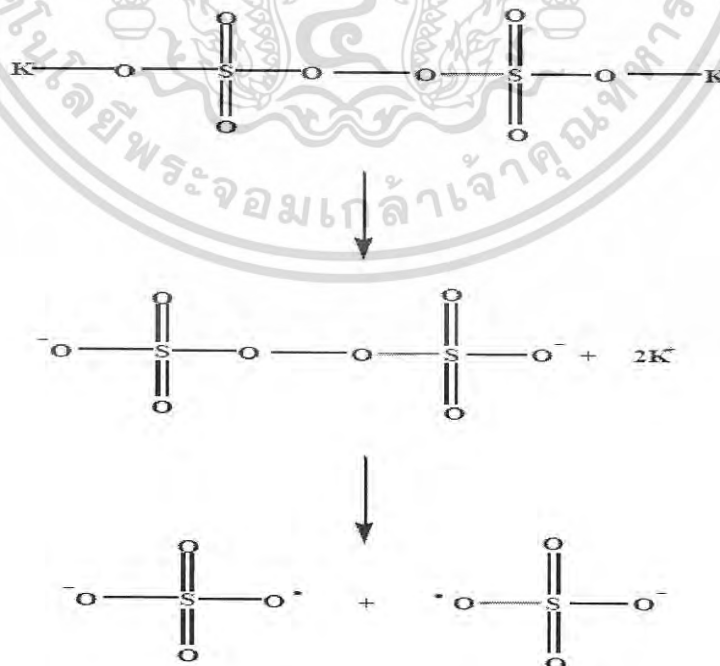


2. ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) เป็นปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน ซึ่งสารที่รับอิเล็กตรอนจะมีเลขออกซิเดชันลดลง เรียกว่า เกิดรีดักชัน เช่น Cu^{2+} เป็นสารที่รับอิเล็กตรอน เกิดเป็น Cu สารที่รับอิเล็กตรอนเรียกว่า ตัวออกซิไดส์ (Oxidizing agent) แสดงดังสมการที่ 2.2



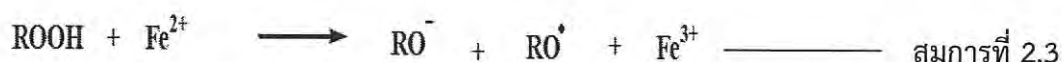
ปฏิกิริยาทั้งสองต้องเกิดขึ้นพร้อมกันเสมอ จึงเรียกปฏิกิริยารวมว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์

ตัวรีดิวซ์ปฏิกิริยาที่แตกตัวโดยผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์ ตัวอย่างของตัวรีดิวซ์ปฏิกิริยาประเภทนี้ได้แก่ สารเปอร์ออกโซไดซัลเฟต เช่น โพแทสเซียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟต ($K_2S_2O_8$) ซึ่งสามารถแตกตัวได้เองที่อุณหภูมิต่ำ ($30^\circ C$) โดยไม่ต้องใช้ร่วมกับตัวรีดิวซ์ แสดงดังรูปที่ 2.10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารโพแทสเซียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟต โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนในกรณีที่ใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา จะต้องใช้ตัวริเริ่ม เช่น Fe^{2+} ร่วมด้วย โดยปฏิกิริยาจะเกิดผ่านการถ่ายเทอิเล็กตรอนจาก Fe^{2+} ไปยังสารประกอบเปอร์ออกไซด์ และทำให้สารประกอบดังกล่าวแตกออกที่พันธะเปอร์ออกไซด์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอนุมูลอิสระ สารประกอบไอออนลบ และ Fe^{3+} แสดงดังสมการที่ 2.3



มีข้อสังเกตว่า ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ส่วนใหญ่จะสามารถละลายได้ในน้ำ ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านวิธีแบบอิมัลชันได้ดี

2.5.3 ระบบฉายแสง (Photochemical)

ในระบบฉายแสงจะเกิดปฏิกิริยาเคมีทางแสง (Photochemical reaction) ที่สภาวะกระตุ้น (Excited state) โดยมีเพียงบางโมเลกุลเท่านั้นที่ได้รับพลังงาน ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาเคมีทางแสงจะเกิดเฉพาะกับโมเลกุลที่ได้รับแสงแล้วจึงเกิดสารผลิตภัณฑ์ อะตอมหรือโมเลกุลที่ได้รับแสงในช่วง Ultraviolet (UV) หรือช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (Visible) แล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การคายพลังงานออกมาในรูปแสงฟลูออเรสเซนซ์ หรือ เปลี่ยนเป็นพลังงานภายในเพื่อเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น แสดงดังสมการที่ 2.4

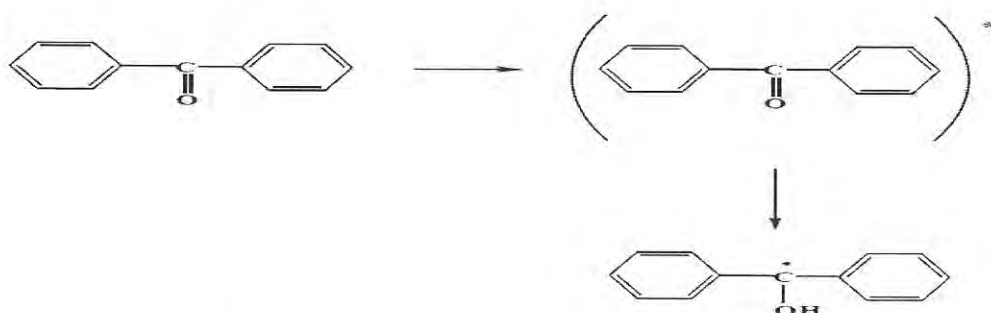


แสงที่มีความยาวคลื่นช่วง : UV – VIS (200-800 nm)

เมื่อ M : อะตอมหรือโมเลกุลในสภาวะพื้น (Ground state)

M^* : อะตอมหรือโมเลกุลในสภาวะกระตุ้น [24]

ตัวอย่างของตัวริเริ่มปฏิกิริยาประเภทนี้ ได้แก่ สารเบนโซฟีโนน (Benzophenone) ซึ่งนิยมใช้เป็น Photo-sensitizer ในปฏิกิริยาเคมีที่ใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นซึ่งสามารถให้อนุมูลอิสระได้ โดยสารดังกล่าวเมื่อได้รับแสงจะถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ในสภาวะกระตุ้น จากนั้นจะกลับคืนสู่สภาวะพื้นในรูปของอนุมูลอิสระ แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบเบนโซฟีโนน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของการใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเหล่านี้ คือ การสังเคราะห์พอลิเมอร์อาจจะสามารถทำได้โดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงเกินไป ซึ่งอาจจะเป็นประโยชน์ในการใช้สังเคราะห์พอลิเมอร์ผ่านมอนอเมอร์บางชนิดที่มีจุดเดือดต่ำ เช่น ไอโซพรีน (จุดเดือดประมาณ 30°C) เป็นต้น [22]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 K. Mikhail [25] ศึกษาสมบัติฟิล์มบางจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ โดยเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยวิธีการ Freezing-thawing นำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 100 กรัมต่อลิตร ละลายในน้ำที่อุณหภูมิ 85-100 องศาเซลเซียส พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้สารละลายเย็นตัวลง เติมนโซเดียมเปอร์ซัลเฟตลงในสารละลายเพื่อเป็นส่วนผสมให้กับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ให้เกิดความคงตัวระหว่าง Freeze-thaw พบว่าเมื่อนำมาทดสอบมุมสัมผัส โดยหยดน้ำกลั่นลงไปบนผิวชิ้นงานเกิดการแยกตัวของหยดน้ำกับผิวชิ้นงาน ซึ่งแสดงถึงสมบัติไม่ชอบน้ำของฟิล์มบางพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

2.6.2 ชมพูนุช ฉันทะจำรัสศิลป์ และคณะ [3] ศึกษา และพัฒนากาวอัดโดยมีองค์ประกอบหลักของเนื้อกาวพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิไวนิลอะซิเตตที่ปรับปรุงด้วยน้ำมันลินสีด และกรดโอเลอิกในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำของกาวอัด โดยนำเนื้อกาวที่เตรียมได้มาผสมน้ำยาไวแสง แล้วปาดลงบนแม่พิมพ์สกรีน ทำการฉายแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นที่เวลาต่าง ๆ นำแม่พิมพ์ไปล้างด้วยน้ำจะปรากฏลายภาพ เมื่อนำมาทดสอบความคงทนเบื้องต้น และความคงทนในสภาวะใช้งาน พบว่ากาวอัดสูตรที่เหมาะสมที่สุด คือ กาวอัดที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างเนื้อกาวพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 5 pph ต่อพอลิไวนิลอะซิเตต เท่ากับ 4:6 และปรับปรุงสมบัติของกาวอัดด้วยน้ำมันลินสีด 4 pph โดยใช้เวลาในการฉายแสงอยู่ในช่วงเวลา 2.5-3.5 นาที พบว่ากาวอัดมีสมบัติต้านทานน้ำดีขึ้น

2.6.3 ณีฐธุดนัย อุณเกษม และคณะ [26] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยน้ำมันชักแห้ง 2 ชนิด คือ น้ำมันทั้ง และน้ำมันละหุ่ง สำหรับเตรียมกาวอัดเยื่อกระดาษ เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานน้ำ และสมบัติเชิงกล โดยกำหนดอัตราส่วนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ต่อ น้ำมันทั้ง ต่อ น้ำมันละหุ่ง เป็น 85:15:0, 82.5:15:2.5 และ 80:15:5 โดยน้ำหนัก ใช้กรดพาราโทลูอินซิลโฟนิคเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โปแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา เมื่อให้ความร้อนทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงพันธะคู่ของน้ำมันชักแห้งทั้งภายในโมเลกุล และระหว่างโมเลกุล เกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ทำให้แผ่นฟิล์มมีสมบัติไม่ชอบน้ำ

2.6.4 S. Tharhate and J. Ngamcharoenthavorn [27] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยกรดโอเลอิก และกรดลิโนเลอิก ร่วมกับน้ำมันลินสีดในการเตรียมกาวไม้เพื่อเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำและสมบัติเชิงกล โดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้น โปแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา และกรดพาราโทลูอินซิลโฟนิคเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดโอเลอิก และกรดลิโนเลอิกที่มีหมู่คาร์บอกซิลกับพอลิไวนิล-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอลกอฮอล์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล และเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงที่ตำแหน่งพันธะคู่ของกรดโอเลอิก และกรดลินโนเลอิก พบว่าสูตรกาวยไม้ที่ให้ผลการทดสอบดีที่สุด คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิไวนิล-แอลกอฮอล์ : กรดโอเลอิก : กรดลินโนเลอิก เป็น 90:5:5 ทำให้สมบัติการต้านทานน้ำ และสมบัติเชิงกลเพิ่มมากขึ้น

2.6.5 J. Suksaeree, C. Luprasong and C. Monton [28] ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปรับปรุงด้วยกรดแลคติก โดยละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในน้ำร้อนจนสารละลายใส แล้วใส่กรดแลคติกที่อุณหภูมิห้อง นำสารผสมที่เตรียมได้มาขึ้นรูปฟิล์ม โดยอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลาต่างกัน จากนั้นนำฟิล์มที่เตรียมได้มาศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวในน้ำที่ pH 2, 4, 7 และ 10 พบว่าฟิล์มมีอัตราการบวมตัวสูงสุดที่ pH 7 และละลายน้ำที่ pH 10 นอกจากนี้ยังพบว่าเวลาในการผสม และเวลาการเชื่อมโยงฟิล์มที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการบวมตัวลดลง เนื่องจากฟิล์มมีความแข็งแรงมากขึ้น น้ำแทรกตัวเข้าไปในชั้นฟิล์มได้น้อยลง

2.6.6 A. Wang, J. Rena, W. Lia, R. Suna and S. Liua. [29] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มวัสดุประกอบพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และไซเลนร่วมกับกรดซิตริก เพื่อเพิ่มสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ การบวมตัว และสมบัติเชิงกล โดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และไซเลนเป็นสารผสม และกรดซิตริกเป็นพลาสติกไซเซอร์หรือสารเชื่อมโยงในการขึ้นรูปฟิล์มวัสดุประกอบ แล้วนำฟิล์มที่ได้มาทดสอบสมบัติต่าง ๆ พบว่าฟิล์มวัสดุประกอบเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง และปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันมากขึ้นทำให้ฟิล์มวัสดุประกอบมีสมบัติซึมผ่านของไอน้ำ การบวมตัว และสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มโดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีปริมาณกรดโอเลอิก 5 pph จากงานวิจัยของชมพูนุช ฉันทะจำรัสศิลป์ และคณะ [3] โดยผสมร่วมกับน้ำมันละหุ่ง โดยใช้ระบบการเชื่อมโยงด้วยวิธีฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น และระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต จากนั้นนำฟิล์มที่ได้มาทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น, ปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่, ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม, สมบัติเชิงกล, มุมสัมผัส, การดูดความชื้น และการซึมผ่านไอน้ำ

149265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol), PVA) : เกรด JP-27 บริษัท ไรส์ซิง ซัน อินเตอร์เนชั่นแนล เทรตติ้ง จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทดลอง

| สมบัติ | JP-27 | หน่วย |
|----------------------|-----------|----------------|
| มวลโมเลกุล | 120,000 | กรัม/โมล |
| ความหนืด | 48-56 | mPa.s |
| ไฮโดรไลซิส | 85.0-87.0 | โมลเปอร์เซ็นต์ |
| ปริมาณการระเหยสูงสุด | 5 | เปอร์เซ็นต์ |
| ค่าความเป็นกรด-ด่าง | 5-7 | - |
| ปริมาณเถ้าสูงสุด | 0.5 | เปอร์เซ็นต์ |

2. กรดโอเลอิก (Oleic acid) : เกรดวิเคราะห้ บริษัท CARLO ERBA REAGENTS จำกัด
3. กรดพาราโทลูอินซัลโฟนิก (p-TSA) : เกรดวิเคราะห้ บริษัท CARLO ERBA REAGENTS จำกัด
4. โซเดียมเปอร์ซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$) : เกรดวิเคราะห้ บริษัท Quality Reagent Chemical จำกัด
5. น้ำมันละหุ่ง (Castor oil) : บริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด
6. น้ำยาไวแสง Methyl orange : เกรดการค้า บริษัท TWINS จำกัด
7. น้ำยาไวแสง Benzophenone : เกรดวิเคราะห้ บริษัท SIGMA-ALORICH จำกัด
- (เตรียมโดยชั่ง Benzophenone 1 กรัม ละลายใน Ethanol 40 มิลลิลิตร จะได้สารละลาย Benzophenone ที่มีความเข้มข้น 1 % w/v)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องแก้ว
2. เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น SI-234 บริษัท Becthai Bangkok Equipment & Chemical Co., Ltd
3. เครื่องให้ความร้อน (Heater) ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG H 57 บริษัท Becthai Bangkok Equipment & Chemical Co., Ltd

4. ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) ยี่ห้อ Peacock รุ่น G-7C บริษัท Ozaki MFG Co., Ltd

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับ (Original Document) ที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัย ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เครื่องทดสอบมุมสัมผัส : รุ่น Contact Angle System OCA, Dataphysics Co., Ltd
6. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) รุ่น LR-5K : LLOYD Instrument Co., Ltd
7. โต๊ะปรับระดับ
8. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermostat)
9. เดซิเคเตอร์
10. Water bath
11. อุปกรณ์ฉายแสงระบบช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (รูปที่ 3.1)
12. อุปกรณ์ฉายแสงระบบอัลตราไวโอเล็ต (รูปที่ 3.2)
13. กรอบสกรีนขนาด $10.8 \times 17 \text{ cm}^2$ และมีความหนาของขอบสกรีนที่ 620 ไมโครเมตร (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ฉายแสงระบบช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ฉายแสงระบบอัลตราไวโอเล็ต



รูปที่ 3.3 กรอบสกรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

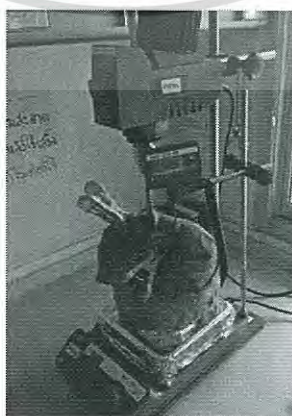
1. ชั่ง Poly(vinyl alcohol) 60 กรัม เติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 600 มิลลิลิตร
2. จากนั้นนำสารไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. เมื่อสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นเนื้อเดียวกัน ตั้งทิ้งไว้ให้สารละลายเย็นตัว และไม่มีฟองอากาศ
4. จะได้สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้น 10 % w/v ที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดใส



รูปที่ 3.4 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

3.4 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ดัดแปร

1. นำสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากข้อ 3.3 ปั่นกวนโดยใช้ความเร็วรอบที่ 700-800 รอบต่อนาที พร้อมกับให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C
2. จากนั้นใส่กรดโอเลอิกที่ความเข้มข้น 5% ของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์
3. ตามด้วยใส่กรดพาราโทลูอินซัลโฟนิก (p-TSA) ที่มีความเข้มข้น 1% ของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ จากนั้นปั่นกวนทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.5 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ดัดแปรด้วยกรดโอเลอิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การเตรียมสูตรฟิล์ม

1. ชั่งส่วนผสมสูตรฟิล์มตามสัดส่วน แสดงดังตารางที่ 3.2
2. ผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก และน้ำมันละหุ่งให้เข้ากัน โดยทำการปั่นกวนความเร็วรอบที่ 700-800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. เติมโซเดียมเปอร์ซัลเฟตลงในสารผสม ปั่นกวนให้เข้ากัน
4. ตั้งสารผสมทิ้งไว้ให้ฟองหาย จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม (กรณีสูตรที่ 1-5)
5. กรณีสูตรที่ 6-9 เติมสารละลาย Methyl orange (MO) (ในอัตราส่วน 1:30 หรือ 1:60 % v/v) ปั่นกวนให้เข้ากัน จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม
6. สูตรฟิล์มที่ 10-13 เติมสารละลาย Benzophenone (BP) ใน Ethanol (ในอัตราส่วน 1:30 หรือ 1:60 % v/v) ปั่นกวนให้เข้ากัน จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม

ตารางที่ 3.2 สูตรฟิล์มที่ศึกษา

| สูตรที่ | ชื่อสูตร | PO (g) | C (g) | ระบบเชื่อมโยง |
|---------|----------|------------|-------|---|
| 1 | PO100 | 100(14.29) | - | - |
| 2 | PO100I | 100(14.29) | - | Na ₂ S ₂ O ₈ |
| 3 | PO99C1I | 99(14.29) | 1(1) | |
| 4 | PO97C3I | 97(14.29) | 3(3) | |
| 5 | PO95C5I | 95(14.29) | 5(5) | |
| 6 | PO100IV | 100(14.29) | - | |
| 7 | PO99C1IV | 99(14.29) | 1(1) | |
| 8 | PO97C3IV | 97(14.29) | 3(3) | |
| 9 | PO95C5IV | 95(14.29) | 5(5) | |
| 10 | PO100IU | 100(14.29) | - | Na ₂ S ₂ O ₈ /BP |
| 11 | PO99C1IU | 99(14.29) | 1(1) | |
| 12 | PO97C3IU | 97(14.29) | 3(3) | |
| 13 | PO95C5IU | 95(14.29) | 5(5) | |

หมายเหตุ :

| | | |
|---|---|---|
| PO | = | พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก |
| C | = | น้ำมันละหุ่ง (Castor oil) |
| I | = | Initiator |
| V | = | Visible light |
| U | = | Ultraviolet light |
| Na ₂ S ₂ O ₈ | = | โซเดียมเปอร์ซัลเฟต |
| () | = | ปริมาณเนื้อสารที่มีในสารละลาย (% w/w) |
| สูตรเติมน้ำยาไวแสง MO | = | Methyl orange |
| สูตรเติมน้ำยาไวแสง BP | = | Benzophenone |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การขึ้นรูปฟิล์ม

1. นำเนื้อสารสูตรต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.2 มาขึ้นรูปฟิล์มบนกรอบสกรีนที่เตรียมไว้ (รูปที่ 3.3) และวางไว้บนขาตั้งปรับระดับ

2. ใช้รางปาดปาดฟิล์ม 1 รอบ ตั้งทิ้งไว้ 10-15 นาที แล้วใช้ลมเย็นเป่าฟิล์มจนแห้ง

3. เมื่อฟิล์มแห้งจะให้ความหนาของฟิล์มอยู่ที่ 35 ± 5 ไมโครเมตรแล้วแบ่งฟิล์มเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

3.1 ระบบไม่ฉายแสง (สูตรที่ 1-5) นำแผ่นฟิล์มไปเก็บในเดซิเคเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 15 ± 5 %RH เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ

3.2 ระบบฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (สูตรที่ 6-9) ปรับเปลี่ยนเวลาเชื่อมโยง 10, 20 นาที และปริมาณน้ำยาไวแสงในอัตราส่วน 1:30 หรือ 1:60 % v/v แล้วนำแผ่นฟิล์มไปเก็บในเดซิเคเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 15 ± 5 %RH เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ

3.3 ระบบฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (สูตรที่ 10-13) ปรับเปลี่ยนเวลาเชื่อมโยง 10, 20 นาที และปริมาณน้ำยาไวแสงในอัตราส่วน 1:30 หรือ 1:60 % v/v นำแผ่นฟิล์มไปเก็บในเดซิเคเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 15 ± 5 %RH เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบ

3.7 การทดสอบ (Testing)

3.7.1 ความหนาของแผ่นฟิล์ม

ใช้ไมโครมิเตอร์วัดแผ่นฟิล์ม 20 จุด แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.7.2 การทดสอบค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น (%Water content (%WC))

1. นำฟิล์มที่มีความหนา 35 ± 5 ไมโครเมตร มาตัดเป็นชิ้นงานตัวอย่างขนาด 2×2 cm² นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนัก (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) จากนั้นนำมาแช่ในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. เมื่อครบเวลานำฟิล์มมากรองผ่านตะแกรงลวด (Sieve) เบอร์ 400 เมช ชั่งน้ำหนักและบันทึกผลการทดลอง

3. คำนวณหาค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น จากสูตร ดังนี้

$$\text{ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น} = \frac{W_w - W_{sd}}{W_{sd}} \times 100$$

โดยที่ W_{sd} = น้ำหนักฟิล์มก่อนแช่น้ำกลั่น

W_w = น้ำหนักฟิล์มหลังแช่น้ำกลั่น

3.7.3 การทดสอบหาปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ (%Solid remain (%SR))

นำฟิล์มหลังจากการแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากข้อ 3.7.2 มาอบที่อุณหภูมิ 60°C แล้วนำฟิล์มแห้งที่ได้จากการอบมาชั่งน้ำหนัก คำนวณค่าจากสูตรนี้

$$\text{ปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่} = \frac{W_{fd}}{W_{sd}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ W_{sd} = น้ำหนักฟิล์มก่อนแช่น้ำกลั่น

W_{fd} = น้ำหนักฟิล์มหลังจากอบแห้ง

3.7.4 การทดสอบหาค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม (%Swelling (%S))

เป็นการทดสอบเพื่อดูปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสุดท้ายของฟิล์มเมื่อเทียบกับฟิล์มหลังอบแห้งที่เวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งคำนวณจากสูตรได้ดังนี้

$$\text{ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มสุดท้าย} = \frac{W_w - W_{fd}}{W_{fd}} \times 100$$

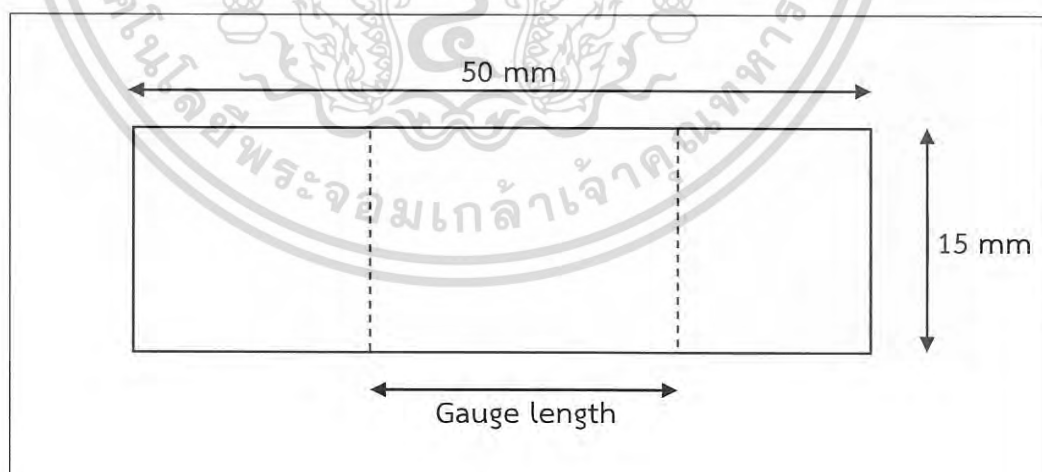
โดยที่ W_w = น้ำหนักฟิล์มหลังแช่น้ำกลั่น (24 ชั่วโมง)

W_{fd} = น้ำหนักฟิล์มหลังจากอบแห้ง

3.7.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ความชื้นสัมพัทธ์ 5% และ 75±15 %RH ด้วยเครื่องทดสอบแรงกดแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D-882 [30] ที่มีสภาวะในการวิเคราะห์ดังนี้

| | | |
|--------------------------------------|---|-----------------------|
| ลักษณะชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด | : | 50x15 mm ² |
| อัตราเร็วในการดึง | : | 50 mm/min |
| Load cell | : | 100 N |
| ความยาวระยะจับชิ้นงาน (Gauge length) | : | 30 mm |
| จำนวนชิ้นงาน | : | 5-9 ชิ้นงาน |



รูปที่ 3.6 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

การทดสอบที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 75±15 %RH สามารถเตรียมได้โดยใช้ NaCl 34.9 กรัมละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำมาใส่ในเดซิเคเตอร์ และนำฟิล์มที่เตรียมได้มาเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ เป็นเวลา 1 สัปดาห์ แล้วจึงนำไปทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด ค่าYoung's modulus และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)} = \frac{F}{A} \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

$$\text{มอดูลัสยัง (Young's modulus)} = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}} \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

$$\text{ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)} = \frac{l-l_0}{l_0} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.3}$$

เมื่อ F = แรงดึงยืดขึ้นงาน ณ จุดขาด

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)

L = ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด

l_0 = ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานก่อนดึงชิ้นงาน (Gauge length) 30 mm

*หมายเหตุ ค่าYoung's modulus คำนวณจากค่าความชันเริ่มต้น (ที่ 1-2% การดึงยืด)

3.7.6 การทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle)

นำแผ่นฟิล์มมาทำการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำกลั่นบนพื้นผิวชิ้นงาน โดยหยดน้ำกลั่นปริมาณ 2 μL บนที่กค่ามุมสัมผัส เมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที วัดมุมที่หยดน้ำกลั่นกระทำกับผิววัสดุด้วยเครื่อง Contact angle system OCV ตามมาตรฐาน ASTM D 5946 [31]

3.7.7 การทดสอบการดูดความชื้น (Moisture uptake)

ตัดชิ้นงานของฟิล์มขนาดกว้าง $2 \times 2 \text{ cm}^2$ นำไปอบในตู้สุญญากาศที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปชั่งน้ำหนักเป็น m_0

จากนั้นนำไปเก็บในเดซิเคเตอร์ที่มีสารละลายอิ่มตัวโซเดียมคลอไรด์ (ความชื้นสัมพัทธ์ 75% RH) เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วทำการชั่งน้ำหนักเป็น m_t ค่าการดูดความชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Moisture uptake} = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100$$

3.7.8 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability (WVP))

1. นำแคลเซียมคลอไรด์ประมาณ 10 กรัม มาอบที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บในเดซิเคเตอร์ (ความชื้นสัมพัทธ์ 0 %)

2. นำฟิล์มที่ต้องการทดสอบไปคลุมด้านบนปากแก้วรีซีมม้อย่างน้อย 3.2 เซนติเมตร โดยภายในแก้วบรรจุด้วยแคลเซียมคลอไรด์ประมาณ 10 กรัม (ความชื้นสัมพัทธ์ 0 %) จากนั้นเก็บในเดซิเคเตอร์ (ความชื้นสัมพัทธ์ 75 %)

3. นำฟิล์มมาชั่งน้ำหนักทุก ๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 7 วัน แล้วบันทึกผล และทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งสำหรับฟิล์มแต่ละสูตร

4. นำผลการทดสอบมาพลอตกราฟเป็นฟังก์ชันของเวลา และหา Slope จากกราฟ

สามารถคำนวณสมการได้จาก

$$WVTR = \frac{G}{tA}$$

โดยที่

- G = น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (g)
- t = เวลา (h)
- G/t = ความชันของกราฟ (g/h)
- A = พื้นที่ปากแก้ว (cm²)
- WVTR = อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (g/h*cm²)

5. นำค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำไปแทนค่า เพื่อคำนวณหาค่าการซึมผ่านไอน้ำ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Water vapor permeability} = \frac{WVTR}{S(R_1 - R_2)} \times L$$

โดย

- WVTR = อัตราการซึมผ่านไอน้ำ (g/h*cm²)
- S = ค่าความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิในเดซิเคเตอร์ (Pa)
- R₁ = ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในโลที่ 75%
- R₂ = ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในขวดที่ 0%
- L = ความหนาเฉลี่ยแผ่นฟิล์ม (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

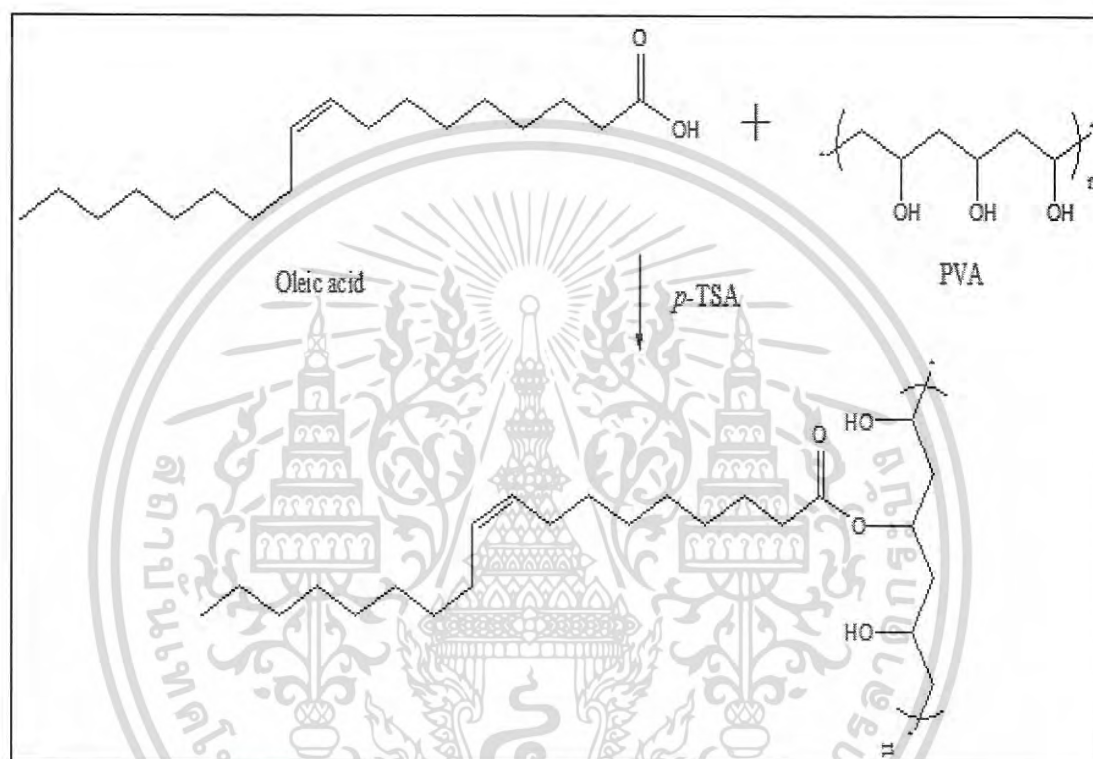
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มที่มีองค์ประกอบของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงสมบัติด้วยกรดโอเลอิก (PO) (ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน แสดงดังรูปที่ 4.1) และน้ำมันละหุ่ง (C) โดยสูตรฟิล์มมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก (PO) ต่อน้ำมันละหุ่ง (C) เป็น 100 : 0, 99 : 1, 97 : 3, 95 : 5 โดยน้ำหนัก การเตรียมสูตรฟิล์มทำโดยผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก และน้ำมันละหุ่งด้วยการใช้เครื่องปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 700 รอบต่อนาที และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C จากนั้นนำมาเชื่อมโยงโดยมีวิธีการเชื่อมโยงฟิล์ม 3 ระบบด้วยกัน คือ ระบบที่ไม่ฉายแสง, ระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น และระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ การทดสอบค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น, การทดสอบหาปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่, การทดสอบหาปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มสุดท้าย, การทดสอบสมบัติเชิงกล, การทดสอบมุมสัมผัส, การทดสอบการดูดความชื้น และการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ โดยกำหนดสัญลักษณ์ของสูตรฟิล์ม ดังนี้

- PO100 คือ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุง 100 กรัม ระบบที่ไม่ฉายแสง
- PO100I คือ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุง 100 กรัม โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 0.1 กรัม ระบบที่ไม่ฉายแสง
- PO99C1I คือ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุง 99 กรัม น้ำมันละหุ่ง 1 กรัม โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 0.1 กรัม ระบบที่ไม่ฉายแสง
- PO97C3I คือ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุง 97 กรัม น้ำมันละหุ่ง 3 กรัม โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 0.1 กรัม ระบบที่ไม่ฉายแสง
- PO95C5I คือ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุง 95 กรัม น้ำมันละหุ่ง 5 กรัม โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 0.1 กรัม ระบบที่ไม่ฉายแสง
- PO100IV คือ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุง 100 กรัม โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 0.1 กรัม ระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น
- PO99C1IV คือ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุง 99 กรัม น้ำมันละหุ่ง 1 กรัม โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 0.1 กรัม ระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น
- PO97C3IV คือ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุง 97 กรัม น้ำมันละหุ่ง 3 กรัม โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 0.1 กรัม ระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น
- PO95C5IV คือ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุง 95 กรัม น้ำมันละหุ่ง 5 กรัม โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 0.1 กรัม ระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น
- PO100IU คือ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุง 100 กรัม โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 0.1 กรัม ระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- PO99C1IU คือ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุง 99 กรัม น้ำมันละหุ่ง 1 กรัม โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 0.1 กรัม ระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงอัลตราไวโอเลต
- PO97C3IU คือ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุง 97 กรัม น้ำมันละหุ่ง 3 กรัม โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 0.1 กรัม ระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงอัลตราไวโอเลต
- PO95C5IU คือ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุง 95 กรัม น้ำมันละหุ่ง 5 กรัม โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 0.1 กรัม ระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงอัลตราไวโอเลต



รูปที่ 4.1 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และกรดโอเลอิก

4.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม

4.1.1 ความหนาของแผ่นฟิล์ม

ทำการผสมสูตรฟิล์มตามสูตรที่ศึกษา โดยเครื่องปั่นกวนพร้อมกับการให้ความร้อน ตามสูตรดังตารางที่ 3.2 โดยฟิล์มทุกสูตรมีการควบคุมความหนาที่ 35 ± 5 ไมโครเมตร

4.1.2 ความใสของแผ่นฟิล์ม

ทำการผสมสูตรฟิล์มตามสูตรที่ศึกษา โดยเครื่องปั่นกวนพร้อมกับการให้ความร้อน ตามสูตรดังตารางที่ 3.2 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 4.2 โดยแต่ละสูตรมีความใสแตกต่างกัน แบ่งเป็น 3 กลุ่มดังนี้

กลุ่มฟิล์มสูตรที่เนื้อฟิล์มมีความขุ่น และโปร่งแสง ได้แก่ สูตร PO100, PO100I, PO99CI, PO97C3I และ PO95C5I

กลุ่มฟิล์มสูตรที่เนื้อฟิล์มมีความขุ่นอมเหลือง เนื่องจากการเติมเมทิลออร์แกนิกไปนในสูตรฟิล์ม และมีความโปร่งแสง ได้แก่ สูตร PO100IV, PO99C1IV, PO97C3IV และ PO95C5IV

กลุ่มฟิล์มสูตรที่เนื้อฟิล์มมีความขุ่น เกิดฟองอากาศกระจายบนแผ่นฟิล์มทำให้ไม่เรียบ และที่ผิวมีความมัน เนื่องจากเบนโซฟีโนนผสมกับสูตรฟิล์มเกิดการแยกชั้นกัน และมีความโปร่งแสง ได้แก่ สูตร PO100IU, PO99C1IU, PO97C3IU และ PO95C5IU

จากลักษณะทางกายภาพของฟิล์มสูตรต่าง ๆ พบว่าฟิล์มสูตรที่มี IU เกิดฟองอากาศขึ้นบนแผ่นฟิล์ม ทำให้ฟิล์มไม่เรียบ จึงไม่นำมาทดสอบในขั้นตอนต่อไป



a) PO100



b) PO100I



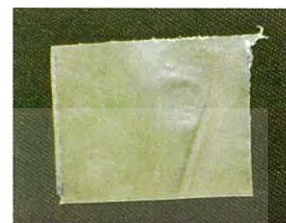
c) PO99C1I



d) PO97C3I



e) PO95C5I



f) PO100IV



g) PO99C1IV



h) PO97C3IV



i) PO95C5IV



j) PO100IU



k) PO99C1IU



l) PO97C3IU



m) PO95C5IU

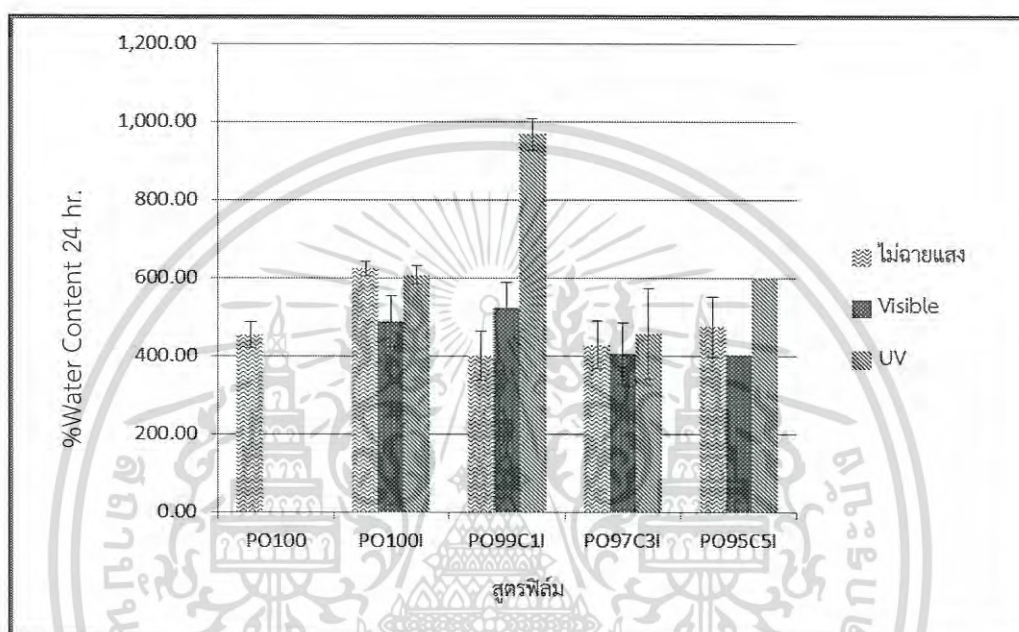
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างฟิล์มที่เตรียมได้ความหนา 35 ± 5 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

4.2.1 ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น (%Water content (%WC))

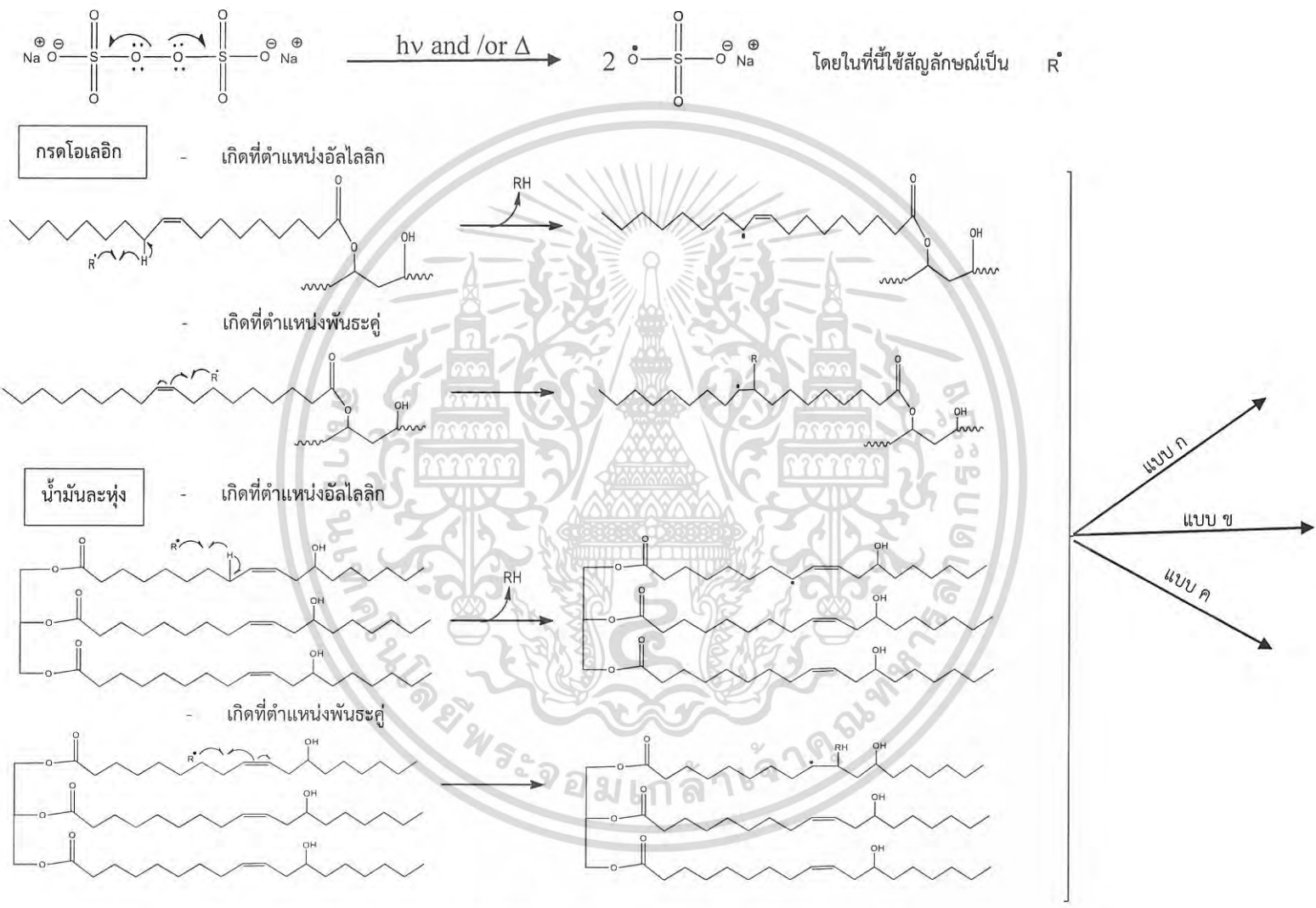
จากการทดสอบหาค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น โดยนำฟิล์มไปแช่น้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และวัดค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น พบว่าฟิล์มทุกสูตรสามารถคงรูปเป็นฟิล์มอยู่ได้หลังการทดสอบที่ 24 ชั่วโมง ข้อมูลเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้นที่ 24 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้นที่ 24 ชั่วโมง

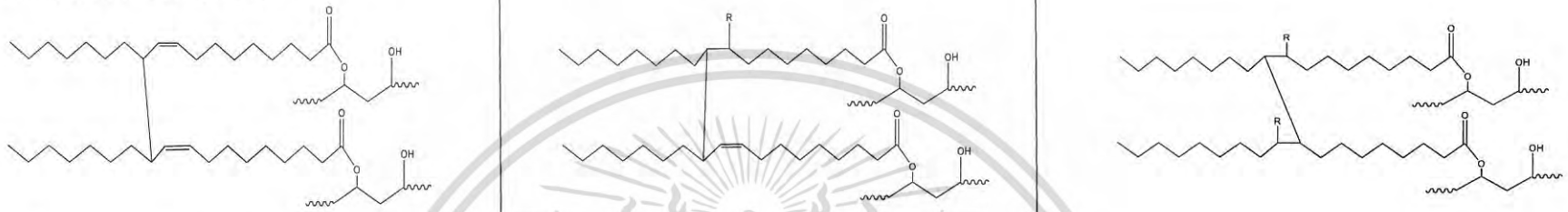
จากรูปที่ 4.3 พบว่าฟิล์มสูตร PO100I สามารถต้านทานน้ำได้ระดับหนึ่ง ซึ่งคาดว่าในขั้นตอนการเตรียมสูตรฟิล์มที่เติมโซเดียมเปอร์ซัลเฟตมีการนำไปปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แรงเฉือนจากการปั่นกวนอาจทำให้เกิดความร้อนขึ้น ทำให้โซเดียมเปอร์ซัลเฟตแตกตัวทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งตำแหน่งอัลลิลหรือพันธะคู่เกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล แสดงดังรูปที่ 4.4 (แบบ ก) นอกจากนี้ยังสามารถเกิดอันตรกิริยาที่ตำแหน่งหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ดังรูปที่ 4.5 (ก) และจากการปรับปรุงโครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยกรดโอเลอิก ส่งผลให้ฟิล์มมีขั้วลดลง ส่วนฟิล์มสูตรที่ใช้ระบบเชื่อมโยงฉายแสง และปรับปรุงด้วยน้ำมันละหุ่งให้ค่าการทดสอบไม่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้น ฟิล์มสูตร PO99C1IU ให้ค่าการทดสอบสูงสุด เนื่องมาจากฟิล์มอาจเกิดการเชื่อมโยงได้มากขึ้น เนื้อฟิล์มไม่ละลายออกมา ทำให้กักเก็บปริมาณน้ำในเนื้อฟิล์มได้มาก อย่างไรก็ตามการใช้ข้อมูลปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้นเพียงอย่างเดียวในการเปรียบเทียบผลการต้านทานน้ำนั้นมีข้อจำกัด เนื่องจากสูตรฟิล์มที่เตรียมได้มีการละลายออกของเนื้อฟิล์มบางส่วน ทำให้ปริมาณเนื้อฟิล์มคงเหลือในแต่ละสูตรไม่เท่ากันส่งผลให้ปริมาณน้ำในเนื้อฟิล์มมีความคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นจึงทำการทดลองหาค่าปริมาณของแข็งคงเหลือหลังการแช่น้ำที่ 24 ชั่วโมง และนำค่าดังกล่าวไปหาค่าปริมาณน้ำเทียบกับเนื้อฟิล์มคงเหลือ ซึ่งจะ

กล่าวไว้ในหัวข้อถัดไปไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

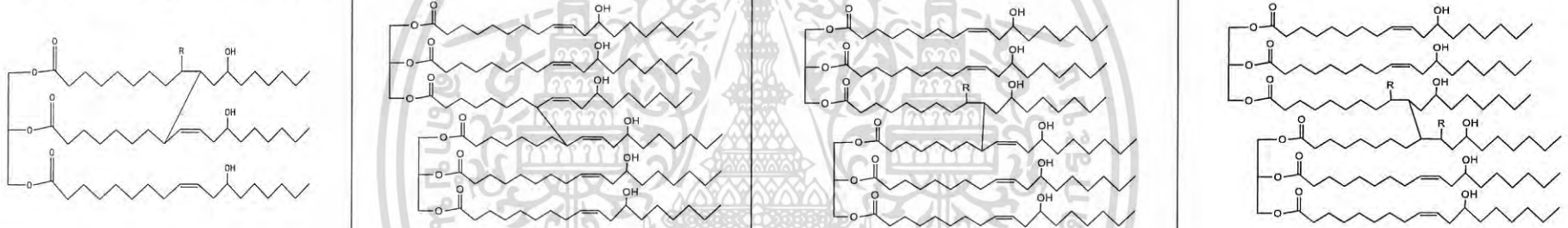


รูปที่ 4.4 โซเดียมเปอร์ซัลเฟตแตกตัวทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งอัลไลลิกหรือพันธะคู่ของกรดโอเลอิก และน้ำมันละหุ่ง

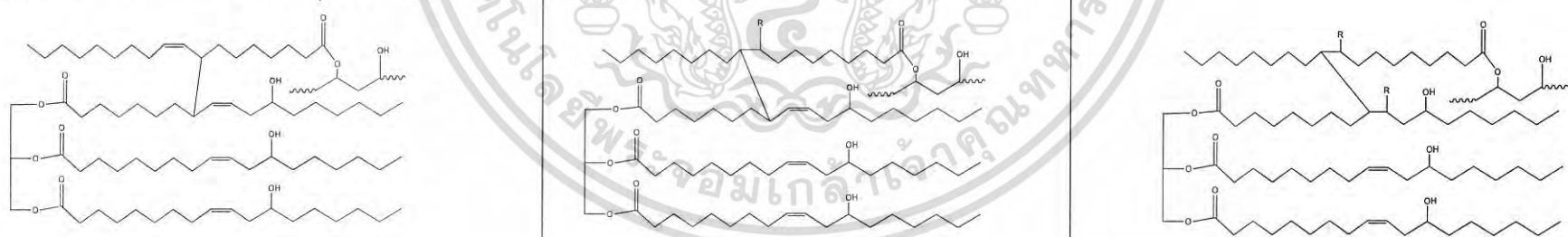
แบบ ก กรดโอเลอิกเชื่อมโยงกัน



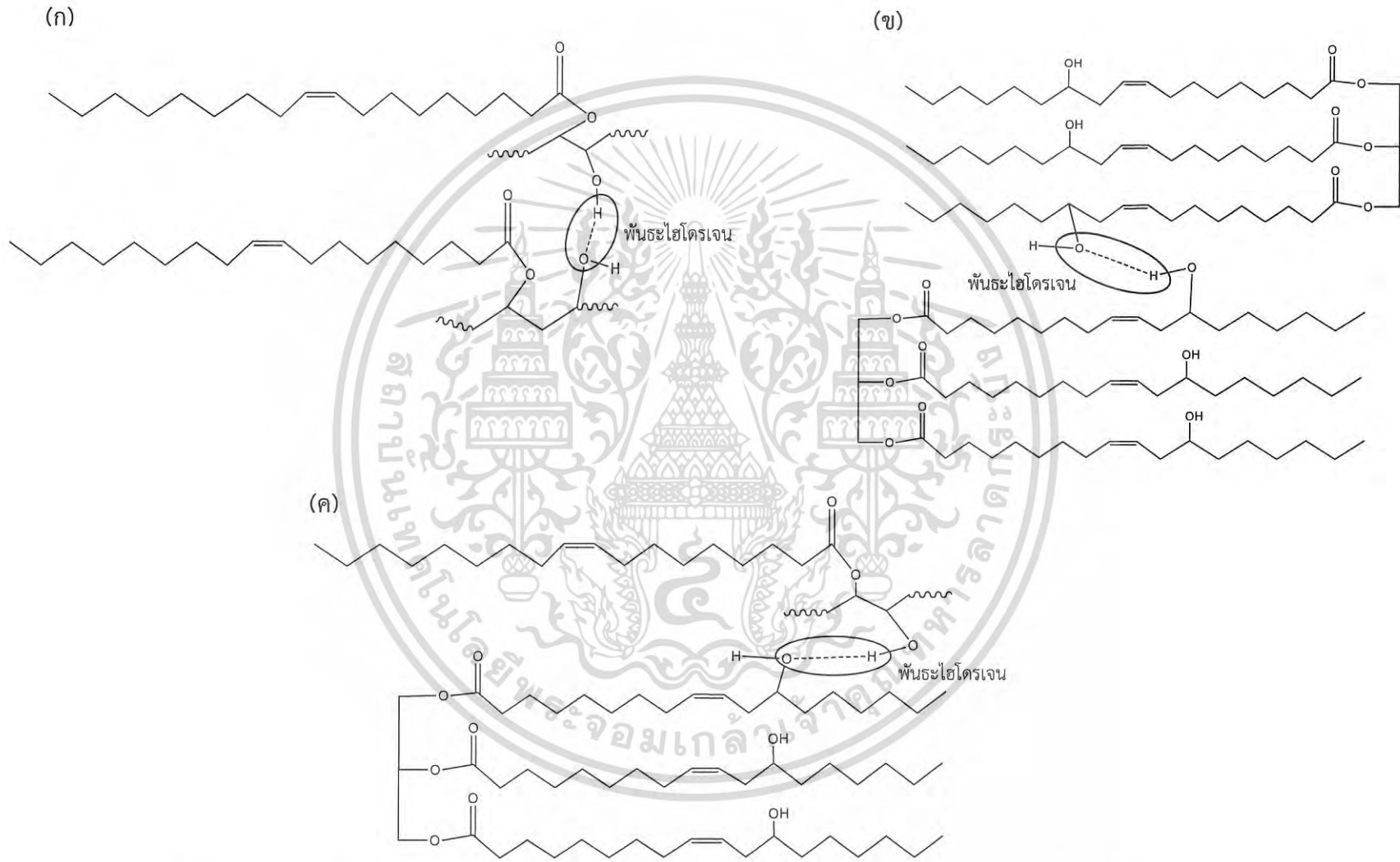
แบบ ข น้ำมันละหุ่งเชื่อมโยงกัน



แบบ ค กรดโอเลอิกกับน้ำมันละหุ่งเชื่อมโยงกัน



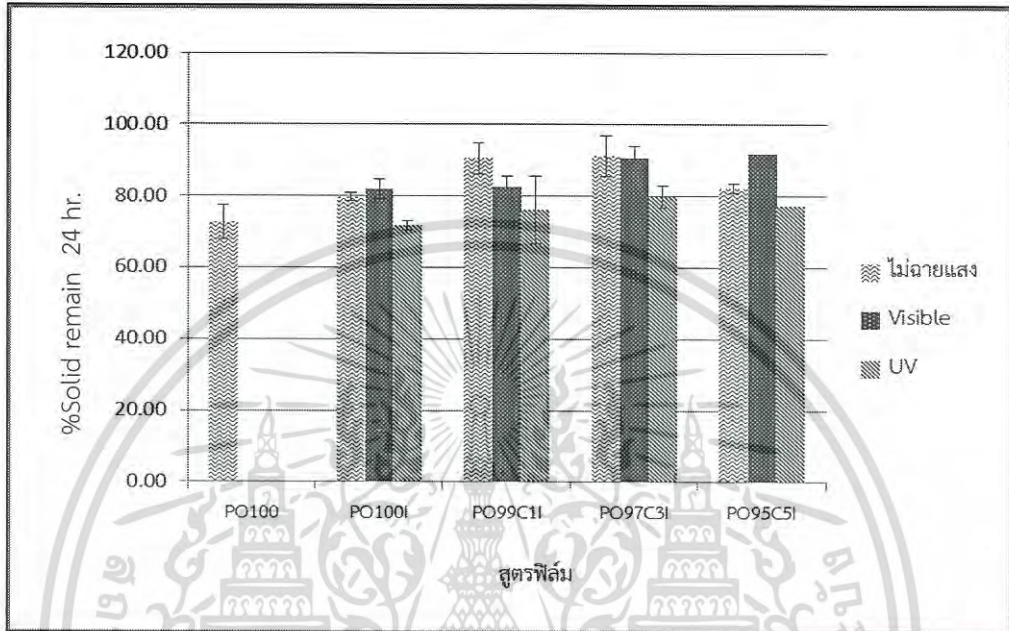
รูปที่ 4.4 โซเดียมเปอร์ซัลเฟตแตกตัวทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งอัลลิลิกหรือพันธะคู่ของกรดโอเลอิก และน้ำมันละหุ่ง (ต่อ)



รูปที่ 4.5 อันตรกิริยาที่ตำแหน่งหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์หรือน้ำมันละหุ่ง

4.2.2 ปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ (%Solid remain (%SR))

ปริมาณของแข็งคงเหลือสามารถหาได้โดยนำสูตรฟิล์มต่าง ๆ ไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบจนน้ำหนักฟิล์มคงที่ นำฟิล์มที่ได้มาคำนวณผลโดยใช้สูตร ดังแสดงในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.7.3 ค่าปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ค่าปริมาณของแข็งคงเหลือหลังแช่น้ำกลั่น 24 ชั่วโมง

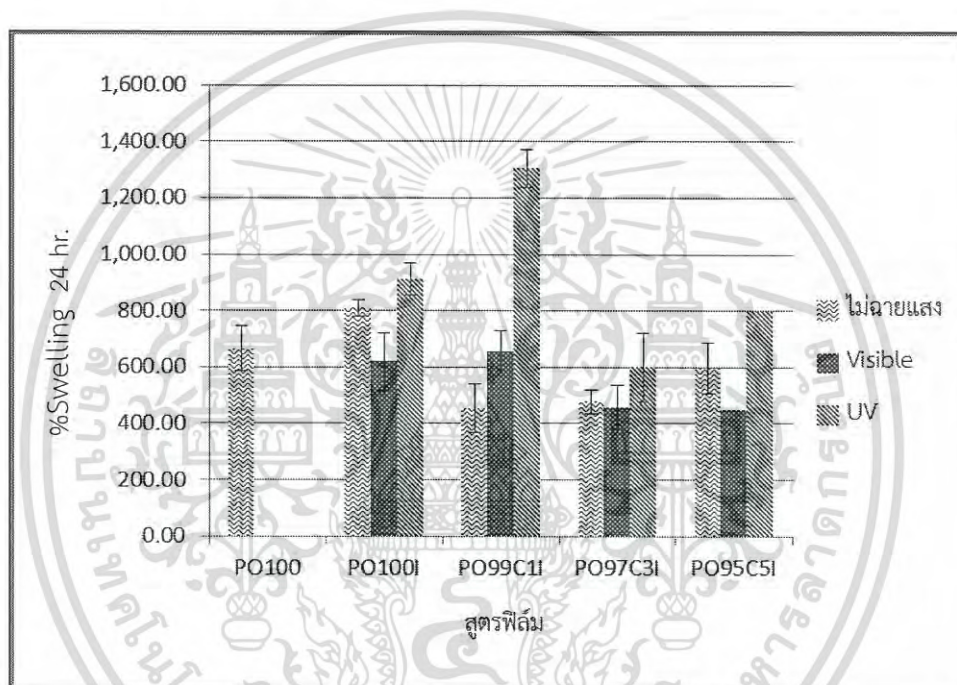
จากรูปที่ 4.6 ฟิล์มสูตร PO100I ที่มีการปรับปรุงโดยการใส่ตัวริเริ่ม ใช้ระบบเชื่อมโยงแบบไม่ฉายแสง และเชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น พบว่าค่าปริมาณของแข็งคงเหลือมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย คาดว่ามาจากกลไกการเชื่อมโยง 2 ระบบ คือ 1) การเชื่อมโยงที่ตำแหน่งอัลไลค (Allylic) หรือพันธะคู่ของกรดโอเลอิก แสดงดังรูปที่ 4.4 (แบบ ก) 2) การเชื่อมโยงพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ กับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ แสดงดังรูปที่ 4.5 (ก) เมื่อมีการเติมน้ำมันละหุ่งในสูตรฟิล์มที่เชื่อมโยงทั้ง 2 ระบบ พบว่าค่าปริมาณของแข็งคงเหลือมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำมันละหุ่งที่เพิ่มขึ้น 1 และ 3 ส่วน เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่งพันธะคู่หรือตำแหน่งอัลไลคของน้ำมันละหุ่งกับส่วนของกรดโอเลอิกในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ แสดงดังรูปที่ 4.4 (แบบ ข และค) แต่เมื่อปริมาณน้ำมันละหุ่งเพิ่มขึ้นเป็น 5 ส่วนในกรณีระบบเชื่อมโยงแบบไม่ฉายแสง (สูตร PO95C5I) พบว่าค่าปริมาณของแข็งไม่ต่างจากสูตร PO100 ซึ่งอาจจะมาจากปริมาณน้ำมันละหุ่งที่มาก ทำให้การผสมเข้ากันกับเนื้อฟิล์มไม่ดีพอ และไม่มีการเชื่อมโยงที่ดีพอ จึงเกิดจุดบกพร่องภายในชิ้นงาน แต่สูตรที่ใช้ระบบเชื่อมโยงแบบฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (สูตร PO95C5IV) พบว่าค่าปริมาณของแข็งคงเหลือไม่ได้ลดต่ำลง โดยมีค่าใกล้เคียงกับสูตร PO97C3IV เนื่องจากมีระบบการเชื่อมโยงที่มีประสิทธิภาพกว่าแบบไม่ฉายแสง น้ำมันละหุ่งจึงถูกเชื่อมโยง และกระจายตัวภายในโครงสร้างของฟิล์มได้ดี ในขณะที่สูตรฟิล์มที่เชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต มีค่าปริมาณของแข็งคงเหลือไม่แตกต่างจากสูตร PO100 เนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่มีฟองอากาศกระจายบนเนื้อฟิล์ม และที่ผิวมีความมัน จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้กับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้พิมพ์ไปขอประโยชน์อื่นใด การนำ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไม่เข้ากันของเบนโซฟีโนนกับเนื้อฟิล์มและเกิดการแยกชั้น ทำให้เกิดจุดบกพร่องขึ้นบนเนื้อฟิล์ม โดยสูตรฟิล์มทั้งแบบที่มีการปรับปรุงโดยการใส่ตัวริเริ่ม (PO100IU) และสูตรที่มีน้ำมันละหุ่ง (PO99C1IU, PO97C3IU และ PO95C5IU) ให้ค่าปริมาณของแข็งคงเหลือไม่แตกต่างกัน และใกล้เคียงกับสูตร PO100

4.2.3 ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม (%Swelling (%S))

จากข้อมูลปริมาณของแข็งคงเหลือนำมาคำนวณ เพื่อหาปริมาณน้ำที่มีอยู่ในฟิล์มหลังแช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เทียบกับฟิล์มหลังอบแห้งที่เวลา 24 ชั่วโมง นำฟิล์มที่ได้มาคำนวณผลโดยใช้สูตร ดังแสดงในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.7.4 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มสุดท้าย แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มภายหลังแช่น้ำกลั่น 24 ชั่วโมง

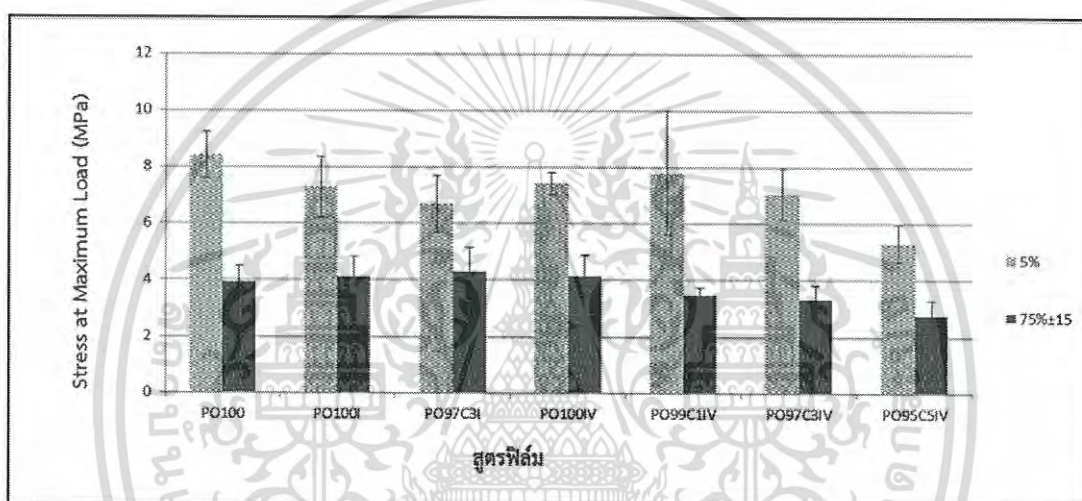
จากรูปที่ 4.7 พบว่าสูตรฟิล์มที่เชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตมีค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูงสุด โดยบางสูตรมีค่าที่สูงกว่าสูตรฟิล์ม PO100 เนื่องจากอาจมีการเชื่อมโยงได้ไม่ดี แสดงถึงการกระจายตัวของเบนโซฟีโนนกับน้ำมันละหุ่งที่ไม่ดีพอทำให้เกิดจุดบกพร่องบนเนื้อฟิล์ม แต่สูตรฟิล์มที่เชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นมีค่าการบวมตัวต่ำกว่าสูตร PO100 โดยเฉพาะอย่างยิ่งสูตรที่มีปริมาณน้ำมันละหุ่งมากขึ้น สำหรับสูตรฟิล์มที่เชื่อมโยงด้วยระบบไม่ฉายแสง มีปริมาณน้ำมันละหุ่งเป็นส่วนผสมให้ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มต่ำกว่าสูตร PO100 เช่นกัน แสดงถึงความสามารถในการเชื่อมโยงที่มีประสิทธิภาพกว่าสูตร PO100 เมื่อมีน้ำมันละหุ่งเป็นองค์ประกอบ แสดงถึงการเชื่อมโยงที่มีประสิทธิภาพกว่าระบบอื่น แต่สูตร PO100I มีค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูงกว่าสูตร PO100 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะโครงสร้างกิ่งของกรดโอเลอิก ซึ่งมีความเกาะก่ทำให้ปริมาณพันธะไฮโดรเจนลดลง น้ำจึงแทรกเข้าไปในโครงสร้างได้ง่าย แม้ว่าฟิล์มจะมีความเป็นขี้ลลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม

นำฟิล์มไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal testing machine ตามมาตรฐาน ASTM D-882 ได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และค่า Young's Modulus โดยมีปัจจัยในการศึกษา 2 สภาวะ ได้แก่ ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 5 และ 75±15 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้น สูตรฟิล์มที่มีการเชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต เนื่องจากการกระจายตัวของเบนโซฟีโนนกับน้ำมันละหุ่งที่ไม่ดีพอทำให้เกิดจุดบกพร่องบนเนื้อฟิล์ม ส่งผลให้ฟิล์มมีการเชื่อมโยงที่ไม่ดีพอจึงไม่ได้นำมาทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม

4.3.1 ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 5 และ 75±15%



รูปที่ 4.8 ความแข็งแรงดึงสูงสุดก่อนขึ้นงานฉีกขาดของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

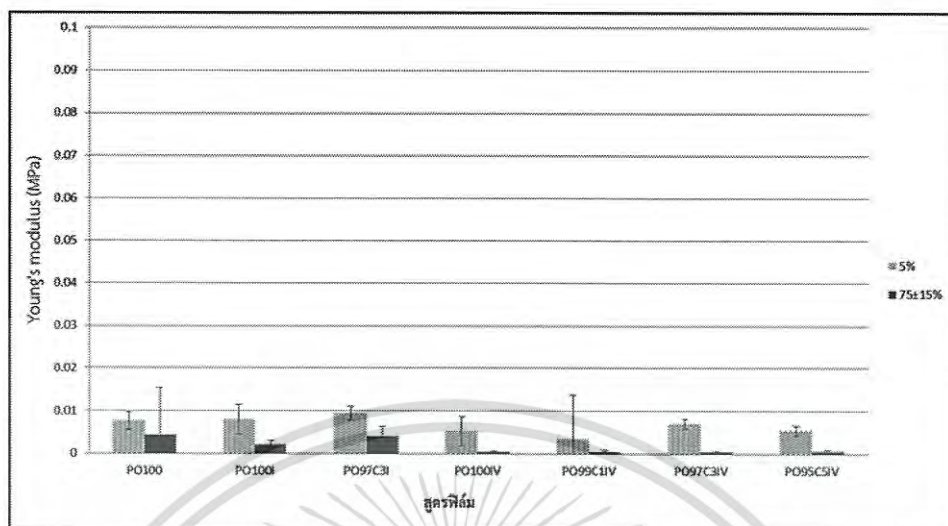
จากรูปที่ 4.8 พบว่าสูตรฟิล์มทุกสูตรที่เก็บฟิล์มไว้ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 5% ก่อนการทดสอบมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดไม่แตกต่างกันมากนัก โดยค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณน้ำมันละหุ่งในเนื้อฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลในเนื้อฟิล์มมากขึ้น ทำให้ชิ้นงานมีความเปราะและขาดได้ง่าย

แต่ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 75% ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่าต่ำลงในทุกสูตรเมื่อเทียบกับสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 5% เนื่องจากภายในฟิล์มมีน้ำทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์แทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของเนื้อฟิล์มทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอ่อนลง สำหรับสูตรฟิล์มที่เชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสงมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดค่อนข้างคงที่ เนื่องจากการเชื่อมโยงภายในฟิล์มน้อย น้ำจึงสามารถแทรกซึมเข้าสู่เนื้อฟิล์มได้ง่าย

สำหรับสูตรฟิล์มที่เชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณน้ำมันละหุ่งในเนื้อฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น ฟิล์มจึงมีการเชื่อมโยงมากขึ้น ทำให้น้ำเข้าไปแทรกซึมในเนื้อฟิล์มได้น้อยลง ฟิล์มจึงมีสมบัติที่เปราะกว่าฟิล์มที่มีการเชื่อมโยงต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

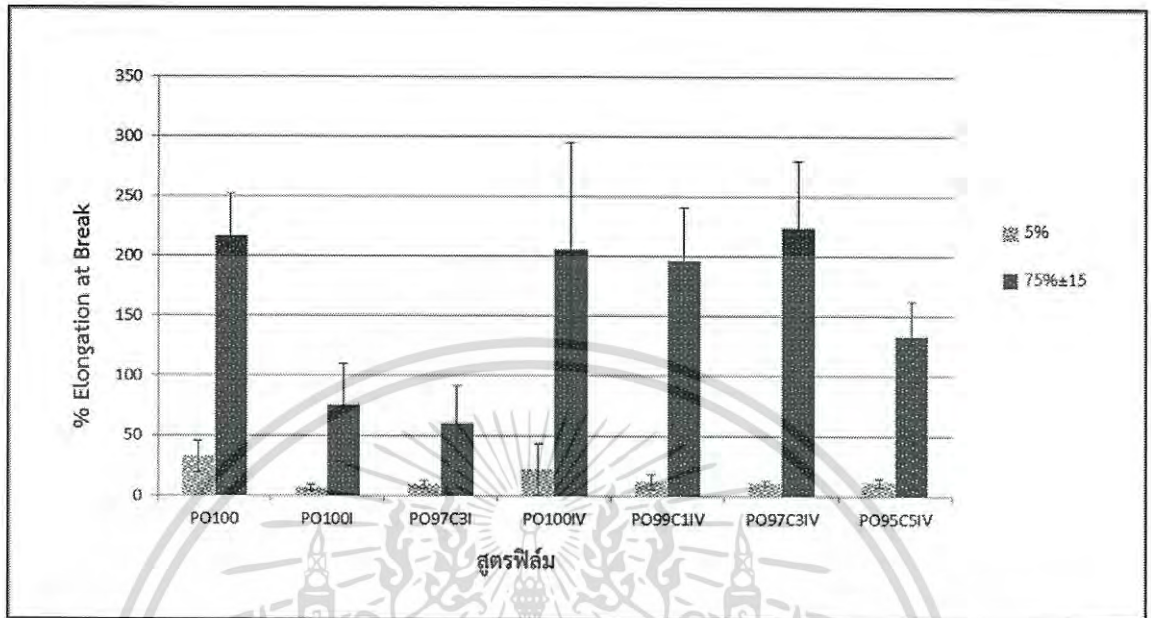
4.3.2 ย้ังมอดุลัส (Young's modulus) ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 5 และ 75±15%



รูปที่ 4.9 ค่าย้ังมอดุลัสของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.9 พบว่าที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 5% ค่าย้ังมอดุลัสของฟิล์มทุกสูตร ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 75% ค่าย้ังมอดุลัสของฟิล์มทุกสูตรมีค่าลดลงเล็กน้อยโดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 5% โดยค่าย้ังมอดุลัสของฟิล์มแต่ละสูตรมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ผลของปริมาณน้ำมันละหุ่ง และระบบการเชื่อมโยงไม่มีผลต่อค่าย้ังมอดุลัส

4.3.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 5 และ 75±15%

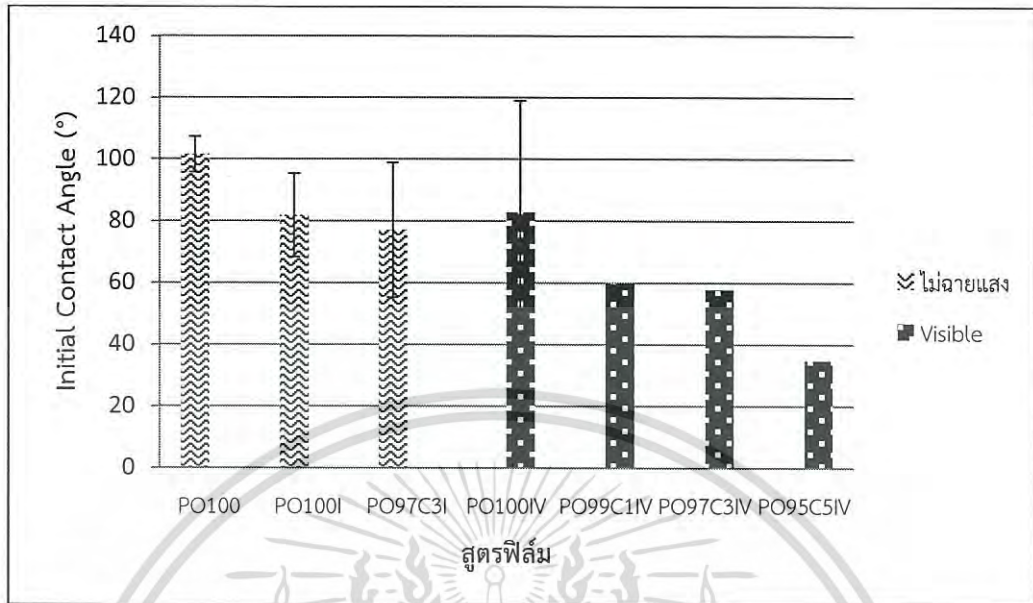


รูปที่ 4.10 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.10 พบว่าสูตรฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่เก็บไว้ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 5% มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดค่อนข้างต่ำประมาณ 5-20% แสดงถึงสมบัติที่ค่อนข้างเปราะของฟิล์มทุกสูตร ซึ่งอาจเป็นเพราะความไม่เข้ากันของสารต่าง ๆ ในเนื้อฟิล์ม ทำให้สารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปเป็นจุดบกพร่องในเนื้อฟิล์ม ทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำ และเมื่อฟิล์มมีการเชื่อมโยง พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง เนื่องจากผลของการเชื่อมโยงทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่เมื่อถูกแรงกระทำถูกจำกัดมากขึ้น

แต่ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 75% ฟิล์มทุกสูตรมีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 5% เนื่องจากน้ำที่แทรกอยู่ภายในเนื้อฟิล์มทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ จึงทำให้เนื้อฟิล์มมีความยืดหยุ่น โมเลกุลภายในเนื้อฟิล์มเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นเมื่อถูกแรงกระทำ สำหรับสูตรฟิล์มที่ไม่ได้เชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสงมีแนวโน้มค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง อาจเป็นเพราะความไม่เข้ากันของสารเติมแต่งในเนื้อฟิล์ม เมื่อน้ำแทรกเข้าไปในเนื้อฟิล์มทำให้สารเติมแต่งในเนื้อฟิล์มแยกตัวออกจากเนื้อพอลิเมอร์ได้ง่าย เนื่องจากมีพันธะเชื่อมโยงภายในเนื้อฟิล์มไม่มากพอทำให้เกิดจุดบกพร่องในเนื้อฟิล์ม ทำให้ชิ้นงานฉีกขาดง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำ ขณะที่สูตรฟิล์มที่เชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นมีแนวโน้มค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดค่อนข้างคงที่ เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงทำให้สารเติมแต่งที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อฟิล์มไม่แยกตัวออกได้ง่ายเมื่อน้ำเข้ามาแทรก โดยการเชื่อมโยงจะไปขัดขวางการรวมตัวกันของสารที่เติมเข้าไปในเนื้อฟิล์ม แต่สูตร PO95C5IV มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากมีปริมาณน้ำมันละหุ่งที่มากเกินไป ทำให้เกิดความไม่เข้ากันของเนื้อฟิล์มมากขึ้น เกิดจุดบกพร่องในชิ้นงานได้ง่ายขึ้น

4.4 การทดสอบมุมสัมผัส (Initial contact angle)



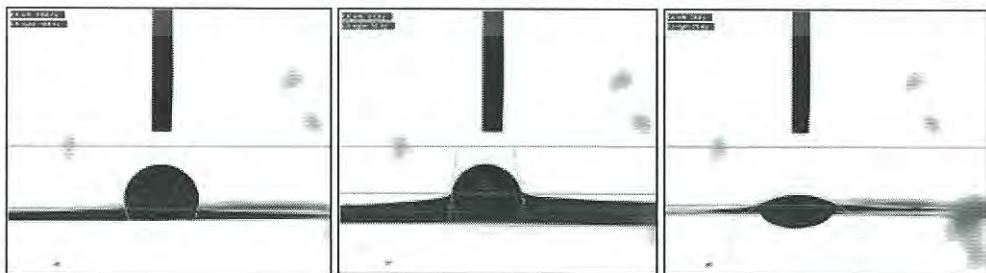
รูปที่ 4.11 ค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ด้วยน้ำกลั่น

จากรูปที่ 4.11 พบว่าฟิล์มสูตรที่ปรับปรุงด้วยตัวริเริ่ม และมีปริมาณน้ำมันละหุ่งที่เพิ่มขึ้น มีค่ามุมสัมผัสที่เวลาเริ่มต้นมีแนวโน้มลดลง (เทียบกับสูตร PO100) เนื่องจากแรงยึดติด (Adhesive force) ของสารต่างอนุภาคมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่น (Cohesive force) ของอนุภาคเดียวกันทำให้หยดน้ำแตกออกจากกัน กระจายแนบไปบนพื้นผิวของฟิล์ม และพื้นผิวเปียกบางส่วน ซึ่งแสดงถึงสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilic) เนื่องจากฟิล์มมีหมู่ไฮดรอกซิลเหลืออยู่ ซึ่งเป็นหมู่ที่มีความเป็นขั้ว จึงทำให้ฟิล์มดูดซับน้ำได้ แม้ว่าฟิล์มจะมีความเป็นขั้วลดลง

โดยการวัดค่ามุมสัมผัสเมื่อเวลาผ่านไปพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมสัมผัสที่วัดหลังจากเวลาเริ่มต้น โดยมีการเปลี่ยนแปลงไป 2 กรณี (รูปที่ 4.12) ดังนี้

1. มุมสัมผัสมีขนาดมุมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นผิวฟิล์มเกิดการบวมตัว (รูปที่ 4.12 b)
2. มุมสัมผัสมีขนาดมุมที่แคบลง เนื่องจากน้ำซึมลงบนพื้นผิวฟิล์ม (รูปที่ 4.12 c)

ซึ่งทั้ง 2 กรณี แสดงถึงความสามารถในการต้านทานน้ำของฟิล์มยังมีประสิทธิภาพไม่สูงนัก



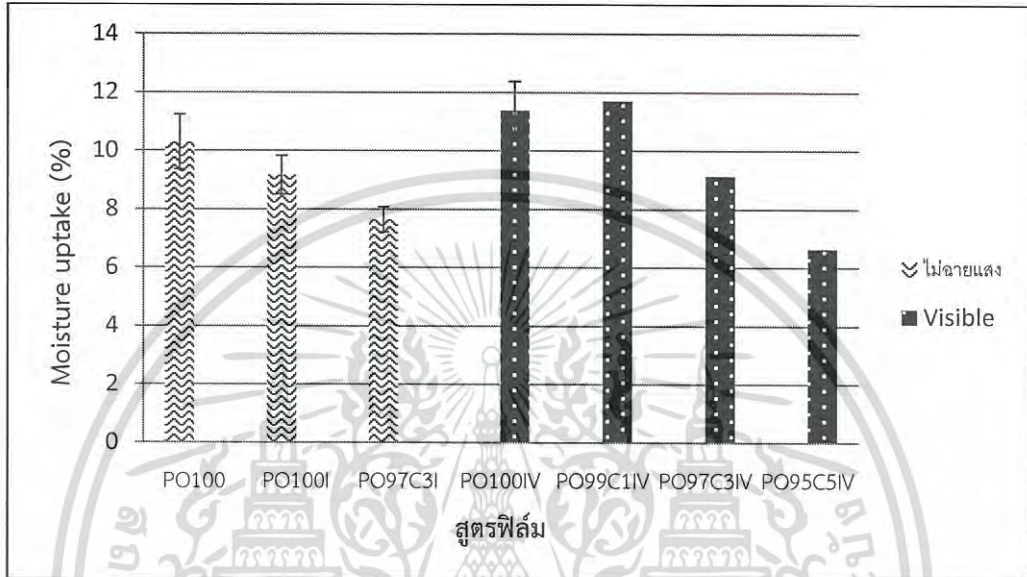
รูปที่ 4.12 ตัวอย่างลักษณะมุมสัมผัสที่เปลี่ยนแปลง a) ลักษณะเริ่มต้น b) มุมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้น

ผิวฟิล์มเกิดการบวมตัว c) มุมที่แคบลง เนื่องจากน้ำซึมลงบนพื้นผิวฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดสอบการดูดความชื้น (Moisture uptake)

จากการทดสอบหาค่าการดูดความชื้น โดยนำฟิล์มเก็บในเดซิเคเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ฟิล์มแห้งจนน้ำหนักฟิล์มคงที่ จากนั้นนำไปเก็บในเดซิเคเตอร์ที่มีสารละลายอิมัลชันโซเดียมคลอไรด์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75 ± 15 เปอร์เซ็นต์ ค่าการดูดความชื้นคำนวณได้จากสูตรที่แสดงในบทที่ 3 หัวข้อ 3.7.7 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.13

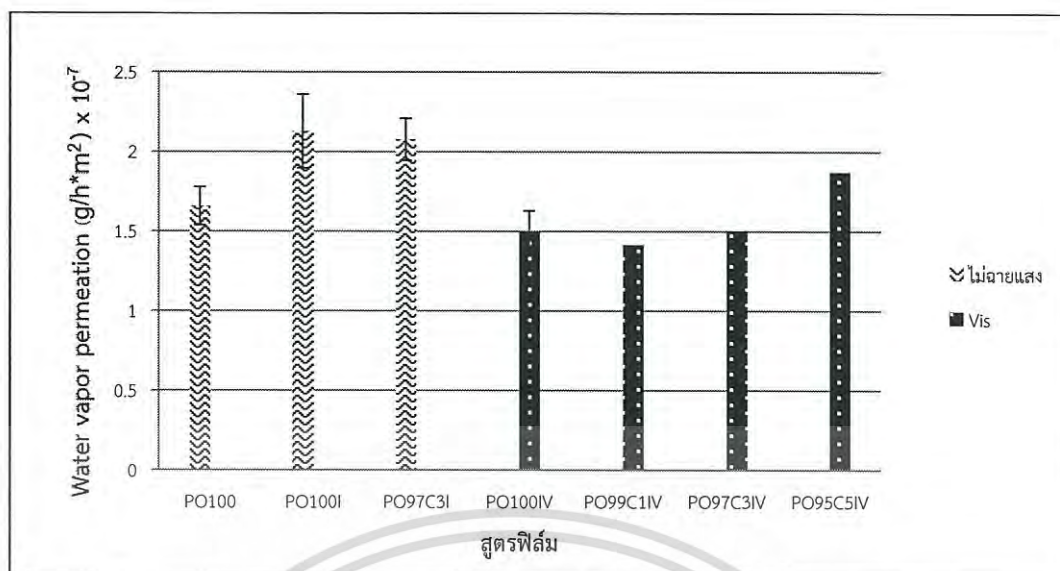


รูปที่ 4.13 ค่าการดูดความชื้นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.13 พบว่าค่าการดูดความชื้นของสูตรฟิล์มที่เชื่อมโยงด้วยระบบไม่ฉายแสง และเชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น ให้ผลการทดสอบไม่แตกต่างกันมากนัก โดยมีค่าการดูดความชื้นอยู่ในช่วง 6–12% สูตรฟิล์มทั้ง 2 ระบบมีแนวโน้มค่าการดูดความชื้นลดลงเมื่อมีการปรับปริมาณน้ำมันละหุ่งเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟิล์มเกิดการเชื่อมโยงที่มากขึ้นมีผลให้ความชื้นผ่านเข้าสู่เนื้อฟิล์มได้ยากขึ้น แต่เนื่องจากฟิล์ม PO100 ซึ่งมีการเชื่อมโยงน้อยสุดมีค่าการดูดความชื้นค่อนข้างต่ำ เมื่อมีการปรับปรุงด้วยน้ำมันละหุ่ง และระบบเชื่อมโยง ค่าการดูดความชื้นจึงลดลงไม่มาก

4.6 การทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ (Water vapor permeability (WVP))

จากการทดสอบหาค่าการซึมผ่านไอน้ำ นำฟิล์มที่ต้องการทดสอบไปคลุมด้านบนปากแก้ววัดมีอย่างน้อย 3.2 เซนติเมตร โดยภายในแก้วบรรจุด้วยแคลเซียมคลอไรด์ประมาณ 10 กรัม (ความชื้นสัมพัทธ์ 0 %) เก็บในเดซิเคเตอร์ (ความชื้นสัมพัทธ์ 75 ± 15 %) นำฟิล์มมาชั่งน้ำหนักทุก ๆ 24 ชั่วโมงเป็นเวลา 7 วัน คำนวณค่าการซึมผ่านไอน้ำได้จากสูตรที่แสดงในบทที่ 3 หัวข้อ 3.7.8 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ค่าการซึมผ่านไอน้ำของสูตรฟิล์มต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.14 พบว่าค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มที่เชื่อมโยงด้วยระบบไม่ฉายแสง และเชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น ให้ผลการทดสอบไม่แตกต่างกัน โดยมีค่าการซึมผ่านไอน้ำอยู่ในช่วง $(1.4-2.3) \times 10^{-7}$ g/h·m² เนื่องจากค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มสูตร PO100 ซึ่งยังไม่มีการปรับปรุงด้วยน้ำมันละหุ่ง และระบบเชื่อมโยง มีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการปรับปรุงฟิล์มโดยการเชื่อมโยง จึงไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าการซึมผ่านไอน้ำที่ชัดเจน โดยสูตรฟิล์มที่มีประสิทธิภาพในการเชื่อมโยงที่ดี ได้แก่ สูตร PO100IV, PO99C1IV และ PO97C3IV ให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำลดลงเล็กน้อย แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้นสูตร PO100I และ PO97C3I ให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่า PO100 อาจเป็นเพราะความไม่เข้ากันของสารเติมแต่งในเนื้อฟิล์ม เมื่อไอน้ำแทรกเข้าไปในเนื้อฟิล์มทำให้สารเติมแต่งในเนื้อฟิล์มแยกตัวออกจากเนื้อพอลิเมอร์ได้ง่าย เนื่องจากมีพันธะเชื่อมโยงภายในเนื้อฟิล์มไม่มากพอทำให้เกิดจุดบกพร่องในเนื้อฟิล์ม ซึ่งค่าการซึมผ่านไอน้ำในช่วงนี้ สามารถนำไปใช้งานในด้านสินค้าอุตสาหกรรม ฟิล์มเคลือบผิว และบรรจุผลิตภัณฑ์อาหาร แต่ไม่เหมาะกับอาหารสดจำพวกผักผลไม้

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้ศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก และน้ำมันละหุ่ง เชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสง โดยมีพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้น ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิกที่เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งมีพันธะคู่ 1 ตำแหน่ง สามารถเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของกรดโอเลอิก และหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยพบว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิกมีสมบัติการต้านทานน้ำเพิ่มขึ้น นอกจากนี้มีการเติมน้ำมันละหุ่ง เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้น สามารถขึ้นเป็นฟิล์มได้ง่าย โดยมีการใช้ระบบเชื่อมโยง 3 ระบบคือ ระบบไม่ฉายแสง, ระบบเชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น และระบบเชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต และนำสูตรฟิล์มที่เตรียมได้มาทำการทดสอบสมบัติ ซึ่งได้ผลการทดลอง สรุปดังนี้

- ผลการปรับปรุงสูตรฟิล์มระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก ด้วยอัตราส่วนของน้ำมันละหุ่งเป็น 1, 3, 5% โดยน้ำหนัก ของระบบเชื่อมโยงทั้ง 3 ระบบ พบว่าสูตรฟิล์มที่มีการเติมน้ำมันละหุ่ง 3% เชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (PO97C3IV) ทำให้ฟิล์มมีสมบัติต้านทานน้ำเพิ่มขึ้น
- ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 5% และ $75 \pm 15\%$ พบว่าการปรับปรุงฟิล์มด้วยน้ำมันละหุ่ง และการใช้ระบบเชื่อมโยงต่าง ๆ ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด, ค่า Young's Modulus และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดอย่างมีนัยสำคัญ แต่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อค่าดังกล่าว โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์ $75 \pm 15\%$ มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด และค่า Young's Modulus ที่ต่ำ แต่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดที่สูง เมื่อเทียบกับฟิล์มที่เก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 5%
- ผลการทดสอบมุมสัมผัส พบว่าปริมาณน้ำมันละหุ่งในฟิล์มที่มากขึ้น มีผลให้ค่ามุมสัมผัสน้อยลง และการเชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นมีผลให้ค่ามุมสัมผัสน้อยกว่าสูตรฟิล์มที่ไม่เชื่อมโยง (สูตร PO100) และเชื่อมโยงด้วยระบบไม่ฉายแสง
- ผลการทดสอบการดูดความชื้น พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของฟิล์มทุกสูตรไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อสูตรฟิล์มมีปริมาณน้ำมันละหุ่งมากขึ้น
- ผลการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ พบว่าฟิล์มทุกสูตรมีค่าการซึมผ่านไอน้ำต่ำ โดยมีค่าอยู่ในช่วง $(1.4-2.3) \times 10^{-7} \text{ g/h} \cdot \text{m}^2$ โดยปริมาณน้ำมันละหุ่ง และระบบเชื่อมโยงไม่มีผลต่อค่าการซึมผ่านไอน้ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. พัฒนาระบบการขึ้นรูปฟิล์มให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การควบคุมความหนาของฟิล์ม และการลดฟอง เป็นต้น
2. พัฒนาสูตรฟิล์มให้มีสมบัติการต้านน้ำที่เพิ่มมากขึ้น โดยการเติมสารขั้วต่าอื่น ๆ เช่น กรดไขมันไม่อิ่มตัวชนิดอื่น หรือใช้สารเชื่อมโยงชนิดอื่น หรือน้ำมันชักแห้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ดารณี ชันเพ็ชร และปิยะนุช รสเคลือ. 2557. การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (พีวีเอ)/โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (โซเดียม-ซีเอ็มซี) สำหรับประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ. [Online]. Available : <http://webcache.googleusercontent.com>.
- [2] จุฑามาศ ปิตะสิงห์, ชมพูนุช เจียมอนันท์กุล และเพชรรัตน์ เนื่องจากจันทร์. 2557. “สมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิกกับน้ำยางธรรมชาติ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] ชมพูนุช ฉันทะจำรัสศิลป์, ธนาภรณ์ สหัสสานนท์ และพีรพร สัจจพันธ์พงษ์. 2555. “การพัฒนาการอัดจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิไวนิลอะซิเตตปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิกและน้ำมันลินสีดสำหรับงานพิมพ์สกรีน.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] Y. Jiang, J. Lu, K.Sun, L. Ma and J. Ding. 2013. “Esterification of oleic acid with ethanol catalyzed by sulfonated cation exchange resin: Experimental and kinetic studies.” Energy Conversion and management. 2013(67) : 980-985.
- [5] ศรีสุดา เตชะसान . 2559. ละหุ่ง (Castor bean). [Online]. Available : <http://www.rakbankerd.com/agriculture/page.php?id=44&s=tblplant>
- [6] ผศ.ดร.เกสัชกรหญิง สุดารัตน์ หอมหวล. 2553. ละหุ่ง. [Online]. Available : <http://www.thai-crudedrug.com/main.php?action=viewpage&pid=118>
- [7] Vegetable Oils. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. Caster oil. [Online]. Available : <http://vegetableoils.org/caster-oil/>
- [8] รายการสาระความรู้ทางการเกษตร ฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่. 2542. “เรื่อง ละหุ่ง”. บทความวิทยุรายการสาระความรู้ทางการเกษตร [Online]. Available : natres.psu.ac.th.
- [9] โครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. 2545. “ละหุ่ง”. [Online]. Available : kanchanapisek.or.th.
- [10] บริษัท ชัน คออลิตี้ อินดัสทรีส์ จำกัด. 2558. ความรู้เกี่ยวกับฟิล์ม. [Online]. Available : <http://www.sun1999.com>.
- [11] สถาบันปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย. 2553. รู้จักกับฟิล์มลามิเนต (Laminated films). [Online]. Available : http://plastic.oie.go.th/PIU_Nov2010.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] วิไลรัตน์ วงศ์เทพ. 2553. “อนุภาคยางธรรมชาติกราฟต์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และเยื่อเลือกผ่านผสมของยางธรรมชาติที่กราฟต์ด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับพอลิอะคริลิกแอซิด.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [13] บริษัท ไทยโพลีเคมีคอล จำกัด. 2557. Polyvinyl alcohol, พอลิไวนิลแอลกอฮอล์. [Online]. Available : <http://thaipolychemicals.blogspot.com/2014/01/polyvinylalcohol.html>
- [14] Wikipedia. 2558. Polyvinyl acetate. [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/polyvinyl_acetate.
- [15] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). 2551. ความหมายของอักษรย่อทางพลาสติก ตอนที่จบ. [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/mcu/phml/in dex.php/th/2014-09-12-03-39-42/43-2009-06-25-03-17-43>
- [16] วิกิพีเดีย. 2558. กรดไขมันอิ่มตัว. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/>
- [17] ไม่ปรากฏชื่อ. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. ลิขิต. [Online]. Available : <http://www.ipesp.ac.th/learning/biocheme/html/bt4.pdf>
- [18] ครูบุญรอด วงษ์สวาท. 2015. ชนิดของกรดไขมัน. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1643/oleic-acid>
- [19] ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และคณะ. 2555. กรดไขมันอิ่มตัว. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/000314/saturated-fatty-acid>
- [20] ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และศาสตราจารย์เกียรติคุณ ดร.นิธิยา รัตนาปนนท์. 2555. Oleic acid / กรดโอเลอิก. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1643/oleic-acid>
- [21] สัญญา ราศีชญ. 2554. เอสเทอร์ (Ester). [Online]. Available : <https://majorchem-spa.wordpress.com/ester/>
- [22] ผศ. ดร. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. บทที่ 2 ปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอนุมูลอิสระ. [Online]. Available : <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/Download/Chapter%20%20Free%20radical%20polymerization.pdf>
- [23] อนุสิษฐ์ เกื้อกุล. 2554. ปฏิกริยารีดอกซ์. [Online]. Available : <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/411บทเรียนที่+2+ปฏิกริยารีดอกซ์>
- [24] อัจฉรา ศิริมังคะลา. ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์. Photochemistry. [Online]. Available : <http://chemsci.kku.ac.th/atchara/Slide/313233/SLPHO1.PPS>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] K. Mikhail. 2004. "Ultra-thin films of polyvinyl alcohol on hydrophobic surfaces : preparation, properties, chemistry and applications." Encyclopedia of Polymer Science and engineering, 2nd Ed.
- [26] ณีฐิตนัย อุณเกษม และคณะ. 2544. "การเตรียมแผ่นกระดาษอัดโดยใช้กาวไร้สารฟอร์มาลดีไฮด์จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงสมบัติด้วยน้ำมันทังและน้ำมันละหุ่ง." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [27] S. Tharhate and J. Ngamcharoenthavorn. 2007. "Water-resistant enhancement of drying oil modified poly(vinyl alcohol)." Special Project Book International programs, Faculty of science King Mongkut's Institute of technology Ladkrabang.
- [28] J. Suksaeree, C. Luprasong and C. Monton. 2015. "Swelling behavior of polyvinyl alcohol and lactic acid hydrogel films." Journal of Pharmaceutical sciences 2015 (10) : 459-562.
- [29] A. Wanga, J. Rena, W. Lia, R. Suna and S. Liua. 2014. "Properties of polyvinyl alcohol/xylan composite films with citric acid." Journal of Carbohydrate Polymers (103) : 94– 99.
- [30] การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม. ASTM D 882 : Committee on standard. "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics."
- [31] การทดสอบมุมสัมผัส. ASTM D 5946. : Standard Test Method for Corona-Treated Polymer Films Using Water Contact Angle Measurements



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์สมบัติฟิล์ม

ตารางที่ ก-1 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้นที่ 24 ชั่วโมงของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

| สูตร | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ค่าเฉลี่ย | SD |
|----------|------------|------------|------------|-----------|--------|
| PO100 | 465.67 | 478.43 | 417.48 | 496.61 | 32.15 |
| PO100I | 604.11 | 627.21 | 640.00 | 623.77 | 18.19 |
| PO99C1I | 358.52 | 472.66 | 370.00 | 400.39 | 62.85 |
| PO97C3I | 497.89 | 398.48 | 387.38 | 427.92 | 60.85 |
| PO95C5I | 401.6 | 463.48 | 556.04 | 473.71 | 77.73 |
| PO100IV | 532.47 | 449.32 | 484.05 | 488.61 | 41.76 |
| PO99C1IV | 446.97 | 568.18 | 552.48 | 522.54 | 65.92 |
| PO97C3IV | 329.03 | 439.72 | 446.51 | 405.09 | 65.95 |
| PO95C5IV | 317.07 | 420.97 | 470.00 | 402.68 | 78.09 |
| PO100IU | 738.89 | 480.61 | 600.65 | 606.71 | 129.25 |
| PO99C1IU | 959.35 | 950.42 | 994.44 | 968.07 | 23.27 |
| PO97C3IU | 409.27 | 474.07 | 482.58 | 455.31 | 40.09 |
| PO95C5IU | 730.67 | 525.93 | 534.00 | 596.86 | 115.95 |

ตารางที่ ก-2 ค่าปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ของฟิล์มหลังแช่น้ำกลั่น 24 ชั่วโมงของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

| สูตร | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ค่าเฉลี่ย | SD |
|----------|------------|------------|------------|-----------|------|
| PO100 | 67.16 | 75.16 | 75.73 | 72.69 | 4.79 |
| PO100I | 79.45 | 80.88 | 78.57 | 79.64 | 1.17 |
| PO99C1I | 95.56 | 88.28 | 87.86 | 90.56 | 4.33 |
| PO97C3I | 96.84 | 85.61 | 91.26 | 91.24 | 5.62 |
| PO95C5I | 82.40 | 80.87 | 83.52 | 82.26 | 1.33 |
| PO100IV | 79.22 | 80.82 | 85.89 | 81.98 | 3.48 |
| PO99C1IV | 85.61 | 80.68 | 81.19 | 82.49 | 2.71 |
| PO97C3IV | 89.68 | 87.94 | 93.80 | 90.47 | 3.01 |
| PO95C5IV | 91.22 | 88.71 | 95.45 | 91.79 | 3.41 |
| PO100IU | 61.11 | 76.97 | 77.27 | 71.78 | 9.24 |
| PO99C1IU | 76.42 | 77.31 | 74.60 | 76.11 | 1.38 |
| PO97C3IU | 73.51 | 90.74 | 75.76 | 80.00 | 9.37 |
| PO95C5IU | 80.00 | 74.07 | 78.00 | 77.36 | 3.01 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มที่ 24 ชั่วโมงของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

| สูตร | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ค่าเฉลี่ย | SD |
|----------|------------|------------|------------|-----------|--------|
| PO100 | 742.22 | 669.57 | 583.33 | 665.04 | 79.54 |
| PO100I | 786.21 | 799.09 | 841.82 | 809.04 | 29.11 |
| PO99C1I | 379.85 | 548.67 | 434.96 | 454.49 | 86.09 |
| PO97C3I | 517.39 | 482.30 | 434.04 | 477.91 | 41.85 |
| PO95C5I | 508.74 | 596.77 | 685.53 | 597.01 | 88.39 |
| PO100IV | 698.36 | 579.66 | 580.00 | 619.34 | 68.43 |
| PO99C1IV | 538.94 | 728.17 | 703.66 | 656.92 | 102.91 |
| PO97C3IV | 378.42 | 513.71 | 482.64 | 458.26 | 70.87 |
| PO95C5IV | 357.22 | 487.27 | 497.14 | 447.21 | 78.09 |
| PO100IU | 1272.73 | 654.33 | 806.72 | 911.26 | 322.18 |
| PO99C1IU | 1286.17 | 1258.70 | 1367.02 | 1303.96 | 56.31 |
| PO97C3IU | 592.79 | 532.65 | 669.00 | 598.15 | 68.33 |
| PO95C5IU | 938.33 | 745.00 | 712.82 | 798.72 | 121.98 |

ตารางที่ ก-4 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น (%WC), ค่าปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ (%SR) และค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม (%S) ที่ 24 ชั่วโมง

| สูตร | %WC | | %SR | | %S | |
|----------|-----------|--------|-----------|------|-----------|--------|
| | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD | ค่าเฉลี่ย | SD |
| PO100 | 496.61 | 32.15 | 72.69 | 4.79 | 665.04 | 79.54 |
| PO100I | 623.77 | 18.19 | 79.64 | 1.17 | 809.04 | 29.11 |
| PO99C1I | 400.39 | 62.85 | 90.56 | 4.33 | 454.49 | 86.09 |
| PO97C3I | 427.92 | 60.85 | 91.24 | 5.62 | 477.91 | 41.85 |
| PO95C5I | 473.71 | 77.73 | 82.26 | 1.33 | 597.01 | 88.39 |
| PO100IV | 488.61 | 41.76 | 81.98 | 3.48 | 619.34 | 68.43 |
| PO99C1IV | 522.54 | 65.92 | 82.49 | 2.71 | 656.92 | 102.91 |
| PO97C3IV | 405.09 | 65.95 | 90.47 | 3.01 | 458.26 | 70.87 |
| PO95C5IV | 402.68 | 78.09 | 91.79 | 3.41 | 447.21 | 78.09 |
| PO100IU | 606.71 | 129.25 | 71.78 | 9.24 | 911.26 | 322.18 |
| PO99C1IU | 968.07 | 23.27 | 76.11 | 1.38 | 1303.96 | 56.31 |
| PO97C3IU | 455.31 | 40.09 | 80.00 | 9.37 | 598.15 | 68.33 |
| PO95C5IU | 596.86 | 115.95 | 77.36 | 3.01 | 798.72 | 121.98 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข-1 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดก่อนขึ้นงานฉีกขาดของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 5%

| สูตร | ชิ้นงาน | Tensile strength (MPa) | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---------|---------|------------------------|-----------|--------|
| PO100 | 1 | 8.0571 | 8.4093 | 0.8364 |
| | 2 | 9.4857 | | |
| | 3 | 9.6286 | | |
| | 4 | 8.3714 | | |
| | 5 | 7.4457 | | |
| | 6 | 7.3200 | | |
| | 7 | 8.4914 | | |
| | 8 | 8.4743 | | |
| PO100I | 1 | 7.3257 | 7.2895 | 1.0841 |
| | 2 | 5.8457 | | |
| | 3 | 6.8286 | | |
| | 4 | 7.1943 | | |
| | 5 | 9.1771 | | |
| | 6 | 7.3657 | | |
| PO97C3I | 1 | 7.1771 | 6.6831 | 1.0129 |
| | 2 | 6.4400 | | |
| | 3 | 8.4057 | | |
| | 4 | 6.6171 | | |
| | 5 | 5.8629 | | |
| | 6 | 5.5960 | | |
| PO100IV | 1 | 6.2229 | 6.6571 | 0.3831 |
| | 2 | 6.3486 | | |
| | 3 | 6.6229 | | |
| | 4 | 7.0457 | | |
| | 5 | 7.0457 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 (ต่อ) ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดก่อนขึ้นงานฉีกขาดของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่
ความชื้นสัมพัทธ์ 5%

| สูตร | ชิ้นงาน | Tensile strength (MPa) | ค่าเฉลี่ย | SD |
|----------|---------|------------------------|-----------|----------|
| PO99C1IV | 1 | 8.3371 | 7.7940 | 2.1863 |
| | 2 | 11.2686 | | |
| | 3 | 7.4571 | | |
| | 4 | 5.3909 | | |
| | 5 | 5.6017 | | |
| | 6 | 8.7086 | | |
| PO97C3IV | 1 | 6.3371 | 7.038571 | 0.892991 |
| | 2 | 7.2514 | | |
| | 3 | 8.5086 | | |
| | 4 | 6.7714 | | |
| | 5 | 7.2514 | | |
| | 6 | 8.0057 | | |
| | 7 | 5.9543 | | |
| | 8 | 6.2286 | | |
| PO95C5IV | 1 | 6.1886 | 5.2994 | 0.6505 |
| | 2 | 4.6714 | | |
| | 3 | 4.6451 | | |
| | 4 | 5.4623 | | |
| | 5 | 5.5297 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 ค่า Young's modulus ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 5%

| สูตร | ชิ้นงาน | Young's modulus (MPa) | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---------|---------|-----------------------|-----------|--------|
| PO100 | 1 | 0.0068 | 0.0077 | 0.0020 |
| | 2 | 0.0112 | | |
| | 3 | 0.0094 | | |
| | 4 | 0.0066 | | |
| | 5 | 0.0058 | | |
| | 6 | 0.0080 | | |
| | 7 | 0.0088 | | |
| | 8 | 0.0051 | | |
| PO100I | 1 | 0.0086 | 0.0080 | 0.0035 |
| | 2 | 0.0058 | | |
| | 3 | 0.0020 | | |
| | 4 | 0.0108 | | |
| | 5 | 0.0108 | | |
| | 6 | 0.0102 | | |
| PO97C3I | 1 | 0.0093 | 0.0095 | 0.0016 |
| | 2 | 0.0081 | | |
| | 3 | 0.0117 | | |
| | 4 | 0.0104 | | |
| | 5 | 0.0100 | | |
| | 6 | 0.0072 | | |
| PO100IV | 1 | 0.0055 | 0.0053 | 0.0034 |
| | 2 | 0.0094 | | |
| | 3 | 0.0054 | | |
| | 4 | 0.0052 | | |
| | 5 | 0.0064 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 (ต่อ) ค่ายังมอดุลัสของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 5%

| สูตร | ชั้นงาน | Young's modulus (MPa) | ค่าเฉลี่ย | SD |
|----------|---------|-----------------------|-----------|--------|
| PO99C1IV | 1 | 0.0081 | 0.0035 | 0.0101 |
| | 2 | 0.010 | | |
| | 3 | 0.0077 | | |
| | 4 | 0.0034 | | |
| | 5 | -0.0167 | | |
| | 6 | 0.0086 | | |
| PO97C3IV | 1 | 0.0069 | 0.0071 | 0.0011 |
| | 2 | 0.0068 | | |
| | 3 | 0.0073 | | |
| | 4 | 0.0065 | | |
| | 5 | 0.0050 | | |
| | 6 | 0.0073 | | |
| | 7 | 0.0079 | | |
| | 8 | 0.0088 | | |
| PO95C5IV | 1 | 0.0041 | 0.0054 | 0.0011 |
| | 2 | 0.0062 | | |
| | 3 | 0.0043 | | |
| | 4 | 0.0064 | | |
| | 5 | 0.0059 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 5%

| สูตร | ชั้นงาน | %Elongation at break | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---------|---------|----------------------|-----------|---------|
| PO100 | 1 | 28.1980 | 32.5640 | 13.0970 |
| | 2 | 13.7270 | | |
| | 3 | 23.2910 | | |
| | 4 | 42.5280 | | |
| | 5 | 56.9720 | | |
| | 6 | 31.4670 | | |
| | 7 | 27.4590 | | |
| | 8 | 36.8700 | | |
| PO100I | 1 | 5.7954 | 6.4773 | 2.4657 |
| | 2 | 5.2466 | | |
| | 3 | 3.9773 | | |
| | 4 | 7.7786 | | |
| | 5 | 10.829 | | |
| | 6 | 5.2369 | | |
| PO97C3I | 1 | 12.9810 | 9.5295 | 3.0799 |
| | 2 | 8.8014 | | |
| | 3 | 5.9128 | | |
| | 4 | 9.9698 | | |
| | 5 | 6.4690 | | |
| | 6 | 13.043 | | |
| PO100IV | 1 | -3.4423 | 21.7705 | 21.5305 |
| | 2 | 4.1060 | | |
| | 3 | 50.0160 | | |
| | 4 | 28.1730 | | |
| | 5 | 30.0000 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 (ต่อ) ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 5%

| สูตร | ชั้นงาน | %Elongation at break | ค่าเฉลี่ย | SD |
|----------|---------|----------------------|-----------|--------|
| PO99C1IV | 1 | 7.5072 | 11.7693 | 5.9874 |
| | 2 | 7.4006 | | |
| | 3 | 8.9448 | | |
| | 4 | 11.9640 | | |
| | 5 | 23.3400 | | |
| | 6 | 11.4590 | | |
| PO97C3IV | 1 | 12.0930 | 10.5395 | 2.2075 |
| | 2 | 9.7067 | | |
| | 3 | 12.9400 | | |
| | 4 | 9.6259 | | |
| | 5 | 6.5373 | | |
| | 6 | 9.8732 | | |
| | 7 | 10.2020 | | |
| | 8 | 13.3380 | | |
| PO95C5IV | 1 | 16.5650 | 11.0760 | 3.5225 |
| | 2 | 12.4400 | | |
| | 3 | 7.6470 | | |
| | 4 | 9.4697 | | |
| | 5 | 9.2585 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดก่อนขึ้นงานฉีกขาดของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $75 \pm 15\%$

| สูตร | ชิ้นงาน | Tensile strength (MPa) | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---------|---------|------------------------|-----------|--------|
| PO100 | 1 | 3.4469 | 3.9219 | 0.5671 |
| | 2 | 3.4046 | | |
| | 3 | 5.0829 | | |
| | 4 | 3.8109 | | |
| | 5 | 3.8211 | | |
| | 6 | 4.1234 | | |
| | 7 | 3.7634 | | |
| PO100I | 1 | 3.6645 | 4.1074 | 0.7298 |
| | 2 | 4.5143 | | |
| | 3 | 3.7389 | | |
| | 4 | 4.3383 | | |
| | 5 | 3.1703 | | |
| | 6 | 5.2183 | | |
| PO97C3I | 1 | 4.1554 | 4.2738 | 0.8676 |
| | 2 | 5.8743 | | |
| | 3 | 3.4503 | | |
| | 4 | 3.3229 | | |
| | 5 | 4.4794 | | |
| | 6 | 3.9223 | | |
| | 7 | 4.7120 | | |
| PO100IV | 1 | 3.2109 | 4.1273 | 0.7586 |
| | 2 | 5.1480 | | |
| | 3 | 3.6046 | | |
| | 4 | 4.9114 | | |
| | 5 | 4.0874 | | |
| | 6 | 3.8017 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 (ต่อ) ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดก่อนขึ้นงานฉีกขาดของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75±15%

| สูตร | ชิ้นงาน | Tensile strength (MPa) | ค่าเฉลี่ย | SD |
|----------|---------|------------------------|-----------|--------|
| PO99C1IV | 1 | 3.4069 | 3.4509 | 0.2825 |
| | 2 | 2.9251 | | |
| | 3 | 3.5429 | | |
| | 4 | 3.4406 | | |
| | 5 | 3.8851 | | |
| | 6 | 3.4691 | | |
| | 7 | 3.6714 | | |
| | 8 | 3.2663 | | |
| PO97C3IV | 1 | 3.9834 | 3.3139 | 0.5095 |
| | 2 | 2.9503 | | |
| | 3 | 3.3206 | | |
| | 4 | 3.8703 | | |
| | 5 | 2.8040 | | |
| | 6 | 3.1457 | | |
| | 7 | 2.8646 | | |
| | 8 | 2.8674 | | |
| | 9 | 4.0189 | | |
| PO95C5IV | 1 | 2.9331 | 2.7701 | 0.5121 |
| | 2 | 2.2000 | | |
| | 3 | 3.5034 | | |
| | 4 | 3.1417 | | |
| | 5 | 2.5617 | | |
| | 6 | 2.9629 | | |
| | 7 | 2.0880 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 ค่า Young's modulus ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $75 \pm 15\%$

| สูตร | ชิ้นงาน | Young's modulus (MPa) | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---------|---------|-----------------------|-----------|--------|
| PO100 | 1 | 0.0294 | 0.0044 | 0.0110 |
| | 2 | 0.0002 | | |
| | 3 | 0.0003 | | |
| | 4 | 0.0003 | | |
| | 5 | 0.0004 | | |
| | 6 | 0.0003 | | |
| | 7 | 0.0003 | | |
| PO100I | 1 | 0.0010 | 0.0021 | 0.0010 |
| | 2 | 0.0011 | | |
| | 3 | 0.0022 | | |
| | 4 | 0.0020 | | |
| | 5 | 0.0035 | | |
| | 6 | 0.0029 | | |
| PO97C3I | 1 | 0.0016 | 0.0042 | 0.0022 |
| | 2 | 0.0046 | | |
| | 3 | 0.0052 | | |
| | 4 | 0.0038 | | |
| | 5 | 0.0022 | | |
| | 6 | 0.0036 | | |
| | 7 | 0.0082 | | |
| PO100IV | 1 | 0.0002 | 0.0005 | 0.0002 |
| | 2 | 0.0004 | | |
| | 3 | 0.0005 | | |
| | 4 | 0.0004 | | |
| | 5 | 0.0008 | | |
| | 6 | 0.0006 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 (ต่อ) ค่ายังมอดุลัสของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $75 \pm 15\%$

| สูตร | ชิ้นงาน | Young's modulus (MPa) | ค่าเฉลี่ย | SD |
|----------|---------|-----------------------|-----------|--------|
| PO99C1IV | 1 | 0.0001 | 0.0005 | 0.0003 |
| | 2 | 0.0001 | | |
| | 3 | 0.0003 | | |
| | 4 | 0.0007 | | |
| | 5 | 0.0008 | | |
| | 6 | 0.0007 | | |
| | 7 | 0.0004 | | |
| | 8 | 0.0006 | | |
| PO97C3IV | 1 | 0.0003 | 0.0005 | 0.0002 |
| | 2 | 0.0003 | | |
| | 3 | 0.0006 | | |
| | 4 | 0.0002 | | |
| | 5 | 0.0007 | | |
| | 6 | 0.0006 | | |
| | 7 | 0.0008 | | |
| | 8 | 0.0002 | | |
| | 9 | 0.0007 | | |
| PO95C5IV | 1 | 0.0001 | 0.0006 | 0.0004 |
| | 2 | 0.0002 | | |
| | 3 | 0.0006 | | |
| | 4 | 0.0004 | | |
| | 5 | 0.0007 | | |
| | 6 | 0.0011 | | |
| | 7 | 0.0009 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-6 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75±15%

| สูตร | ชิ้นงาน | %Elongation at break | ค่าเฉลี่ย | SD |
|---------|---------|----------------------|-----------|---------|
| PO100 | 1 | 248.4700 | 217.1043 | 35.1450 |
| | 2 | 205.3200 | | |
| | 3 | 250.8700 | | |
| | 4 | 187.2500 | | |
| | 5 | 175.3100 | | |
| | 6 | 260.4800 | | |
| | 7 | 192.0300 | | |
| PO100I | 1 | 84.0630 | 75.9372 | 34.1002 |
| | 2 | 129.4800 | | |
| | 3 | 47.4880 | | |
| | 4 | 80.4500 | | |
| | 5 | 31.1900 | | |
| | 6 | 82.9520 | | |
| PO97C3I | 1 | 79.5340 | 60.2656 | 31.9637 |
| | 2 | 107.4000 | | |
| | 3 | 20.8610 | | |
| | 4 | 55.6510 | | |
| | 5 | 77.1520 | | |
| | 6 | 61.9250 | | |
| | 7 | 19.3360 | | |
| PO100IV | 1 | 135.9600 | 205.8555 | 89.0648 |
| | 2 | 274.3000 | | |
| | 3 | 307.6000 | | |
| | 4 | 265.4800 | | |
| | 5 | 84.6730 | | |
| | 6 | 167.1200 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-6 (ต่อ) ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์
75±15%

| สูตร | ชิ้นงาน | %Elongation at break | ค่าเฉลี่ย | SD |
|----------|---------|----------------------|-----------|---------|
| PO99C1IV | 1 | 229.9000 | 196.5425 | 44.2482 |
| | 2 | 167.2500 | | |
| | 3 | 125.3900 | | |
| | 4 | 240.7400 | | |
| | 5 | 224.4800 | | |
| | 6 | 172.1200 | | |
| | 7 | 245.9400 | | |
| | 8 | 166.5200 | | |
| PO97C3IV | 1 | 307.8400 | 224.0789 | 55.2998 |
| | 2 | 197.9400 | | |
| | 3 | 232.5900 | | |
| | 4 | 233.3600 | | |
| | 5 | 127.9200 | | |
| | 6 | 274.4300 | | |
| | 7 | 187.7200 | | |
| | 8 | 185.7400 | | |
| | 9 | 269.1700 | | |
| PO95C5IV | 1 | 166.0500 | 133.5060 | 29.0457 |
| | 2 | 128.4900 | | |
| | 3 | 115.3100 | | |
| | 4 | 141.7300 | | |
| | 5 | 171.3800 | | |
| | 6 | 88.35200 | | |
| | 7 | 123.2300 | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-7 ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสที่นาที่เริ่มต้น (1 นาที่) ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

| สูตร | ค่าเฉลี่ย | SD |
|----------|-----------|-------|
| PO100 | 101.60 | 5.79 |
| PO100I | 81.90 | 13.59 |
| PO97C3I | 77.12 | 21.88 |
| PO100IV | 82.83 | 17.59 |
| PO99C1IV | 59.98 | 24.51 |
| PO97C3IV | 57.76 | 20.85 |
| PO95C5IV | 34.77 | 36.19 |

ตารางที่ ข-8 ค่าการทดสอบมุมสัมผัสด้วยน้ำกลั่นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

| สูตร | ตำแหน่ง | เวลา (นาที่) | | | | | | | | | |
|----------|---------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | |
| | | ซ้าย | ขวา | ซ้าย | ขวา | ซ้าย | ขวา | ซ้าย | ขวา | ซ้าย | ขวา |
| PO100 | 1 | 104.20 | 102.60 | 104.00 | 101.80 | 100.70 | 97.70 | 97.00 | 93.20 | 89.30 | 84.40 |
| | 2 | 104.70 | 104.30 | 104.40 | 104.10 | 102.60 | 102.20 | 101.60 | 101.20 | 100.40 | 99.90 |
| | 3 | 105.80 | 106.40 | 104.50 | 105.50 | 102.50 | 103.50 | 100.70 | 101.50 | 98.00 | 98.80 |
| | 4 | 92.70 | 92.10 | 86.60 | 85.40 | 82.00 | 79.00 | 83.80 | 78.90 | 81.80 | 75.50 |
| PO100I | 1 | 85.30 | 84.10 | 79.00 | 79.30 | 62.60 | 63.80 | 57.90 | 62.80 | 50.90 | 50.90 |
| | 2 | 86.60 | 88.20 | 84.80 | 84.60 | 77.10 | 72.60 | 81.00 | 74.70 | 85.10 | 78.40 |
| | 3 | - | - | 11.70 | 15.90 | - | - | 69.30 | 60.60 | 72.30 | 51.00 |
| | 4 | 92.40 | 54.80 | 42.50 | 26.80 | 43.40 | 29.20 | - | - | - | - |
| PO97C3I | 1 | 47.60 | 50.40 | 33.60 | 44.00 | 46.10 | 51.00 | 52.60 | 45.90 | 44.90 | 41.70 |
| | 2 | 89.20 | 90.00 | 65.00 | 59.60 | 49.40 | 35.10 | 54.10 | 53.00 | 64.90 | 63.60 |
| | 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 4 | 90.90 | 94.60 | 60.40 | 60.40 | 39.60 | 46.30 | 73.70 | 42.20 | - | - |
| PO100IV | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 2 | 98.70 | 97.40 | 93.60 | 93.90 | 87.50 | 89.00 | - | - | - | - |
| | 3 | 67.20 | 68.00 | 65.50 | 56.50 | 13.90 | 13.90 | - | - | - | - |
| | 4 | - | - | 31.40 | 32.00 | - | - | - | - | - | - |
| PO99C1IV | 1 | 28.60 | 29.40 | 17.60 | 16.40 | 10.30 | 22.10 | - | - | - | - |
| | 2 | - | - | - | - | - | - | 60.10 | 56.50 | - | - |
| | 3 | 78.90 | 82.80 | 79.10 | 83.50 | 72.80 | 76.60 | 78.30 | 79.70 | 77.40 | 79.50 |
| | 4 | 70.90 | 69.30 | 58.10 | 62.60 | 58.40 | 58.20 | 62.40 | 68.70 | - | - |
| PO97C3IV | 1 | 53.60 | 55.00 | 51.20 | 51.40 | 50.60 | 48.40 | 49.70 | 48.00 | 56.00 | 52.10 |
| | 2 | 70.80 | 73.50 | 67.90 | 70.30 | 64.30 | 66.50 | 61.40 | 63.50 | 59.60 | 60.50 |
| | 3 | 67.50 | 61.10 | 61.50 | 54.80 | 53.80 | 46.60 | 47.60 | 40.40 | - | - |
| | 4 | 9.60 | 71.00 | - | - | - | - | 179.10 | 179.10 | - | - |
| PO95C5IV | 1 | - | - | 10.10 | 10.10 | 11.30 | 11.30 | - | - | - | - |
| | 2 | 13.10 | 13.10 | 14.70 | 14.70 | 15.30 | 15.30 | - | - | - | - |
| | 3 | 9.90 | 9.90 | - | - | - | - | 25.70 | 24.80 | - | - |
| | 4 | 85.80 | 76.80 | 73.50 | 67.80 | 64.70 | 58.10 | 57.40 | 50.30 | 52.80 | 45.50 |

หมายเหตุ : - คือ ไม่สามารถวัดค่ามุมสัมผัสของฟิล์มได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-9 รูปการทดสอบมุมสัมผัสด้วยน้ำกลั่นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

| สูตร | ตำแหน่ง | เวลา (นาท) | | | | |
|--------|---------|------------|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| PO100 | 1 | | | | | |
| | 2 | | | | | |
| | 3 | | | | | |
| | 4 | | | | | |
| PO100I | 1 | | | | | |
| | 2 | | | | | |
| | 3 | | | | | |
| | 4 | | | | | |

หมายเหตุ : - คือไม่สามารถวัดค่ามุมสัมผัสของฟิล์มได้

ตารางที่ ข-9 (ต่อ) รูปการทดสอบมุมสัมผัสด้วยน้ำกลั่นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

| สูตร | ตำแหน่ง | เวลา (นาท) | | | | |
|----------|---------|------------|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| PO97C3I | 1 | | | | | |
| | 2 | | | | | |
| | 3 | - | - | - | - | - |
| | 4 | | | | | - |
| PO100IV | 1 | - | - | - | - | - |
| | 2 | | | | - | - |
| | 3 | | | | - | - |
| | 4 | - | | - | - | - |
| PO99C1IV | 1 | | | | - | - |
| | 2 | - | - | - | | - |
| | 3 | | | | | |
| | 4 | | | | | - |

หมายเหตุ : - คือ ไม่สามารถวัดค่ามุมสัมผัสของฟิล์มได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-9 (ต่อ) รูปการทดสอบมุมสัมผัสด้วยน้ำกลั่นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

| สูตร | ตำแหน่ง | เวลา (นาที) | | | | |
|----------|---------|-------------|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| PO97C3IV | 1 | | | | | |
| | 2 | | | | | |
| | 3 | | | | | - |
| | 4 | | - | - | | - |
| PO95C5IV | 1 | | | | - | - |
| | 2 | | | | - | - |
| | 3 | | | | | - |
| | 4 | | | | | |

หมายเหตุ : - คือ ไม่สามารถวัดค่ามุมสัมผัสของฟิล์มได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-10 ค่าการดูดความชื้นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

| สูตร | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ค่าเฉลี่ย | SD |
|----------|------------|------------|------------|-----------|------|
| PO100 | 9.20 | 10.76 | 10.90 | 10.29 | 0.94 |
| PO100I | 8.47 | 9.21 | 9.79 | 9.16 | 0.66 |
| PO97C3I | 7.29 | 8.13 | 7.50 | 7.64 | 0.44 |
| PO100IV | 11.94 | 11.59 | 10.56 | 11.37 | 0.72 |
| PO99C1IV | 12.75 | 13.08 | 9.28 | 11.70 | 2.11 |
| PO97C3IV | 12.40 | 7.35 | 7.63 | 9.13 | 2.84 |
| PO95C5IV | 6.31 | 5.83 | 7.78 | 6.64 | 1.01 |

ตารางที่ ข-11 ค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ($\text{g/h}\cdot\text{m}^2$)

| สูตร | ครั้งที่ 1 | ครั้งที่ 2 | ครั้งที่ 3 | ค่าเฉลี่ย | SD |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| PO100 | 1.76×10^{-7} | 1.52×10^{-7} | 1.69×10^{-7} | 1.66×10^{-7} | 1.21×10^{-8} |
| PO100I | 1.92×10^{-7} | 2.08×10^{-7} | 2.38×10^{-7} | 2.13×10^{-7} | 2.32×10^{-8} |
| PO97C3I | 2.20×10^{-7} | 1.94×10^{-7} | 2.09×10^{-7} | 2.08×10^{-7} | 1.33×10^{-8} |
| PO100IV | 1.18×10^{-7} | 1.92×10^{-7} | 1.39×10^{-7} | 1.50×10^{-7} | 3.78×10^{-8} |
| PO99C1IV | 1.35×10^{-7} | 1.59×10^{-7} | 1.30×10^{-7} | 1.41×10^{-7} | 1.58×10^{-8} |
| PO97C3IV | 1.42×10^{-7} | 1.58×10^{-7} | 1.51×10^{-7} | 1.50×10^{-7} | 8.14×10^{-9} |
| PO95C5IV | 1.83×10^{-7} | 1.76×10^{-7} | 2.02×10^{-7} | 1.87×10^{-7} | 1.30×10^{-8} |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้