

การพัฒนาฟิล์มตอบสนองต่อความชื้นจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุง
โครงสร้างด้วยกรดโอเลอิกกับน้ำมันถั่ง

DEVELOPMENT OF HUMIDITY SENSITIVE FILMS FROM OLEIC ACID-
MODIFIED PVA/TUNG OIL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2019-SC-M-014-023

การพัฒนาฟิล์มตอบสนองต่อความชื้นจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุง
โครงสร้างด้วยกรดโอเลอิกกับน้ำมันทัง

DEVELOPMENT OF HUMIDITY SENSITIVE FILMS FROM OLEIC ACID-
MODIFIED PVA/TUNG OIL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-014-023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF HUMIDITY SENSITIVE FILMS FROM OLEIC
ACID-MODIFIED PVA/TUNG OIL



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019

KMITL-2019-SC-M-014-023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาฟิล์มตอบสนองต่อความชื้นจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิกกับน้ำมันทัง Development of humidity sensitive films from Oleic acid - modified PVA/Tung oil
ชื่อนักศึกษา	นายภาณุวัฒน์ ดวงรัมย์
รหัสนักศึกษา	59605037
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทธารุ มนต์วิเศษ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาฟิล์มตรวจจับความชื้นจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิกที่ 1, 3 และ 5 ส่วนในร้อยละ (pph) ของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (P*) ร่วมกับน้ำมันทัง (T) ในอัตราส่วน P*:T เป็น 97:3, 95:5 และ 90:10 โดยน้ำหนัก เชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสง หรือระบบรีดอกซ์ และใช้โคบอลต์คลอไรด์ (CoCl_2) เป็นสารช่วยดูดความชื้น ฟิล์มที่ได้นำมาตรวจวิเคราะห์เอกลักษณ์ ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) จากนั้น นำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม, ปริมาณของแข็งที่เหลือ การดูดความชื้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50-95 เปอร์เซ็นต์ (%RH) และการวัดมุมสัมผัสกับน้ำกลั่น จากนั้นนำฟิล์มที่เตรียมได้มาตรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สภาวะความชื้นต่าง ๆ (ควบคุมความชื้นในช่วง 0-95 %RH) ด้วยเทคนิคเข็มวัด 4 จุด (Four Point Probe Resistivity Measurements) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรดโอเลอิก และน้ำมันทัง ฟิล์มมีการต้านทานน้ำที่ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมีการเชื่อมโยงฟิล์มด้วยการฉายแสง ส่งผลให้ฟิล์มมีค่าความต้านทานน้ำที่สูงขึ้น สำหรับการวัดค่ามุมสัมผัสกับน้ำกลั่นพบว่า พื้นผิวมีการเปียกที่ไม่ดี โดยมีความมุมสัมผัสอยู่ในช่วง 75 -90 องศา เมื่อเติม CoCl_2 ลงในสูตรฟิล์ม พบว่า ฟิล์มสามารถดูดความชื้นได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานมีค่าลดลง จากผลการทดสอบการประกอบวงจรไฟฟ้าพบว่า ฟิล์มทุกสูตรทำให้หลอดไฟ LED ติดที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75 และ 95 %RH ยกเว้นเพียงสูตร P5*90T10 ที่หลอดไฟ LED ติดเฉพาะที่ 95 %RH และมีเพียงฟิล์มสูตร P1*97T3Co สามารถทำให้หลอดไฟ LED มีการติดที่ความชื้นต่ำ (50 %RH) แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการตอบสนองต่อความชื้นที่แตกต่างกันและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความชื้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ : การตอบสนองต่อความชื้น กรดโอเลอิก เซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้น น้ำมันทั้ง
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Development of humidity sensitive films from Oleic acid - modified PVA/Tung oil
Student Name	Mr. Panuwat Duangrussamee
Student ID	59605037
Degree	Master of Science (Polymer Technology)
Department	Chemistry
Year	2019
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Pathavuth Monvisade

Abstract

This thesis aimed to study the development of humidity-sensitive films from oleic acid-modified poly (vinyl alcohol) (P*) and Tung oil (T). P* were prepared by the reaction between poly (vinyl alcohol) and oleic acid at 1, 3 and 5 pph. The weight ratios of P*: T were varied at 97:3, 95:5 and 90:10. The resulting products were then crosslinked by irradiation and redox system. Cobalt chloride as a desiccant was also added. The received films were characterized by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR). Swelling, solid remains, moisture uptake (50-95 %RH), and initial contact angle were also measured. The resistance at different moisture conditions was investigated by 4-point probe resistivity measurements. It was found that the increase the ratios of oleic acid or Tung oil to PVA caused the increase in the water resistance but the decrease in moisture uptake properties and resistance. The results from contact angle test using distilled water showed the initial contact angle of the films in the range between 75-90°, indicating good water resistance properties of the films. The effects of the addition of CoCl₂ into the films was found that the increased moisture uptake and resistance was decreased. The circuit including LED and films was found that LED can responded for all films at 75 and 95 %RH excepted for P5*90T10 (LED responded only at 95 %RH). Only P1*97T3Co films can make the LED responded at low %RH. As a result, the prepared films showed different humidity sensitive properties Which can be applied for humidity sensitive.

Keywords : Humidity sensor, Humidity sensitive, oleic acid, Poly (vinyl alcohol), Tung oil

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ดีด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์ และบุคลากรหลายฝ่ายที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์นี้ ทางคณะผู้จัดทำ จึงขอขอบพระคุณผู้ให้ความช่วยเหลือ ดังนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการดำเนินงานให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้ปรึกษาคำแนะนำ แก้ไข อบรมให้ทำงานอย่างมีระเบียบรอบคอบ พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือตลอดการดำเนินงาน ทำให้การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สุปราณี แก้วภิรมย์ และ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเคมี และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ในการวิเคราะห์และทดสอบชิ้นงานตลอดการดำเนินวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

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

สุดท้ายนี้ ประโยชน์ และความรู้อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา ครอบครัว ผู้มีพระคุณ และคณาจารย์ทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้ศึกษาขออนอมนรับ และขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ภาณุวัฒน์ ดวงรัมย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 फिल्म (Film).....	3
2.1.1 फिल्मยืดพันพาลาเทท (LLDPE).....	3
2.1.2 फिल्मหดพอลิเอทิลีน (PE Shrink Film).....	4
2.1.3 फिल्मโอพีพี (Oriented Film).....	4
2.1.5 फिल्मผนึกสุญญากาศ (Skin Vacuum).....	4
2.1.6 फिल्मพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(Vinyl Alcohol)).....	4
2.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA).....	4
2.2.1 สมบัติทั่วไปของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	5
2.2.2 การเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	6
2.2.3 การใช้งานของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	7
2.3 กรดไขมัน (Fatty Acid) และ น้ำมันธรรมชาติ (Natural Drying Oil).....	7
2.3.1 ชนิดของกรดไขมัน.....	7
2.3.2 น้ำมันธรรมชาติ.....	9
2.3.3 น้ำมันทัง (Tung oil).....	10
2.3.3.1 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันทัง.....	10
2.3.3.2 สมบัติและการใช้งานน้ำมันทัง.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.4 กรดโอเลอิก (Oleic acid).....	11
2.4 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification Reaction).....	12
2.5 ตัวริเริ่มปฏิกิริยาผ่านกลไกอนุมูลอิสระ	13
2.5.1 ระบบรีดอกซ์ (Redox system).....	13
2.5.2 ระบบความร้อน (Thermal system).....	15
2.5.3 ระบบฉายแสง (Photochemical Reaction).....	16
2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst).....	16
2.6.1 หน้าที่หลักและการทำงาน.....	16
2.7 ความชื้น (Humidity).....	17
2.7.1 ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity).....	17
2.7.2 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity).....	18
2.7.3 เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดความชื้น.....	19
2.7.4 การคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าจากเทคนิคเข็มวัดแบบ 4 จุด	19
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	25
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	25
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	25
3.3 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (% W/V).....	27
3.4 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ดัดแปร	27
3.5 การเตรียมสูตรสำหรับขึ้นฟิล์ม.....	28
3.6 การขึ้นรูปฟิล์ม	29
3.7 การทดสอบ (Testing)	30
3.7.1 การทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มสุดท้าย (%Swelling)	30
3.7.2 การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งคงเหลือ (% Solid Remain,)...	30
3.7.3 การทดสอบการดูดความชื้น (Moisture Uptake)	30
3.7.4 การทดสอบมุมสัมผัส (Initial Contact Angle).....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7.5 การวิเคราะห์ชิ้นงานตัวอย่างฟิล์มด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)	31
3.7.6 การตรวจวัดค่าสภาพต้านทานของชิ้นงานด้วยเทคนิคเข็มวัด 4 จุด (Four Point Probe Resistivity Measurements).....	30
3.7.7 การจำลองการประกอบวงจรโดยมีชิ้นงานฟิล์มเป็นส่วนประกอบของวงจร	31
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	33
4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์ม	33
4.1.1 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ในโหมด Transmittance.....	33
4.2 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของฟิล์ม	36
4.2.1 ผลของปริมาณกรดโอเลอิก	36
4.2.1.1 การทดสอบหาค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม.....	36
4.2.1.2 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งที่เหลือ	37
4.2.2 ผลของระบบเชื่อมโยง	38
4.2.2.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม	38
4.2.2.2 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งที่เหลือ	42
4.2.3 ผลของปริมาณน้ำมันทั้ง	43
4.2.3.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม	43
4.2.3.2 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งที่เหลือ	44
4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของฟิล์มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ.....	45
4.3.1 ผลของปริมาณกรดโอเลอิกต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของฟิล์มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ	45
4.3.2 ผลของปริมาณน้ำมันทั้งต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของฟิล์มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ	47
4.3.3 ผลของระบบเชื่อมโยงต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของฟิล์มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ	47
4.3.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิกร่วมกับน้ำมันทั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.5 ผลของการเติม CoCl_2 ต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของฟิล์มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ	48
4.4 การทดสอบมุมสัมผัส (Initial Contact Angle)	48
4.5 ค่าความต้านทานของฟิล์มที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ	50
4.5.1 ผลของปริมาณกรดโอเลอิกต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ	50
4.5.2 ผลของปริมาณน้ำมันทั้งต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ	51
4.5.3 ผลของการเติม CoCl_2 ต่อความสามารถในการตรวจจับความชื้นของฟิล์มที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ.....	53
4.6 การจำลองการประกอบวงจรไฟฟ้าโดยมีฟิล์มสูตรต่าง ๆ เป็นส่วนประกอบของวงจร	55
4.6.1 เวลาการตอบสนองของหลอดไฟ LED ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ.....	57
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุปผลงานวิจัย	58
5.2 ข้อเสนอแนะ	59
บรรณานุกรม.....	60
ภาคผนวก.....	64
ภาคผนวก ก.....	66
ภาคผนวก ข.....	72
ภาคผนวก ค.....	74
ภาคผนวก ง.....	78
ภาคผนวก จ.....	80

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทั่วไปของไปของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	6
2.2 สูตรโครงสร้างของกรดไขมันอิ่มตัว และแหล่งอาหาร	8
2.3 สูตรโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัว จำนวนพันธะคู่ และแหล่งอาหาร	9
2.4 ปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันทั้ง	11
2.5 สมบัติทั่วไปของน้ำมันทั้ง	11
2.6 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของตัวริเริ่มปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ที่แตกตัวโดย ความร้อน	15
2.7 สมบัติของ p-Toluenesulfonic Acid	17
2.8 จุดน้ำค้าง แรงดันไอน้ำ และปริมาณไอน้ำ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ	18
3.1 สมบัติจำเพาะของ PVA ที่ใช้ในการทดลอง	25
3.2 สูตรฟิล์มต่าง ๆ	28
3.2 สูตรฟิล์มต่าง ๆ (ต่อ)	29
4.1 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของฟิล์มที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50-95 %RH	46
4.2 การตอบสนองของหลอดไฟ LED ที่ความชื้นสัมพัทธ์ช่วง 50-95 %RH ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ	56
4.3 เวลาการตอบสนองของหลอดไฟ LED ของฟิล์มสูตร P1*97T3Co, P1*97T3, และP5*90T10 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ	57
ก-1 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตรที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก.	67
ก-2 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตรที่มีการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 1 pph ร่วมกับน้ำมันทั้งเชื่อมโยงด้วยการฉายแสง	67
ก-3 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตรที่มีการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 3 pph ร่วมกับน้ำมันทั้งเชื่อมโยงด้วยการฉายแสง	68
ก-4 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตรที่มีการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 5 pph ร่วมกับน้ำมันทั้งเชื่อมโยงด้วยการฉายแสง	68
ก-5 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตรที่มีการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 1 pph ร่วมกับน้ำมันทั้ง	69
ก-6 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตรที่มีการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 3 pph ร่วมกับน้ำมันทั้ง	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก-7 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตรที่มีการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 5 pph ร่วมกับน้ำมันทั้ง	70
ก-8 ค่าปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ของฟิล์มหลังแช่น้ำกลั่น 24 ชั่วโมง ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ	71
ข-1 ค่าการดูดความชื้นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ	72
ข-1 ค่าการดูดความชื้นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ต่อ)	72
ค-1 ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสที่นาที่เริ่มต้นด้วยน้ำกลั่นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ	74
ง-1 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0 – 95 %RH	78
ง-1 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0 – 95 %RH (ต่อ)	79
จ-1 การตอบสนองของหลอดไฟ LED ที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50-95 %RH ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ	80
จ-1 การตอบสนองของหลอดไฟ LED ที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50-95 %RH ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ต่อ)	81
.....	81

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	5
2.2 การสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซิเตต.....	6
2.3 ผลจากต้นทั้ง.....	10
2.4 โครงสร้างโมเลกุลของประกอบหลักของน้ำมันทั้งที่ถูกไฮโดรไลซ์.....	11
2.5 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	12
2.6 ปฏิกิริยาระหว่างกรดแอสติกกับเอทานอล	12
2.7 การแตกตัวโดยความร้อนของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นอนุมูลอิสระ	15
2.8 โครงสร้างโมเลกุลของ p-Toluenesulfonic Acid	17
2.9 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด	20
3.1 กรอบสกรีน.....	26
3.2 อุปกรณ์ฉายแสงระบบช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น	27
3.3 แบบจำลองการต่อวงจร.....	32
4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PVA, oleic acid, P1*, P3*, และ P5*	33
4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของ P1*, PVA, และ PVA-new	34
4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของ P1*97T3, Tung oil, และ P1*	35
4.4 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และกรดโอเลอิก.....	36
4.5 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตร P1*, P3*, และ P5*	37
4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งที่เหลือหลังแช่น้ำกลั่นที่ 24 ชั่วโมงของฟิล์มสูตร P1*, P3*, และ P5*	38
4.7 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตร P1*, P1*97T3R, และ P1*97T3	39
4.8 ปฏิกิริยาการแตกตัวโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต และโซเดียมไทโอซัลเฟต และทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งอัลโลลิกหรือพันธะคู่ของกรดโอเลอิก และน้ำมันทั้ง	40
4.9 การเชื่อมโยงกันของกรดโอเลอิก.....	41
4.10 การเชื่อมโยงกันของน้ำมันทั้ง.....	41
4.11 การเชื่อมโยงกันระหว่างกรดโอเลอิกและน้ำมันทั้ง	42
4.12 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งที่เหลือหลังแช่น้ำกลั่นที่ 24 ชั่วโมง P1*, P1*97T3R, และ P1*97T3.....	43
4.13 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตร P1*97T3, P1*95T5, และ P1*90T10	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งคงเหลือหลังแช่น้ำกลั่นที่ 24 ชั่วโมงของฟิล์มสูตร P1*97T3, P1*95T5, และ P1*90T10	44
4.15 ตัวอย่างการวัดมุมสัมผัสเริ่มต้นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ	49
4.16 ค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ	50
4.17 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มสูตร P1* และ P3* ที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0-95 %RH...	51
4.18 ค่าความต้านทานไฟฟ้าสูตร P1*97T3, P1*95T5, และ P1*90T10 ของฟิล์มที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0-95 %RH	52
4.19 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0-95 %RH ก) สูตร P3*97T3 และ P1*97T3 ข) สูตร P3*95T5 และ P1*95T5 ค) สูตร P3*90T10 และ P1*90T10	52
4.20 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0-95 %RH ก) สูตร P1* และ P1*Co ข) สูตร P3* และ P3*Co	53
4.21 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0-95 %RH ก) สูตร P1*97T3 และ P1*97T3Co ข) สูตร P1*95T5 และ P1*95T5Co ค) สูตร P1*90T10 และ P1*90T10Co	54
4.22 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0-95 %RH ของสูตรฟิล์มที่มีการเติม CoCl ₂ ลงในเนื้อฟิล์ม	55
4.23 ตัวอย่างการประกอบวงจรไฟฟ้า โดยใช้ฟิล์มสูตร P1*97T3Co เป็นส่วนประกอบของวงจร	56
ค-1 ภาพมุมสัมผัสน้ำกลั่นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ	75

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
PVA	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol))
P*	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยกรดโอเลอิก
<i>p</i> -TSA	กรดพาราโทลูอินซัลโฟนิก (<i>p</i> -Toluene sulfonic acid)
T	น้ำมันทัง (Tung oil)
R	ระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (Visible)
%RH	ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) เป็นตัวแปรทางกายภาพที่ระบุถึงปริมาณของไอน้ำที่มีในอากาศ ซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม, ห้องปฏิบัติการวิจัย, ผลิตภัณฑ์อาหาร, ที่พักอาศัย ฯลฯ เนื่องจากความชื้นในอากาศที่มีมากหรือน้อยเกินไปจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์บางชนิดหรืออาจส่งผลให้สินค้าหรือผลิตภัณฑ์เกิดความเสียหาย จึงจำเป็นต้องมีการตรวจวัดและควบคุมความชื้นเพื่อควบคุมคุณภาพและป้องกันความเสียหายของผลิตภัณฑ์ โดยปกติแล้วการตรวจวัดความชื้นสามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือตรวจวัดความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งจะวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ผ่านค่าความต้านทานหรือค่าความสามารถในการนำไฟฟ้าของวัสดุที่ดูดความชื้นได้จำพวกเซรามิกส์และพอลิเมอร์บางชนิด โดยค่าเหล่านี้จะแปรผันตามค่าความชื้นที่วัสดุดูดเก็บไว้ พอลิเมอร์ที่สามารถเป็นตัวตรวจวัดความชื้นได้ เช่น พอลิอะนิลีน (Polyaniline) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี แต่อย่างไรก็ตามพอลิอะนิลีนมีข้อด้อยคือไม่สามารถหลอมและละลายในตัวทำละลายทั่วไปทำให้ขึ้นรูปชิ้นงานได้ยาก ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนี้ยังมีความเป็นพิษและย่อยสลายได้ยากทำให้พอลิอะนิลีนไม่เหมาะในการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม [1]

พอลิเมอร์อีกชนิดที่สามารถเป็นตัวตรวจวัดความชื้นได้คือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol)) [2] ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ ที่ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น มีสมบัติในการก่อฟิล์มสามารถขึ้นรูปได้ง่าย ละลายน้ำได้ ย่อยสลายได้ทางชีวภาพและมีราคาถูกจึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตเป็นฟิล์มที่ใช้งานทางด้านต่าง ๆ สำหรับงานทางด้านการตรวจวัดความชื้นมีการนำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มาผสมกับพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ เช่นพอลิอะนิลีนแล้วนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์ม หรือเติมสารที่ช่วยนำไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น Rhodamine 6G [3] อนุภาคทองคำก่อนขึ้นรูปเพื่อช่วยเพิ่มความแตกต่างของค่าความต้านทานที่สถานะที่มีความชื้นที่แตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ยังมีการต้านทานน้ำที่ไม่ดี เมื่อนำไปใช้งานในรูปของฟิล์มในสถานะที่มีความชื้นสูง ๆ อาจทำให้เกิดปัญหาการบวมพองและเกิดการละลายได้บางส่วน จึงมีการปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้ [4] ได้พัฒนาฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ให้มีสมบัติการต้านทานที่สูงขึ้น โดยทำการปรับปรุงโครงสร้างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยกรดโอเลอิก และผสมกับน้ำมันลินสีด ก่อนทำการเชื่อมโยงฟิล์มขณะขึ้นรูปด้วยระบบการฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นทำให้ฟิล์มมีความต้านทานน้ำมากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าฟิล์มยังมีสมบัติการต้านทานน้ำที่ไม่เพียงพอทำให้เกิดการละลายบางส่วนเมื่อใช้งานที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ จึงศึกษาการพัฒนาฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ให้ฟิล์มมีสมบัติการต้านทานน้ำยิ่งขึ้นเพื่อช่วยให้ฟิล์มคงรูปได้เมื่อมีการใช้งานที่สภาวะความชื้นสูงโดยทำการปรับปรุงโครงสร้างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยกรดโอเลอิก ผสมกับน้ำมันทั้ง แล้วทำการเชื่อมโยงฟิล์มขณะขึ้นรูปด้วยระบบการฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นร่วมกับระบบปริดออกซ์ จากนั้นนำฟิล์มไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำที่คงอยู่น้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม, ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งคงเหลือ, การดูดความชื้นของฟิล์มในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50–95 %RH , และ มุมสัมผัส นอกจากนี้ยังทำการทดสอบค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 75–95 %RH เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจวัดความชื้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ปรับปรุงสมบัติของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยกรดโอเลอิกและน้ำมันทั้ง ให้มีสมบัติในการต้านทานน้ำ

1.2.2. ศึกษาค่าการดูดความชื้นที่มีผลต่อค่าสภาพความต้านทาน ของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก และน้ำมันทั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 75–95 %RH

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก

1.3.2. เตรียมฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิกและน้ำมันทั้ง เชื่อมโยงฟิล์มขณะขึ้นรูปด้วยระบบการฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นร่วมกับระบบปริดออกซ์

1.3.3 ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำที่คงอยู่น้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม, ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งคงเหลือ, การดูดความชื้นของฟิล์มในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50 – 95 %RH, และ มุมสัมผัส

1.3.4 ตรวจวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ

1.3.5 สร้างแบบจำลองวงจรตรวจวัดความชื้นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก น้ำมันลินสีดและน้ำมันทั้ง ให้มีความสามารถในการต้านทานน้ำได้มากขึ้น

2. ฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้าง สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุตรวจวัดความชื้นได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติก (Film)

ในปัจจุบันมีการใช้งานฟิล์มในชีวิตประจำวันค่อนข้างมาก เช่น ใช้ห่ออาหารสดและอาหารกึ่งสำเร็จรูป ใช้ในการห่อสินค้าหรือการรวมสินค้าเป็นหน่วยเดียวกัน รวมทั้งการห่อสินค้าบนแท่นรองรับ เพื่อให้ง่ายต่อการลำเลียงขนส่งใช้ประโยชน์ในการช่วยยืดอายุสินค้าที่วางขายให้ผู้บริโภคสามารถมองเห็นสินค้าจากภายนอกได้ และช่วยป้องกันสิ่งปนเปื้อนในสินค้าอีกด้วย

ฟิล์มพลาสติกสามารถผลิตได้จากเม็ดพลาสติกหลายชนิด เช่น พอลิพรอพิลีน พอลิเอทิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์ และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นต้น โดยฟิล์มที่ผลิตจากพลาสติกแต่ละชนิดจะมีคุณลักษณะเฉพาะตัวตามสมบัติของฟิล์มที่แตกต่างกันออกไป เช่น สมบัติการทนความร้อน การป้องกันการกักความร้อนจากสารเคมี ป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ การหดตัวเมื่อโดนความร้อน การป้องกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์ ปัจจุบันฟิล์มพลาสติกได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เช่น นำมาผลิตเป็นถุงพลาสติก ของพลาสติก หรือ ถูกนำมาใช้เป็นกระสอบ เป็นต้น โดยฟิล์มพลาสติกที่ใช้สำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์สามารถผลิตได้จากฟิล์มหลากหลายประเภท ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ผลิตและผู้บริโภค เช่น ฟิล์มยืด ฟิล์มหด และฟิล์มลามิเนต เป็นต้น [5]

สารเติมแต่งที่จำเป็นในการผลิตฟิล์ม ได้แก่ สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (Antioxidant) เพื่อป้องกันการสลายตัวของพลาสติกในกระบวนการผลิต สารเกาะติด (Cling Agent) เพื่อช่วยให้ฟิล์มยึดติดกันได้ดีเมื่อนำมาใช้ห่อสินค้า และสารเติมแต่งอื่น ๆ ที่ใช้สำหรับงานเฉพาะทาง เช่น สารป้องกันการเกาะติด (Antiblock Agent) เพื่อป้องกันไม่ให้ฟิล์มเกาะติดกันแน่น สารป้องกันรังสีอัลตราไวโอเลต (UV Inhibitor) เพื่อยืดอายุของฟิล์ม เป็นต้น อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญที่ผู้ใช้งานไม่ควรมองข้าม คือ การเลือกใช้ฟิล์มให้เหมาะสมกับสินค้า หรือ ผลิตภัณฑ์ โดยสมบัติของฟิล์มที่สำคัญในการเลือกใช้โดยส่วนใหญ่ ได้แก่ การต้านทานแรงดึง (Tensile Strength), ความสามารถในการยืดตัว (Stretch Force), อัตราการซึมผ่านก๊าซของฟิล์ม (Gas Transmission Rate) และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water Vapors Transmission) โดยตัวอย่างของฟิล์มประเภทต่าง ๆ แสดงดังนี้

2.1.1 ฟิล์มยืดพันพาเลท (LLDPE)

เป็นฟิล์มที่มีลักษณะใส เหนียว ไม่ฉีกขาดง่าย แม้ทำการห่อสินค้าที่มีมุมแหลม และสามารถยืดได้ค่อนข้างมากประมาณ 3 ถึง 4 เท่า เหมาะสำหรับห่อหุ้มสินค้าที่มีขนาดใหญ่ เพื่อบรรวมหน่วยของสินค้าให้สะดวกในการขนย้ายมากขึ้น รวมถึงมีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ และฝุ่นละอองให้กับสินค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 พิล์มหดพอลิเอทิลีน (PE Shrink Film)

เป็นฟิล์มที่มีลักษณะขุ่น เหนียว แข็งแรงเป็นพิเศษ สามารถรับน้ำหนักสินค้าได้ดี เหมาะสำหรับงานห่อสินค้า หรือ ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

2.1.3 พิล์มโอพีพี (Oriented Film)

เป็นฟิล์มใส มีความบาง เป็นชนิดที่พ่นด้วยความร้อน แต่มีสมบัติที่ทนทานมากกว่าฟิล์มที่ผลิตด้วยกรรมวิธีอื่น ๆ จึงเหมาะสำหรับเครื่องบรรจุหีบห่อที่มีความเร็วสูง เนื่องจากสามารถทนแรงดึงของเครื่องได้ และไม่เกิดการฉีกขาดง่าย

2.1.4 พิล์มเคลือบเมทัลไลซ์ (Metallized Film)

เป็นการนำฟิล์มมาพ่นเคลือบด้วยละอองอะลูมิเนียม โดยระบบสุญญากาศใช้กับบรรจุภัณฑ์งานพิมพ์ระบบกราเวียร์ทั่วไป โดยมีสีเงินซึ่งจะสร้างความโดดเด่นให้กับผลิตภัณฑ์ และช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์

2.1.5 พิล์มพนักสุญญากาศ (Skin Vacuum)

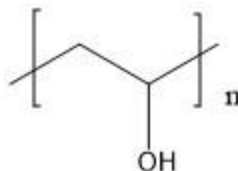
เป็นฟิล์มที่มีความใส เหนียว แข็งแรง มีสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของอากาศได้ดี และสามารถแนบติดกับสินค้าที่บรรจุภายในได้ เสมือนเป็นชั้นผิวหนึ่ง เนื่องจากบรรจุด้วยระบบสุญญากาศ จึงสามารถรักษาความสดใหม่ให้กับสินค้าได้ยาวนานมากขึ้น

2.1.6 พิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(Vinyl Alcohol))

เป็นฟิล์มที่มีความใส ไม่เป็นพิษ มีความแข็งแรงดี และมีความยืดหยุ่นสูง สามารถต้านทานการซึมผ่านของออกซิเจน และกลิ่นได้ดี รวมถึงมีความโปร่งแสง มีความทนทานต่อสารเคมีได้ดี สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม [6]

2.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกที่ได้จากการสังเคราะห์ จัดเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ไม่มีกลิ่น ไม่มีรสชาติ มีการยึดติดที่ดี ทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำมัน สามารถละลายในน้ำได้ นอกจากนี้ ยังเป็นพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการเข้ากันกับ เนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (Biocompatibility) ได้ดี และไม่เป็นพิษ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีสมบัติทางกายภาพที่ดี เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิล และพันธะไฮโดรเจน จึงสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ดี มีความโปร่งแสง และทนทานต่อสารเคมีได้ดี มีความเค้นแรงดี และความยืดหยุ่นสูง มีสมบัติป้องกันการระเหยของกลิ่น และน้ำมัน รวมถึงมีสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านของออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง [7-8] พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

2.2.1 สมบัติทั่วไปของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

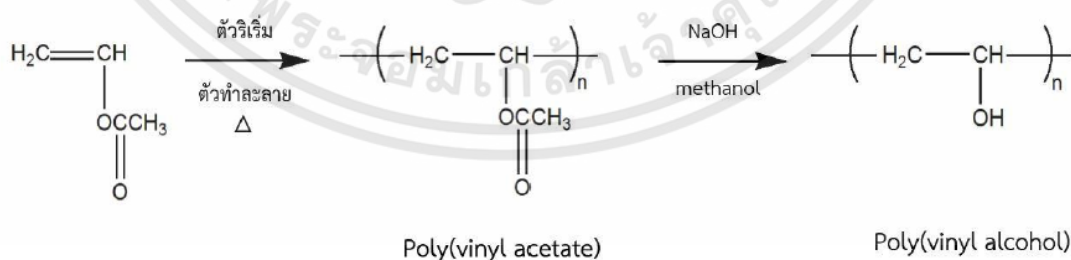
สมบัติของ PVA ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและระดับการไฮโดรไลซิส (degree of hydrolysis) PVA ที่มีระดับการไฮโดรไลซิสสูง จะมีความสามารถทนต่อแรงกระทำได้ดีกว่า PVA ที่มีระดับการไฮโดรไลซิสต่ำ เพราะ PVA ที่มีระดับการไฮโดรไลซิสสูงมีความเป็นผลึกสูงกว่า และสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้มากกว่า นอกจากนี้สมบัติกายภาพของ PVA ยังขึ้นกับความชื้นของสิ่งแวดล้อม เมื่ออากาศมีความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นความสามารถในการทนต่อแรงดึงของ PVA จะลดลง แต่ความสามารถในการยืดตัวออกจะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PVA ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีความชื้นต่ำ สำหรับความสามารถในการละลายน้ำ PVA สามารถละลายในน้ำได้ โดยละลายอย่างช้า ๆ ในน้ำเย็น ละลายเร็วขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และสามารถละลายได้หมดที่อุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส ความสามารถในการละลายขึ้นกับระดับการไฮโดรไลซิสของโมเลกุลเช่นกัน โดย PVA สามารถละลายในน้ำได้ดีที่สุดเมื่อมีระดับการไฮโดรไลซิสประมาณร้อยละ 80 สำหรับผลของน้ำหนักโมเลกุล PVA จะละลายน้ำได้มากขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลลดลง แต่ความแข็งแรง ความต้านทานต่อการดึงยึด ความทนต่อการฉีกขาด และความสามารถในการอ่อนตัวดีขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น PVA สามารถต้านทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไปได้เป็นอย่างดี และความสามารถนี้จะเพิ่มขึ้นตามระดับการไฮโดรไลซิสที่สูงขึ้น PVA ที่มีปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลสูง จะไม่ละลายในไฮโดรคาร์บอน เอสเทอร์ และ คีโตน เป็นต้น เนื่องจากสภาพขั้วที่แตกต่างกัน แต่จะละลายใน เอทิลีนไกลคอล และกลีเซอรอล เป็นต้น [9]

ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของไปของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

สมบัติ	ค่า
ลักษณะภายนอก	เป็นผงสีขาวจนถึงสีครีม
มวลโมเลกุล	120,000 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่น	1.298 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว	80 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	180-190 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	228 องศาเซลเซียส
ความคงทนต่อน้ำมัน	ไม่ละลายในน้ำมัน
ความคงทนต่อสารละลาย	ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์
ความคงทนต่อกรด-เบส	ละลายได้ทั้งในกรดและเบส
การย่อยสลาย	86.5-89 เปอร์เซ็นต์

2.2.2 การเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

PVA ไม่สามารถสังเคราะห์ผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของไวนิลแอลกอฮอล์ได้ เนื่องจากมอนอเมอร์ดังกล่าวไม่เสถียร มีการเปลี่ยนรูปอยู่ในโครงสร้างไอโซเมอร์ในรูปแบบอื่นที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ ซึ่งเกิด Automerized ในรูปของ Acetaldehyde ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เสถียรกว่า ดังนั้นในการสังเคราะห์ PVA จึงเตรียมจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของไวนิลอะซิเตต จากนั้นนำพอลิไวนิลอะซิเตตที่ได้ ไปผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอล ทำปฏิกิริยากับพอลิไวนิลอะซิเตต เพื่อเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันจากหมู่อะซิเตตไปเป็นหมู่ไฮดรอกซี ซึ่งจะส่งผลให้สภาพขั้วของพอลิเมอร์นั้นเพิ่มขึ้น และความสามารถในการละลายน้ำดีขึ้น การสังเคราะห์ PVA ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซิเตต แสดงดังรูปที่ 2.2 [10-12]



รูปที่ 2.2 การสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซิเตต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การใช้งานของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

PVA จัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติการละลายน้ำที่ดี เมื่อละลายน้ำแล้วจะได้สารละลายที่มีลักษณะใสและหนืด จึงนิยมนำมาใช้เป็นสารข้น (Thickening agent) ในระบบอิมัลชันและสารแขวนลอยต่างๆ เมื่อนำ PVA มาทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงทางเคมีจะทำให้ PVA ไม่สามารถละลายน้ำได้ซึ่งสามารถนำมาใช้งาน เช่น ใช้เป็นเส้นใยแทนผ้าฝ้าย ใช้ทำฟิล์มเคลือบที่มีความเหนียวและทนต่อการขีดข่วน นอกจากนี้ยังมีการใช้งาน PVA ในรูปแบบอื่น ๆ เช่น ใช้เป็นวัสดุยึดติด (Adhesive material) ใช้เป็นสารตัวเติม (Filler) ในอุตสาหกรรมกระดาษ ใช้เป็นตัวประสาน (Binder) และใช้ผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ เพื่อประยุกต์ใช้งานเฉพาะทาง เป็นต้น [13]

2.3 กรดไขมัน (Fatty Acid) และ น้ำมันธรรมชาติ(Natural Drying Oil)

กรดไขมันเป็นกรดอินทรีย์ที่ประกอบด้วยคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) กรดไขมันมีจำนวนคาร์บอนอย่างน้อย 8 อะตอม และส่วนใหญ่เป็นจำนวนเลขคู่ เพราะกระบวนการสังเคราะห์ของกรดไขมันเป็นการเพิ่มโมเลกุลของอะซิเตต ซึ่งมีคาร์บอนอยู่ 2 อะตอม โดยกรดไขมันมีสูตรโครงสร้างโดยทั่วไปเป็น $R-COOH$ ลักษณะสูตรโครงสร้างของกรดไขมันประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เรียกว่า คาร์บอกซิล ($-COOH$) ซึ่งประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) อีกส่วนหนึ่งเรียกว่า สายโซ่ไฮโดรคาร์บอน (R) โดยมีธาตุคาร์บอนทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวกันเป็นสายโซ่ โดยปกติแล้วธาตุคาร์บอนจะมีอยู่ 4 แขน แขนที่เหลือจากการจับธาตุคาร์บอนด้วยกันจะไปจับกับธาตุไฮโดรเจน กรดไขมันมีอยู่หลายชนิด ทุกชนิดจะมีหน่วยคาร์บอกซิลอยู่หนึ่งหน่วยเหมือนกัน ส่วนที่แตกต่างคือ ลักษณะทางเคมีในส่วนของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนหรืออะลิฟาติก ทำให้กรดไขมันมีสมบัติที่แตกต่างกันไป ในอุตสาหกรรมกรดไขมันผลิตโดยการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) พันธะเอสเทอร์ในไขมัน หรือ น้ำมันในรูปของไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ด้วยการกำจัดกลีเซอรอลออกไป กรดไขมันที่พบในไขมัน และน้ำมัน ตามธรรมชาติจะอยู่ในรูปของเอสเทอร์ (Ester) ส่วนกรดไขมันที่พบในพลาสติกจะอยู่ในรูปอิสระ โดยจับอยู่กับแอลูมิเนียม กรดไขมันมักมีโครงสร้างเป็นสายตรง ไม่แตกแขนง สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนของกรดไขมันอาจจะมีพันธะคู่ หรือไม่มีก็ได้ ดังนั้นจึงแบ่งกรดไขมันออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated Fatty Acid) และกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated Fatty Acid) [14]

2.3.1 ชนิดของกรดไขมัน

กรดไขมันแบ่งได้ 2 ชนิดคือ

1) กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated Fatty Acid)

เป็นกรดไขมันที่มีโครงสร้างอะตอมคาร์บอน และไฮโดรเจนเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเดี่ยวตลอดสายโซ่ของไฮโดรคาร์บอน เป็นกรดไขมันที่โมเลกุลมีคาร์บอนกับไฮโดรเจนจับเกาะอยู่เต็มที่แล้ว ไม่สามารถรับไฮโดรเจนหรือธาตุอื่นเข้าไปในโมเลกุลได้อีก โดยที่สายโซ่ไฮโดรคาร์บอน เท่ากับ C_nH_{2n+1} และ n เป็นตัวเลขที่แสดงถึงจำนวนคาร์บอนอะตอม กรดไขมันชนิดนี้ พบมากในไขมันสัตว์ น้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปาล์ม และน้ำมันมะพร้าว เป็นต้น ซึ่งกรดไขมันอิ่มตัวมีความเสถียร ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้ไม่เกิดการเหม็นหืนจากออกซิเจน (Lipid Oxidation) มีจุดหลอมเหลว (Melting Point) สูง เมื่อเปรียบเทียบกับกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Fatty Acid) ที่มีจำนวนคาร์บอนเท่ากัน [15] ตัวอย่างกรดไขมันอิ่มตัวแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของกรดไขมันอิ่มตัว และแหล่งอาหาร [15]

ชื่อกรดไขมันอิ่มตัว	สูตรโครงสร้าง	แหล่งอาหาร	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
กรดบิวไทรริก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$	เนย และไขมันเนย	-7.9
กรดคาโปรอิก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{COOH}$	เนย และไขมันเนย	-3.4
กรดคาปโรอิก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$	น้ำมันมะพร้าว และไขมันนม	16.7
กรดคาปริก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$	น้ำมันปาล์ม	31.3-31.6
กรดลอริก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	น้ำมันมะพร้าว	44.0-44.2
กรดไมริสติก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	น้ำมันมะพร้าวไขมันสัตว์	53.9-54.4
กรดปาล์มิติก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	น้ำมันพืช และไขมันสัตว์	62.7-63.1
กรดสเตียริก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	น้ำมันพืช และไขมันสัตว์	69.6
กรดอะราซิดิก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{COOH}$	น้ำมันถั่วลิสง	75.4-76.5
กรดอีฮีนิก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{20}\text{COOH}$	น้ำมันถั่วลิสง	80.0-81.5
กรดลิกโนซีริก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{22}\text{COOH}$	น้ำมันถั่วลิสง	84.2-86.0

2) กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated Fatty Acids)

เป็นกรดไขมันที่มีพันธะคู่อยู่บนสายโซ่โครงสร้างคาร์บอน ตำแหน่งพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว มีโครงสร้าง 2 แบบ คือ แบบซิส และแบบทรานซ์ โดยส่วนใหญ่กรดไขมันไม่อิ่มตัวจะมีพันธะคู่อยู่ในรูปแบบซิส ในธรรมชาติจะพบกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากที่สุด และมักพบว่าพันธะคู่จะอยู่ระหว่างอะตอมของคาร์บอนตำแหน่งที่ 9 และ 10 โดยกรดไขมันไม่อิ่มตัวจำแนกออกได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของโครงสร้างและจำนวนพันธะคู่ ดังนี้ 1) กรดไขมันที่มี 1 พันธะคู่ (Monounsaturated Fatty Acids) เป็นกลุ่มที่มีพันธะคู่เพียง 1 พันธะ โดยกรดไขมันที่มีมากที่สุดในร่างกาย คือ กรดปาล์มิตอเลอิก (Palmitoleic, C16:1) และกรดโอเลอิก (Oleic acid, C18:1) 2) กรดไขมันที่มีมากกว่า 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พันธะคู่ (Polyunsaturated Fatty Acids) เป็นกลุ่มที่มีพันธะคู่มากกว่า 2 พันธะขึ้นไป โดยปกติพันธะคู่ของกรดไขมันจะไม่อยู่ในตำแหน่งที่ติดกันจะมีหมู่ Methylene (-CH₂-) คั่นกลาง ตัวอย่างเช่น กรดลิโนเลอิก (Linoleic, C18:2) กรดลิโนเลนิก (Linolenic, C18:3) และกรดอะแรชีดิก (Arachidonic, C20:4) เป็นต้น ตัวอย่างกรดไขมันไม่อิ่มตัวแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สูตรโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัว จำนวนพันธะคู่ และแหล่งอาหาร [14-17]

ชื่อกรดไขมันไม่อิ่มตัว	สูตรโครงสร้าง	จำนวนพันธะคู่	แหล่งอาหาร	จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
กรดปาลมิโตเลอิก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	1	เนย	0-0.5
กรดโอเลอิก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	1	น้ำมันมะกอก	10.5-16.0
กรดลิโนเลอิก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	2	น้ำมันลินสีด	-5.0
กรดลิโนเลนิก	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	3	น้ำมันลินสีด	-11.0
กรดอะแรชีดิก	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=(\text{CHCH}_2\text{CH})_3=\text{CH}(\text{CH}_2)_3\text{COOH}$	4	เลซิทิน	-49.5

2.3.2 น้ำมันธรรมชาติ

น้ำมันธรรมชาติอาจแบ่งตามสมบัติในการแห้งตัว ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความไม่อิ่มตัวของกรดไขมันที่มีอยู่ในน้ำมันนั้น ๆ โดยแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

1) น้ำมันแห้งเร็ว (Drying Oil) เป็นน้ำมันที่แห้งตัวได้เร็วที่สุด สามารถดูดออกซิเจนในอากาศแล้วเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เปลี่ยนสภาพจากของเหลวเป็นฟิล์มที่แห้งแข็ง ซึ่งไม่ละลายในตัวทำละลาย รวมถึงไม่ยอมให้ความชื้นซึมผ่านได้ และมีความทนทานต่อสารเคมี น้ำมันชนิดนี้ ส่วนใหญ่ประกอบด้วยกรดไขมันที่มีพันธะคู่อยู่ 3 พันธะต่อสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน 1 สายโซ่ ตัวอย่างน้ำมันแห้งเร็ว เช่น น้ำมันลินสีด น้ำมันทัง เป็นต้น

2) น้ำมันแห้งช้า (Semi-Drying Oil) จะดูดออกซิเจนจากอากาศได้น้อย และเกิดเป็นฟิล์มที่แห้งได้ช้ากว่าน้ำมันแห้งเร็ว โดยกรดไขมันที่มีอยู่ในน้ำมันชนิดนี้ ส่วนใหญ่จะมีพันธะคู่อยู่ 2 พันธะต่อสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน 1 สายโซ่ น้ำมันชนิดนี้ นำมาใช้เป็นสารประกอบในอัลคิลเรซินที่ไม่ขึ้นเหลือง (Non-Yellowing Alkyl) ตัวอย่างของน้ำมันแห้งช้า เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันดอกคำฝอย เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) น้ำมันไม่แห้ง (Non-Drying Oil) เป็นน้ำมันที่ไม่สามารถแห้งตัวได้ โดยน้ำมันชนิดนี้ประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวเป็นส่วนใหญ่หรือมีพันธะคู่ต่อสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนน้อย มักใช้ประโยชน์เป็นพลาสติกไซเซอร์สำหรับเรซินที่ใช้เป็นสารยึดติดในแลกเกอร์ ตัวอย่างของน้ำมันไม่แห้ง เช่น น้ำมันละหุ่ง เป็นต้น [18]

2.3.3 น้ำมันทัง (Tung oil)

น้ำมันทังได้มาจากต้นทัง หรือมะเยา มีถิ่นกำเนิดในประเทศจีน ขึ้นทางแถบลุ่มแม่น้ำแยงซีเกียง ปลูกในพื้นที่หลายมณฑลของประเทศจีน เพราะเป็นไม้มีค่าทางเศรษฐกิจ ปลูกกันบ้างทางภาคเหนือของไทย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Vernicia Montana Lour อยู่ในวงศ์ Euphobiaceae เป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง ความสูง 10-20 เมตร ใบมีขนาดใหญ่ สีเขียวเข้มลักษณะ คล้ายรูปหัวใจ มีดอกตัวผู้และดอกตัวเมียในช่อเดียวกัน สีขาวแต่มีชมพูเข้มปนเหลือง ผลค่อนข้างกลม เมื่อสดมีสีเขียว ขนาด 4 - 4.5 เซนติเมตร หนึ่งผลประกอบด้วยเมล็ด 3 เมล็ด ผลจะแก่ในราว ปลายเดือนกันยายนถึงต้นเดือนพฤศจิกายน ผลแก่จะร่วงหล่นลงดินให้เก็บได้ระหว่างเดือนธันวาคม-มกราคมผลแก่เมื่อทิ้งไว้ 2-3 วัน จะเปลี่ยนสีเป็นน้ำตาลดำให้ผลภายใน 2-3 ปี เมล็ดมีลักษณะกลมแบน ผิวขรุขระ [19]



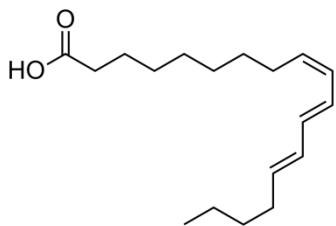
รูปที่ 2.3 ผลจากต้นทัง

2.3.3.1 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันทัง

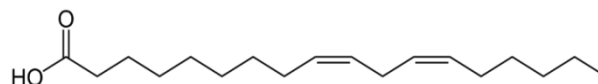
เมื่อนำน้ำมันทังมาไฮโดรไลซิสจะได้กรดไขมันดังนี้ [20]

- 1) กรดอิลิโอเสตริยลิก เป็นกรดไขมันที่มีปริมาณมากที่สุด มีพันธะคู่ 3 ตำแหน่งซึ่งอยู่ในระบบคอนจูเกตที่ตำแหน่งคาร์บอน 9-10 cis, 11-12 trans และ 13-14 trans
- 2) กรดลิซิโนเลอิก มีพันธะคู่ 2 ตำแหน่ง แต่ไม่เป็นระบบคอนจูเกต
- 3) กรดโอเลอิก มีพันธะคู่ 1 ตำแหน่ง
- 4) กรดปาล์มิติก ไม่มีพันธะคู่อยู่ภายในโครงสร้าง

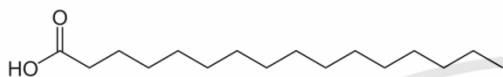
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



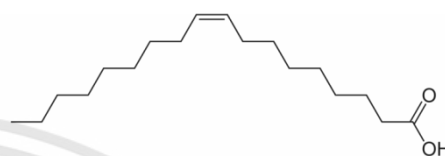
ก) กรดอิลีโอเสตริยลิก



ข) กรดลินอเลอิก



ค) กรดปาล์มิติก



ง) กรดโอเลอิก

รูปที่ 2.4 โครงสร้างโมเลกุลองค์ประกอบหลักของน้ำมันทั้งที่ถูกไฮโดรไลซ์

ตารางที่ 2.4 ปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันทั้ง [20]

กรดไขมัน	ปริมาณ(%โดยน้ำหนัก)
กรดอิลีโอเสตริยลิก	82.0
กรดลินอเลอิก	8.5
กรดปาล์มิติก	5.5
กรดโอเลอิก	4.0

2.3.3.2 สมบัติและการใช้งานของน้ำมันทั้ง

สมบัติพิเศษของน้ำมันทั้งคือสามารถเกิดพอลิเมอร์ไรซ์โดยตรงจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไดอีน (Diene synthesis) เนื่องจากน้ำมันทั้งมีกรด อีลาสโตริก อยู่ในปริมาณที่สูง ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายเนื่องจากมีระบบคอนจูเกตในสายโซ่ น้ำมันทั้งมีการเชื่อมโยงที่เร็วกว่าน้ำมันลินสีดและเชื่อมโยงกันได้แข็งแรงกว่า เมื่อให้ความร้อนแก่น้ำมันทั้งที่อุณหภูมิสูง ๆ เป็นเวลานานจะเกิดปฏิกิริยาการเกิดเจล (Gelation) โดยทั่วไปน้ำมันทั้งจะมีสมบัติดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติทั่วไปของน้ำมันทั้ง [22]

สมบัติ	ค่า
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ที่ 20 °C	0.9375
ความชื้นและสิ่งเจือปน	0.01%
จุดวาบไฟ (Flash Point)	288.9 °C
อุณหภูมิติดไฟโดยอัตโนมัติ (Auto ignition Temperature)	457.0 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันทังนิยมใช้ในงานสี โดยใช้เป็นส่วนที่กั้นน้ำ หรือส่วนประกอบของปูนรอยต่อกระเบื้อง (Caulk) ใช้เป็นส่วนประกอบของหมึกดำ (Indian ink) และยังใช้เป็นน้ำมันทำให้เงาในงานไม้ (Lustous finish on wood) ที่มีสมบัติแห้งเร็วโดยน้ำมันทังถือเป็นน้ำมันธรรมชาติที่ใช้กับไม้ได้ดีที่สุด

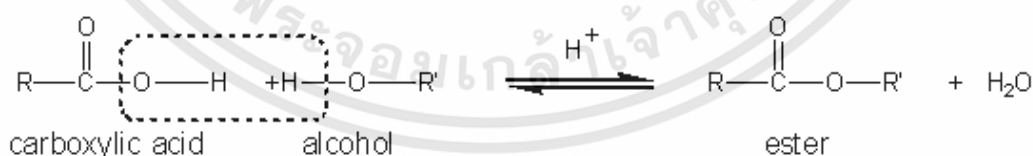
2.3.4 กรดโอเลอิก (Oleic acid)

กรดโอเลอิกเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวพบมากในน้ำมันพืช เช่น น้ำมันมะกอก นอกจากนี้ ยังพบในน้ำมันพีแคนคาโนลา น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันแมคคาเดเมีย และน้ำมันดอกทานตะวัน เมื่อนำมาผ่านกระบวนการสะaponิฟิเคชันจะได้กรดไขมันออกมา มีลักษณะเป็นของเหลวใส กรดไขมันชนิดนี้ ทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทั้งที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิสูง จึงเหมาะแก่การนำมาศึกษาในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับ พอลิไวนิลแอกอฮอล์

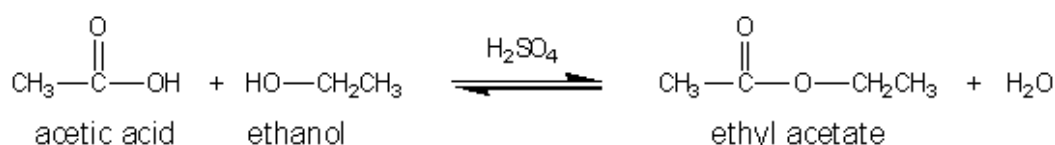
กรดโอเลอิกมีชื่อทางเคมีว่า Octadecenoic Acid จัดเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว ที่มีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะคู่ 1 ตำแหน่งที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 9 จัดเป็น Monounsaturated Fatty Acid ดังนั้นรูปร่างที่ถูกต้องของโมเลกุลกรดโอเลอิกจึงไม่เป็นเส้นตรง แต่จะมีลักษณะหักมุมที่ตำแหน่งพันธะคู่ ดังรูปที่ 2.4 (ง) ลักษณะทั่วไปของกรดโอเลอิกคือ ไม่มีสีและไม่มีกลิ่นแต่ในทางการค้าจะถูกแต่งเติมให้มีสีเหลือง [23-24]

2.4 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification Reaction)

ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาที่เตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดอินทรีย์ที่มีหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) กับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติเป็นกรดเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์ และน้ำ สามารถเขียนสมการทั่วไปของการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน แสดงดังรูป 2.5 ตัวอย่างปฏิกิริยาระหว่างกรดแอสติกกับเอทานอล ที่อุณหภูมิสูง โดยมีกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาระหว่างกรดแอสติกกับเอทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอสเทอร์สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอกซิลิกและแอลกอฮอล์ โดยเป็นการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ของปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน [25-27]

2.5 ตัวริเริ่มปฏิกิริยาผ่านกลไกอนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระจะเกิดขึ้นได้โดยอาศัยตัวริเริ่มปฏิกิริยาประเภทต่าง ๆ เช่น ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกตัวโดยความร้อน (Thermal Initiator) ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกตัวโดยใช้แสง (Photo Initiator) และตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่แตกตัวโดยผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Initiator) นอกจากนี้ในบางกรณีสารตั้งต้นบางชนิด เช่น มอนอเมอร์บางชนิดอาจเกิดปฏิกิริยาขึ้นเริ่มต้นได้ด้วยตัวเอง (Self-Initiation) ซึ่งนำไปสู่ผลิตภัณฑ์เป็นพอลิเมอร์ได้ [28]

2.5.1 ระบบรีดอกซ์ (Redox system)

ปฏิกิริยารีดอกซ์ คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการให้ และรับอิเล็กตรอน ที่ประกอบด้วย 2 ครึ่งปฏิกิริยา (Half-Reaction) เกิดขึ้นพร้อมกันดังนี้ [29]

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 ตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing Agent) แสดงดังสมการที่ 2.2



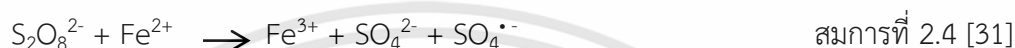
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชัน สามารถให้อนุมูลอิสระที่สามารถริเริ่มปฏิกิริยาได้ ซึ่งข้อดีของการริเริ่มด้วยระบบรีดอกซ์ คือ การผลิตอนุมูลอิสระที่สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิในช่วงที่กว้าง ทำให้สามารถที่จะเลือกอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาได้มากกว่าการใช้อุณหภูมิ ในการสลายตัวของตัวริเริ่ม โดยปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์จะประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์ และ/หรืออนินทรีย์ บางระบบมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนโดยตรงกับตัวออกซิไดซ์ และตัวรีดิวซ์ ในขณะที่บางระบบเกิดเป็นสารประกอบระหว่างตัวรีดิวซ์กับตัวออกซิไดซ์ ซึ่งจะแตกตัวให้อนุมูลอิสระต่อไป ตามชนิดตัวริเริ่มแบบรีดอกซ์ ดังนี้ [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) เปอร์ออกไซด์ที่ร่วมกับสารรีดิวซ์ เช่น ปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide) กับ เฟอร์รัสไอออน (Ferrous Ion) แสดงดังสมการที่ 2.3



2) การรวมกันของสารรีดิวซ์อินทรีย์ และสารออกซิไดซ์อินทรีย์ แสดงตัวอย่างดังสมการที่ 2.4

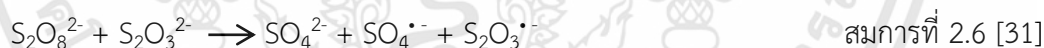


3) คูรีดอกซ์อินทรีย์-อนินทรีย์ หรือรีดอกซ์คู่อื่น ๆ เช่น ปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอลกอฮอล์กับ Ce^{4+} แสดงดังสมการที่ 2.5



4) มีระบบสารเริ่มต้นบางระบบที่สารตั้งต้นจะทำปฏิกิริยากันเสมือนกับเป็นสารหนึ่งในคูรีดอกซ์ เช่น ไทโอซัลเฟต (Thiosulfate) ร่วมกับอะคริลาไมด์ เป็นต้น

โดยในงานวิจัยนี้ ได้มีการนำสารโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต และสารโซเดียมไทโอซัลเฟตมาใช้เป็นสารก่อให้เกิดพันธะเชื่อมโยงในพอลิเมอร์ซึ่งแสดงการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต และสารโซเดียมไทโอซัลเฟตพอสังเขปดังสมการที่ 2.6



ในกรณีที่ใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยใช้ตัวรีดิวซ์ เช่น Fe^{2+} ร่วมด้วย ปฏิกิริยาจะเกิดผ่านการถ่ายเทอิเล็กตรอนจาก Fe^{2+} ไปยังสารประกอบเปอร์ออกไซด์ และทำให้สารประกอบดังกล่าวแตกออกที่พันธะเปอร์ออกซี ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอนุมูลอิสระ สารประกอบไอออนลบ และ Fe^{3+} แสดงดังสมการที่ 2.7



มีข้อสังเกตว่า ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์ส่วนใหญ่จะสามารถละลายได้ในน้ำ ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยผ่านวิธีแบบอิมัลชันได้ดี [29]

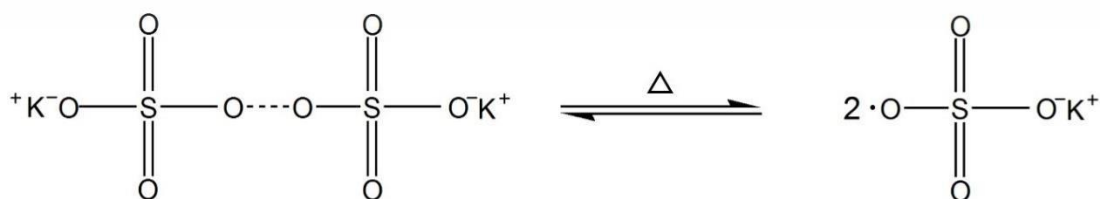
2.5.2 ระบบความร้อน (Thermal system)

การแตกตัวโดยอุณหภูมิหรือความร้อนของตัวริเริ่มมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง ในการผลิตอนุมูลอิสระสำหรับการเริ่มต้นของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยตัวริเริ่มต่างกันจะใช้อุณหภูมิในการแตกตัวที่ต่างกันออกไป ในระบบความร้อนตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะมีการแตกตัวด้วยความร้อน ซึ่งมักเป็นสารประกอบประเภทเปอร์ออกไซด์ เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl Peroxide), ไดอะเซทิลเปอร์ออกไซด์ (Diacetyl Peroxide) และไดเทอร์เทียริบิวทิลเปอร์ออกไซด์ (Di-*t*-butyl peroxide) รวมถึงโพแทสเซียมเปอร์ออกซีไดซัลเฟต (Potassium Peroxydisulfate) หรือ โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (Potassium Persulfate) และกรดเปอร์อะซิติก (Peracetic Acid) เป็นต้น โดยสารเปอร์ออกไซด์จะเกิดการแตกตัวได้ที่ตำแหน่งพันธะระหว่างอะตอมออกซิเจนกับออกซิเจน ซึ่งตัวริเริ่มปฏิกิริยาแต่ละชนิดจะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแตกตัวที่ต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของตัวริเริ่มปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ที่แตกตัวโดยความร้อน [32-33]

ชื่อ	อุณหภูมิที่แตกตัว (องศาเซลเซียส)
เอโซ-บิสไอโซบิวไทลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	20-100
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	30-80
ไดเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์	40-90
ควินิวเปอร์ออกไซด์	50-100
ไดเทอร์เทียริบิวทิลเปอร์ออกไซด์	80-150

ตัวอย่าง เช่น โพแทสเซียมเปอร์ออกซีไดซัลเฟต หรือ โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ซึ่งจัดเป็นสารประกอบอนินทรีย์ ที่มีลักษณะเป็นผลึกของแข็งสีขาว สามารถละลายในน้ำได้ มีน้ำหนักโมเลกุล 270.322 กรัมต่อโมล ความหนาแน่นเท่ากับ 2.477 กรัมต่อมิลลิลิตร และจุดหลอมเหลวน้อยกว่า 100 องศาเซลเซียส เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่เกิดการแตกตัวโดยความร้อนระหว่างอะตอมของออกซิเจนกับออกซิเจนเกิดเป็นอนุมูลอิสระที่ตำแหน่งอะตอมของออกซิเจน แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.7 การแตกตัวโดยความร้อนของโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นอนุมูลอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 ระบบฉายแสง (Photochemical Reaction)

ในระบบฉายแสงจะเกิดปฏิกิริยาเคมีทางแสง ที่สภาวะกระตุ้น (Excited State) โดยมีเพียงบางโมเลกุลเท่านั้นที่ได้รับพลังงาน ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาเคมีทางแสงจะเกิดเฉพาะกับโมเลกุลที่ได้รับแสงแล้วจึงเกิดสารผลิตภัณฑ์ อะตอมหรือโมเลกุลที่ได้รับแสงในช่วงรังสีUltraviolet (UV) หรือช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (Visible) แล้วจะเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น การคายพลังงานออกมาในรูปแสงฟลูออเรสเซนซ์ หรือ เปลี่ยนเป็นพลังงานภายในเพื่อเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น แสดงดังสมการที่ 2.8



แสงที่ความยาวคลื่นช่วง : UV – VIS (200-800 nm)

เมื่อ M : อะตอมหรือโมเลกุลในสภาวะพื้น (Ground State)

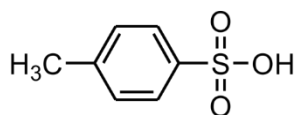
M* : อะตอมหรือโมเลกุลในสภาวะกระตุ้น (Excited State)

ตัวอย่างของตัวริเริ่มปฏิกิริยาประเภทนี้ ได้แก่ เมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange) ซึ่งนิยมใช้เป็น Photosensitizer ในปฏิกิริยาเคมีที่ใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นซึ่งสามารถให้อนุมูลอิสระได้ โดยสารดังกล่าวเมื่อได้รับแสงจะถูกกระตุ้น ทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลเปลี่ยนจากสถานะพื้น (Ground State) ไปยังสถานะกระตุ้น (Excited State) ซึ่งไม่เสถียรจึงคายพลังงานออกมาอยู่ในรูปพลังงานแสง และจะกลับคืนสู่สถานะพื้นในรูปของอนุมูลอิสระ โดยเมทิลออเรนจ์ (Methyl Orange) สามารถเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น [34]

2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

2.6.1 หน้าที่หลักและการทำงาน

ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารที่เติมลงไปในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น หรือทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาดำเนินไปหรือไม่ก็ได้แต่เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาตัวเร่งต้องมีปริมาณเท่าเดิมและมีสมบัติเหมือนเดิม การที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาให้ต่ำลง ทำให้โมเลกุลมีพลังงานสูง หรือเท่ากับพลังงานก่อกัมมันต์โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดได้เร็ว แต่ไม่ทำให้พลังงานของปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ กรดพาราโทลูอินซัลโฟนิก (*p*-Toluenesulfonic Acid (*p*-TSA)) มีลักษณะเป็นของแข็ง สามารถละลายน้ำและตัวทำละลายอื่น ๆ ได้ โดยโครงสร้างและสมบัติบางประการของ กรดพาราโทลูอินซัลโฟนิก [35-36] แสดงดังรูป 2.5 และตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.8 โครงสร้างโมเลกุลของ *p*-Toluenesulfonic Acid

ตารางที่ 2.7 สมบัติของ *p*-Toluenesulfonic Acid [37]

สมบัติ	ค่า
น้ำหนักโมเลกุล	172.20 กรัมต่อโมล
สูตรโมเลกุล	C ₇ H ₈ O ₃ S
ความหนาแน่น	1.07 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดเดือด	116 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว	Anhydrous 38 องศาเซลเซียส Monohydrate 103-106 องศาเซลเซียส
ค่าดัชนีหักเห	1.38325-1.3845

2.7 ความชื้น (Humidity)

ความชื้น คือ ปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ โดยไอน้ำในอากาศส่วนมากจะได้มาจากการระเหยของน้ำจากแหล่งน้ำต่าง ๆ เช่น ทะเล มหาสมุทร แม่น้ำ เมื่อแหล่งน้ำได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์จะเกิดการระเหย (evaporation) เป็นไอลอยขึ้นสู่บรรยากาศ และน้ำในอากาศส่วนใหญ่ยังได้มาจากกระบวนการคายน้ำของพืช (Transpiration) โดยพืชจะมีการคายน้ำออกมาทางใบในรูปไอน้ำ นอกจากนี้ยังมาจากการใช้น้ำจากกิจกรรมต่าง ๆ ในการดำรงชีวิตของมนุษย์ และโรงงานอุตสาหกรรม [36]

2.7.1 ความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity)

ความชื้นสัมบูรณ์ หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลน้ำในอากาศกับปริมาตรของไอน้ำ ณ บริเวณนั้น มีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เมตร (g/m³) ความชื้นสัมบูรณ์จะเปลี่ยนแปลงไปตามความดันบรรยากาศที่เปลี่ยนแปลงไป [37]

2.7.2 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

ความชื้นสัมพัทธ์ หมายถึง อัตราส่วนของปริมาณไอน้ำที่มีในอากาศ ณ ขณะนั้นเทียบกับปริมาณไอน้ำที่อากาศจะรองรับได้ หากระดับไอน้ำ ณ ขณะนั้นมากเกินไปกว่า 100% ไอน้ำจะควบแน่น (Condensation) และกลายเป็นหยดน้ำในที่สุด แรงดันไอน้ำ และความสามารถในการรองรับปริมาณไอน้ำ ณ อุณหภูมิที่สูงกว่า จะมีมากกว่าแรงดันไอน้ำ และ ความสามารถในการรองรับปริมาณไอน้ำ ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จะมีผลโดยตรงต่อแรงดันไอน้ำ ระดับอุณหภูมิที่ทำให้ไอน้ำเกิดการอิ่มตัว (Saturation) และควบแน่น เรียกว่า จุดน้ำค้าง (Dew Point) ตารางที่ 2.8 แสดงจุดน้ำค้าง แรงดันไอน้ำ และปริมาณไอน้ำ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ 2.8 จุดน้ำค้าง แรงดันไอน้ำ และปริมาณไอน้ำ ณ อุณหภูมิต่าง ๆ [38]

Dew point(°C)	Vapor Pressure (PSIG)	Water Content (g/cu.m.)
0	0.0886	4.8452
10	0.1780	9.3902
15	0.2472	12.8122
20	0.3390	17.2724
25	0.6516	23.0111
30	0.8586	30.3212
35	0.8156	39.5383
40	1.0700	51.0509
45	1.3902	65.2722
50	1.7897	82.7282
55	2.2838	103.9594

ข้อมูลจากตารางที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แรงดันไอน้ำเท่ากับ 0.8156 (หน่วยเป็น PSIG) และสามารถรองรับปริมาณไอน้ำได้ไม่เกิน 39.5383 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร หากความชื้นสัมพัทธ์อยู่ที่ 85% ณ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แรงดันไอน้ำ เท่ากับ 0.6933 และอากาศขณะนั้น มีปริมาณไอน้ำ ประมาณ 33.6076 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร หากอุณหภูมิลดลงไปที่ระดับ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่สามารถ รองรับปริมาณไอน้ำได้เกิน 30.3212 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ปริมาณไอน้ำส่วนเกิน 3.2864 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะควบแน่นกลายเป็นน้ำ หากเราทราบถึงระดับ

ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในระหว่างการบรรจุ การจัดเก็บ และการขนส่งสินค้า จะทำให้สามารถคำนวณได้ว่าปริมาณไอน้ำที่จะส่งผลเสียหายต่อสินค้านั้น มีมากน้อยเพียงไร [38]

2.7.3 เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดความชื้น

1) ไฮโกรมิเตอร์แบบกระดาษเปียก-กระดาษแห้ง ประกอบไปด้วย เทอร์โมมิเตอร์สองอัน ถูกยึดติดด้วยปลอกที่แข็งแรงซึ่งสามารถแกว่งหมุนได้ด้วยมือ ด้านหนึ่งคือด้านเทอร์โมมิเตอร์กระดาษแห้งวัดอุณหภูมิอากาศ อีกด้านเป็นเทอร์โมมิเตอร์กระดาษเปียก (มีไส้ฝ้ายยึดติดอยู่ที่ส่วนปลายของเทอร์โมมิเตอร์) จะวัดอุณหภูมิอากาศที่ลดลงเมื่อน้ำระเหยออกไป ความแตกต่างของอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์กระดาษแห้งและเทอร์โมมิเตอร์กระดาษเปียกยิ่งมากเท่าไร อากาศจะยิ่งแห้งมากเท่านั้น การหาค่าความชื้นสัมพัทธ์ทำได้โดยอ่านค่าจากตารางความชื้นสัมพัทธ์ที่แนบมาให้พร้อมเครื่องวัด [39]

2) ไฮโกรมิเตอร์แบบดิจิตอล ใช้งานได้ง่ายและสามารถวัดความชื้นสัมพัทธ์ได้ในช่วงกว้าง ซึ่งสะดวกกว่าไฮโกรมิเตอร์แบบกระดาษเปียก-กระดาษแห้ง แต่มีข้อจำกัดคือ ราคาจะแพงกว่าและต้องการการดูแลรักษามากกว่าไฮโกรมิเตอร์แบบกระดาษเปียก-กระดาษแห้ง [39]

3) เซ็นเซอร์ตรวจวัดความชื้นที่มีความไวสูง วัสดุประเภทนี้ส่วนใหญ่จะผลิตมาจากสารประกอบอนินทรีย์ หรือ พอลิเมอร์บางชนิด ที่มีความไวต่อความชื้นในอากาศ เช่น เส้นใยโฟโตนิกคริสตัล (photonic crystal fibres) [40] แผ่นกราฟีนออกไซด์ [41] พอลิอะนิลีนผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ วัสดุประเภทนี้สามารถตรวจวัดความชื้นได้จากการเปลี่ยนแปลงของวัสดุหลังจากดูดความชื้นแล้ว เช่น ค่าการดัชนีหักเหแสง (refractive index) ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (electrical resistivity) ค่าการสั่นพ้องของคลื่นแบบ FP (Fabry-Perot type resonances) [42-43] เป็นต้น วัสดุเหล่านี้ส่วนใหญ่ยังอยู่ในขั้นตอนงานวิจัยและมีราคาสูงในการผลิต

2.7.4 การคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าจากเทคนิคเข็มวัดแบบ 4 จุด (Four Point Probe)

ค่าความต้านทานไฟฟ้า เป็นสมบัติที่สำคัญของวัสดุกึ่งตัวนำที่จำเป็นจะต้องมีการพิจารณาเมื่อต้องการนำวัสดุนั้นมาใช้เป็นชิ้นส่วนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุกรณีที่มี รูปร่างเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่หน้าตัด A มีขนาดยาว l สามารถกำหนดได้จากสมการที่ 2.9

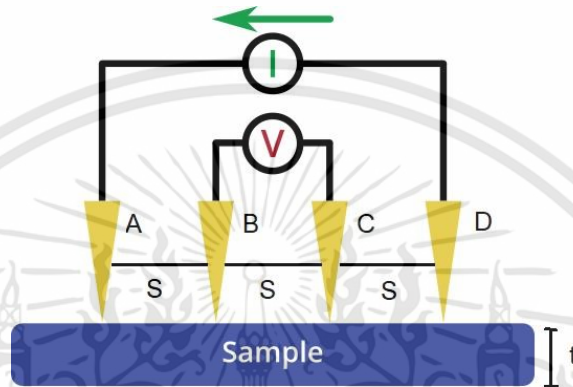
$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \text{สมการที่ 2.9}$$

R คือ ค่าความต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

ρ คือ ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (resistivity) ของวัสดุ ซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุ มีหน่วยเป็นโอห์ม-เซนติเมตร (W.cm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าในลักษณะนี้ขั้วไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองของแท่งวัสดุจะต้องเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิกส์ (ohmic contact) เพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของวัสดุได้โดยตลอด แต่ในทางปฏิบัติวัสดุสารกึ่งตัวนำไม่ได้มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมทำให้การกำหนดความยาวและพื้นที่หน้าตัด รวมไปถึงการสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิกส์ทำได้ยาก ทำให้การวัดด้วยวิธีข้างต้นทำได้ยาก วิธีที่ได้รับความนิยมและนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายคือ การวัดด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด ซึ่งสามารถวัดได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงขนาดหรือรูปร่างของวัสดุ และใช้เข็มวัดแทนการสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิกส์ [44]



รูปที่ 2.9 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด

ภาพที่ 1 เป็นการวัดความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด โดยเข็มทั้ง 4 มีระยะห่างระหว่างเข็มเท่ากันคือ s การวัดเริ่มจากปล่อยกระแสไฟฟ้าคงที่เข้าที่เข็มด้านนอกสุด (เข็ม A และ D) กระแสจะไหลจากเข็ม A ผ่านวัสดุไปยังเข็ม D ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม จึงทำการวัดค่ากระแสและค่าแรงดันที่เข็ม B และ C ที่วัดได้จะนำมาคำนวณหาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า ตามสมการที่ 2.10 [45] ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการแก้สมการสนามไฟฟ้าบนผิวสารกึ่งตัวนำที่มีขอบเขตแบบกึ่งไม่จำกัด (semi-infinite boundary)

$$\rho = 2\pi s \frac{V}{I} \quad \text{สมการที่ 2.10}$$

ในทางปฏิบัติ ชิ้นงานตัวอย่างจริงอาจไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของลักษณะขอบเขตไม่จำกัดทั้งในแนวระนาบและแนวลึก ทำให้สมการที่ 2.10 จึงให้ค่าที่ไม่ถูกต้องเท่าที่ควร จึงต้องมีการปรับค่าโดยใช้แฟกเตอร์ความถูกต้อง (correction factor) ซึ่งจะได้รูปแบบสมการดัง สมการที่ 2.10 [46]

$$\rho = 2\pi s F \frac{V}{I} \quad \text{สมการที่ 2.11}$$

F คือ แฟกเตอร์ความถูกต้อง ซึ่งมีค่ามากที่สุดที่จะทำให้สมการถูกต้องคือ 4.5326 หรือ $\frac{\pi}{\ln 2}$ [46]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีชิ้นงานเป็นฟิล์มบาง ที่ความหนาน้อยกว่าระยะห่างระหว่างเข็มตรวจวัด จะสามารถคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าของชิ้นงานได้ดังสมการที่ 2.12 [47]

$$R = k \frac{V}{I} \quad \text{สมการที่ 2.12}$$

โดย k คือ แฟกเตอร์ความถูกต้อง

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Oymane Z.O. และคณะ (2005) [48] ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันแห้งเร็วที่ไม่เป็นระบบคอนจูเกต (น้ำมันลินสีด) และระบบคอนจูเกต (น้ำมันทัง) โดยใช้ Cobalt(II) 2-ethyl-hexanoate เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยน้ำมัน 2 ชนิดนี้ มีกลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แตกต่างกัน สำหรับน้ำมันลินสีดที่ไม่เป็นระบบคอนจูเกต การแตกออกของไฮโดรเจนเกิดขึ้นผ่านอัลโลลิกไฮโดรเจนอะตอม โดยออกซิเจนปริมาณมากที่ใส่ลงไปนำไปสู่การเกิด Hydroperoxide ซึ่งสามารถสลายกลายเป็นอนุมูลอิสระของ Alkoxy และ Peroxy โดยทำให้เกิดการเชื่อมโยงและผลิตภัณฑ์ร่วม ส่วนน้ำมันทังที่มีระบบคอนจูเกตเป็นหลักเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยเริ่มจากการแตกออกของไฮโดรเจนจาก Monoallylic โดยเมื่อเทียบกับน้ำมันลินสีดจะใช้ปริมาณออกซิเจนที่น้อยกว่า และเกิด Hydroperoxide รวมทั้งได้ผลิตภัณฑ์ร่วมมากกว่าเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าอนุมูลอิสระ ขอบเข้าทำปฏิกิริยาตรงตำแหน่งพันธะคู่ที่เป็นระบบคอนจูเกตมากกว่า โดยจะแทนที่ไฮโดรเจน

งานวิจัยของ กณิกนันท์ จันทร์ประดิษฐ์ และคณะ (2014) [49] ศึกษาการเตรียมฟิล์มที่มีองค์ประกอบของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก และน้ำมันละหุ่ง ในอัตราส่วนต่าง ๆ เพื่อศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยนำสารสูตรต่าง ๆ ที่เตรียมได้มาผสมน้ำยาไวแสง แล้วนำมาขึ้นรูปฟิล์มบนกรอบสกรีน ทำการฉายแสงเพื่อเชื่อมโยงฟิล์มซึ่งมี 3 ระบบ คือ ระบบที่ไม่ฉายแสง, ระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น และระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต จากนั้นนำฟิล์มที่ได้มาทดสอบสมบัติต่าง ๆ พบว่าฟิล์มที่มีน้ำมันละหุ่งเป็นองค์ประกอบ ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย และการทดสอบการซึมผ่านไอน้ำ พบว่าฟิล์มทุกสูตรมีค่าการซึมผ่านไอน้ำที่ต่ำ รวมถึงปริมาณน้ำมันละหุ่ง และระบบเชื่อมโยงไม่มีผลต่อค่าการซึมผ่านไอน้ำ ซึ่งฟิล์มที่มีสมบัติการต้านทานน้ำที่ดีที่สุดคือฟิล์มสูตรที่มีอัตราส่วนของ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก 97 ส่วนต่อน้ำมันละหุ่ง 3 ส่วน ซึ่งใช้ระบบเชื่อมโยงที่ฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น

งานวิจัยของ มานิตย์ ไชยวงศ์ และคณะ (2016) [4] ศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงสมบัติด้วยกรดโอเลอิก ร่วมกับน้ำมันลินสีดแล้วเชื่อมโยงด้วยระบบฉาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสง และระบบรีดอกซ์ร่วมกับการใช้สารไวแสง จากนั้นทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ผลของระบบ เชื่อมโยง, ปริมาณน้ำมันลินสีด และปริมาณกรดโอเลอิก โดยทดสอบสมบัติเบื้องต้นคือ ปริมาณน้ำที่ คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น, ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม และปริมาณของแข็ง คงเหลือ จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงสมบัติด้วยกรดโอเลอิก และน้ำมันลินสีด มีความสามารถในการต้านทานน้ำที่ดี และให้น้ำซึมผ่านได้

งานวิจัยของ Lima Mijin และคณะ (2015) [50] ศึกษาการเพิ่มความสามารถในการต้านทาน น้ำ และการต้านทานการซึมผ่านของออกซิเจน ด้วยการเชื่อมโยงฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยกรด บอริก (PVA/BA) เพื่อใช้สำหรับงานบรรจุภัณฑ์ โดยเตรียมฟิล์มผ่านวิธีคนผสม เกิดปฏิกิริยาระหว่าง หมูไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และไอออนบอเรทจากการไฮโดรไลซ์ของกรดบอริก ซึ่งจะ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแห และเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับจุลภาค (Microstructure) ของไฮบริดฟิล์ม ทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดบอริก ทำให้ขนาด และปริมาณผลึกของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลดลง ความหนาแน่นการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการ เรียงชิดติดกันของสายโซ่มากขึ้น โดยจากการทดลองพบว่าสมบัติทางกายภาพของฟิล์มจากการ เชื่อมโยงฟิล์มไฮบริดพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยกรดบอริก ทำให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และอุณหภูมิการสลายตัวของไฮบริดฟิล์มเพิ่มขึ้น รวมถึงความสามารถในการต้านทานน้ำ การป้องกัน การซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้น

งานวิจัยของ Yodsathorn Sasithornsonti และคณะ (2013) [51] ศึกษาการเชื่อมโยงทาง เคมีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยใช้สารโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต พบว่าโครงสร้างทางเคมีของพอลิ ไวนิลแอลกอฮอล์ที่เชื่อมโยงด้วยสารโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปจากพอลิ ไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่ได้มีการเชื่อมโยง ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการใช้เทคนิค FT-IR ในโหมด ATR และ Solid State NMR เมื่อนำมาทดสอบการบวมตัว พบว่าอัตราการบวมตัวของพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต นอกจากนี้ เสถียรภาพทางความร้อนของ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เชื่อมโยงด้วยสารโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น

งานวิจัยของ ภัคพล ลักณาพรวิศิษฐ์ และคณะ (2012) [52] ศึกษาการนำน้ำมันลินสีด และ น้ำมันทัง มาปรับปรุงสมบัติเชิงกล และสมบัติต้านทานน้ำของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เพื่อเตรียมกาว ไม้ที่ปราศจากฟอร์มาลดีไฮด์ สำหรับงานพาร์ทิเคิลบอร์ด โดยใช้ปริมาณของน้ำมันลินสีด และน้ำมันทัง ในอัตราส่วน 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าการใช้น้ำมันทังช่วยให้พอลิ ไวนิลแอลกอฮอล์ มีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่าการใช้น้ำมันลินสีด เนื่องจากน้ำมันทังมีพันธะคู่เป็น ระบบคอนจูเกต ขณะที่น้ำมันลินสีดมีพันธะคู่ที่ไม่เป็นระบบคอนจูเกต โดยพันธะคู่ระบบคอนจูเกตจะ มีอัตราในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าพันธะคู่ที่ไม่เป็นระบบคอนจูเกต เป็นเหตุให้น้ำมันทังมีความแข็งแรง มากกว่าน้ำมันลินสีด จากการทดสอบการหาค่าการบวมตัวของฟิล์มกาว โดยการนำฟิล์มกาวไปแช่น้ำ และวัดค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของฟิล์มที่เวลาในการแช่น้ำเป็นเวลา 1 และ 24 ชั่วโมง ซึ่งในขั้นตอน

การเตรียมฟิล์มกาวเป็นการทำให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของกาวอย่างสมบูรณ์ ทำให้ฟิล์มที่เตรียมได้มีสมบัติต้านทานน้ำ และมีค่าการบวมตัวของฟิล์มกาวในน้ำลดลง

งานวิจัยของ รักษ์สุตา สวรรค์ตอน และคณะ (2014) [53] ศึกษาการเตรียมฟิล์มกาวอัดที่มีองค์ประกอบของ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิไวนิลอะซิเตต โดยปรับปรุงโครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยกรดโอเลอิก และน้ำมันลินสีด เพื่อเพิ่มสมบัติของฟิล์มกาวอัดในด้านต่าง ๆ และสมบัติการต้านทานน้ำสำหรับงานพิมพ์ที่ใช้หมึกพิมพ์เชื่อน้ำ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้สารดูดซับออกซิเจนชนิดต่าง ๆ ได้แก่ โซเดียมซัลไฟต์ (Na_2SO_3), โซเดียมเมทาไบซัลไฟต์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) และไฮโดรควิโนน (Hydroquinone) เพื่อยืดอายุการใช้งานให้นานขึ้น โดยเตรียมแผ่นฟิล์มจากการผสมกาวอัดกับสารไวแสงแล้วปาดลงแผ่นใส จากนั้นนำฟิล์มไปทำแม่พิมพ์สกรีน แล้วนำมาตรวจสอบความคมชัดของลวดลายหลังการถ่ายแบบ และทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มกาวอัด จากการทดลอง พบว่าฟิล์มกาวอัดที่มีอัตราส่วนผสมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 5 pph:พอลิไวนิลอะซิเตต เท่ากับ 4:6 ปรับปรุงสมบัติของฟิล์มกาวอัดด้วยน้ำมันลินสีด 4 pph ผสมกับสารดูดซับออกซิเจนโซเดียมซัลไฟต์ และโซเดียมเมทาไบซัลไฟต์ ที่ความเข้มข้น 500 ppm และใช้เวลาถ่ายแบบด้วยแสง 2.5 นาที สามารถเก็บรายละเอียดของลวดลายได้คมชัด, ชะล้างลวดลายได้ง่าย และเนื้อของฟิล์มกาวอัดมีความแข็งแรงสามารถทนแรงปาดของยางได้ดี เนื่องจากสูตรฟิล์มกาวอัดมีส่วนผสมของน้ำมันลินสีด และกรดโอเลอิกเป็นองค์ประกอบซึ่งมีโครงสร้างของพันธะคู่ สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้เมื่อถ่ายแบบด้วยแสง รวมถึงสารดูดซับออกซิเจนยังช่วยยืดอายุการใช้งานของฟิล์มกาวอัดได้อีกด้วย

งานวิจัยของ Ogura Kotaro และคณะ (1997) [54] ศึกษาผลของความชื้นที่มีต่อค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มผสม พอลิอะนิลีน - พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยทำการสังเคราะห์ฟิล์มผสม แล้วนำฟิล์มที่สังเคราะห์ได้มาควบคุมความชื้นตั้งแต่ 0 - 100 %RH แล้ววัดค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์ม พบว่า เมื่อความชื้นสูงขึ้นค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิอะนิลีน ค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น ฟิล์มมีการตอบสนองต่อความชื้นที่ดีในเวลา 45 วินาที

งานวิจัยของ Hee-Jang Ju และคณะ (2016) [55] พัฒนาตัวตรวจจับความชื้นชนิดทนต่อแรงกระแทกแบบทรงกระบอก โดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นวัสดุตรวจจับความชื้นเพื่อใช้ในอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ โดยจุ่มเคลือบตรงกลางบนเส้นใยพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตและใช้ทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้า จากนั้นทำการศึกษาค่าความต้านทานของชิ้นงานตามค่าความชื้นที่เปลี่ยนไปในช่วง 60-90 %RH นอกจากนี้ยังทำการศึกษาความคงทนต่อแรงบิดของชิ้นงานที่มุมต่าง ๆ จากการศึกษาพบว่าวัสดุที่ทำการทดสอบ มีค่าความต้านทานลดลงตามค่าความชื้นที่เพิ่มขึ้น มีความสามารถในการตรวจจับความชื้นที่ว่องไวและทนต่อการโค้งงอได้ดี สามารถนำมาใช้ในอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ได้ เนื่องจากมีกระบวนการผลิตที่เรียบง่ายและมีประสิทธิภาพสูง

งานวิจัยของ Borini Stefano และคณะ (2013) [41] ศึกษาการสังเคราะห์ วัสดุประกอบพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มี รีติวซ์กราฟีนออกไซด์ที่เคลือบกรดแทนนิกเป็นสารตัวเติม เพื่อใช้เป็นวัสดุตรวจจับความชื้น โดยทำการเคลือบรีติวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยกรดแทนนิก จากนั้นนำมาผสมกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วขึ้นรูปเป็นฟิล์ม จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลและ วัดค่าความต้านทานของวัสดุตามค่าความชื้นที่เปลี่ยนไป จากผลการทดลองพบว่าวัสดุมีสมบัติที่ดีขึ้น มีพื้นผิวเรียบและมีประสิทธิภาพในการตรวจวัดความชื้นในช่วงกว้าง

งานวิจัยของ Madhuri Kumari และคณะ (2016) [56] ได้พัฒนาตัวตรวจวัดไอน้ำความว่องไวสูง โดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ถูกเติมด้วย Rhodamine 6G นำมาเคลือบบนโลหะเงิน แล้วนำมาควบคุมความชื้นช่วง 10 – 73 %RH แล้วตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนไปภายใต้แสงโพลาไรซ์ พบว่า เมื่อค่าความชื้นเพิ่มขึ้น การดูดกลืนแสงมีค่าลดลง และพบว่าเมื่อทำการเติมด้วย Rhodamine 6G วัสดุสามารถตรวจจับความชื้นได้ดีขึ้นและว่องไวขึ้น

งานวิจัยของ C. Tellis John และคณะ (2011) [57] ได้พัฒนาตัวตรวจจับความชื้นโดยใช้ประโยชน์จากสารเรืองแสงที่ไวต่อความชื้น โดยทำการเติมสารเรืองแสงในฟิล์มไฮโดรเจลสองชนิดคือ อะกาโรส และฟิล์มพอลิเมอร์ระหว่าง Acrylamide และ 2-(dimethylamino) ethyl methacrylate (DMAEM) แล้วนำฟิล์มมาผ่านแก๊สที่มีความชื้นตั้งแต่ 0 – 100 %RH พบว่า ฟิล์มมีค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มค่าความชื้น ฟิล์มที่ใช้ อะกาโรส มีการตอบสนองต่อความชื้นที่ดีกว่า ฟิล์ม Acrylamide/DMAEM

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาฟิล์มที่ใช้ตรวจจับความชื้น โดยทำการพัฒนาฟิล์มให้มีความทนน้ำมากขึ้นเพื่อให้สามารถคงรูปในสภาวะความชื้นสูง โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ มานิตย์ ไชยวงศ์ และคณะ [4] โดยทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของกรดโอเลอิก และเปลี่ยนมาใช้น้ำมันหัง เพื่อให้ทนต่อความชื้นมากขึ้น และนำมาทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม, ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งที่เหลือ การดูดความชื้นของฟิล์มที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50–95 %RH, และ มุมสัมผัส จากนั้นนำมาทดสอบหาความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุที่สภาวะความชื้นช่วง 0 -95 %RH เพื่อศึกษาความสามารถในการตรวจจับความชื้นของฟิล์ม

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1) พอลิไวน์ิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol), PVA) เกรดการค้า JP-27 บริษัท JAPAN VAM & POVAL CO., Ltd

ตารางที่ 3.1 สมบัติจำเพาะของ PVA ที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติ	ค่า
มวลโมเลกุล	120,000
ความหนืด	48-56 mPa.s
องค์การไฮโดรไลซิส	85.0-87.0 mol%
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	5-7
ปริมาณการระเหยสูงสุด	5 %

2) กรดโอเลอิก (Oleic acid) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLOERBA Co., Ltd

3) กรดพาราโทลูอินซัลโฟนิก (p-TSA) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLOERBA Co., Ltd

4) โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($K_2S_2O_8$) เกรดการค้า บริษัท CARLOERBA Co., Ltd

5) โซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Quality Reagent Chemical Co., Ltd

6) น้ำมันทัง (Tung Oil) เกรดการค้า บริษัท UV Photographic Co., Ltd

7) น้ำยาไวแสง (Methyl Orange) เกรดการค้า บริษัท TWINS Co., Ltd

8) โคบอลต์คลอไรด์ ($CoCl_2$) เกรดการค้า บริษัท CARLOERBA Co., Ltd

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1) เครื่องแก้ว

2) เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น SI-234 บริษัท Becthai Bangkok Equipment & Chemical Co., Ltd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) เครื่องให้ความร้อน (Heater) ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG H 57 บริษัท Becthai Bangkok Equi-ment & Chemical Co., Ltd
- 4) ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) ยี่ห้อ Peacock รุ่น G-7C บริษัท Ozaki MFG Co., Ltd
- 5) เครื่องทดสอบมุมสัมผัส : รุ่น Contact Angle System OCA บริษัท Dataphysics Co., Ltd
- 6) เครื่องทดสอบ Fourier Transform Infrared Spectrometer รุ่น IRTracer-100 บริษัท Shimadzu scientific instrument incorporated Co., Ltd
- 7) เครื่องทดสอบ Differential Scanning Calorimeter รุ่น DSC 204 F1 Phoenix® บริษัท NETZSCH Co., Ltd
- 8) เครื่องวัดความต้านทานแบบหัววัด 4 จุด (4 point probe) รุ่น SP4-50045TRS บริษัท Lucas Signatone Corporation Co., Ltd
- 11) โต้ะปรับระดับ
- 12) เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermostat)
- 13) เดซิเคเตอร์ (Desiccator)
- 14) กรอบสกรีนขนาด $10.8 \times 17 \text{ cm}^2$ และมีความหนาของขอบสกรีนที่ 620 ไมโครเมตร (รูปที่ 3.1)
- 15) อุปกรณ์ฉายแสงระบบช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.1 กรอบสกรีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ฉายแสงระบบช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น

3.3 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (% W/V)

- 1) ชั่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 60 กรัม จากนั้นค่อย ๆ ใส่พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลงในน้ำกลั่น ปริมาตร 540 มิลลิลิตร และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส
- 2) เมื่อละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์หมดแล้ว ให้เติมน้ำกลั่นจนปริมาตรสุทธิ 600 มิลลิลิตรพร้อมปั่นกวนต่อ จนสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
- 3) ตั้งสารละลายทิ้งไว้จนสารละลายเย็นตัว และไม่มีฟองอากาศ
- 4) ได้สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดใส

3.4 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ดัดแปร

- 1) นำสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากข้อ 3.3 ปั่นกวนโดยใช้ความเร็วรอบที่ 800-1000 รอบต่อนาที พร้อมกับให้ความร้อน โดยตั้งอุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียส
- 2) ระหว่างที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นใส่กรดโอเลอิก 1, 3, 5 ส่วนในร้อยส่วน (pph) ของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยใช้สัญลักษณ์เป็น P1*, P3*, และ P5*
- 3) ใส่กรดพาราโทลูอินซิลโฟนิค 1 ส่วนในร้อยส่วน (pph) ของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์พร้อมปั่นกวน
- 4) เมื่อค่าอุณหภูมิที่เครื่องวัดอุณหภูมิถึง 90 องศาเซลเซียส ให้ปั่นสารละลายพอลิไวนิล-แอลกอฮอล์ต่อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การเตรียมสูตรสำหรับขึ้นฟิล์ม

- 1) ชั่งส่วนผสมสูตรฟิล์มตามสัดส่วนต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.2
- 2) ผสมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก และน้ำมันทั้งให้เข้ากัน โดยใช้เครื่องปั่นผสมสารที่ความเร็วรอบ 9000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที
- 3) จากนั้นเติมโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต 0.1 เปอร์เซ็นต์ของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ตัดแปร และโซเดียมไทโอซัลเฟต 0.1 เปอร์เซ็นต์ของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ตัดแปร และสารละลายโคบอลต์คลอไรด์ 0 หรือ 1 เปอร์เซ็นต์ของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ตัดแปร
- 4) นำสารละลายผสมไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม โดยเติมสารละลาย Methyl Orange (M) ในอัตราส่วนโดยปริมาตร 1: 100 ของสารละลายผสมจากนั้นค่อย ๆ กวนให้เข้ากันด้วยแท่งแก้ว และนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม

ตารางที่ 3.2 สูตรฟิล์มต่าง ๆ

สูตรที่	ชื่อสูตร	P*(g)	T(g)	ฉายแสง	CoCl ₂
1	P1*	100	0	-	-
2	P3*	100	0	-	-
3	P5*	100	0	-	-
4	P1*97T3R	97	3	/	-
5	P1*95T5R	95	5	/	-
6	P1*90T10R	90	10	/	-
7	P3*97T3R	97	3	/	-
8	P3*95T5R	95	5	/	-
9	P3*90T10R	90	10	/	-
10	P5*97T3R	97	3	/	-
11	P5*95T5R	95	5	/	-
12	P5*90T10R	90	10	/	-
13	P1*97T3	97	3	-	-
14	P1*95T5	95	5	-	-
15	P1*90T10	90	10	-	-
16	P3*97T3	97	3	-	-
17	P3*95T5	95	5	-	-
18	P3*90T10	90	10	-	-
19	P5*97T3	97	3	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สูตรฟิล์มต่าง ๆ (ต่อ)

สูตรที่	ชื่อสูตร	P*(g)	T(g)	ฉายแสง	CoCl ₂
20	P5*95T5	95	5	-	-
21	P5*90T10	90	10	-	-
22	P1*97T3Co	97	3	-	/
23	P1*95T5 Co	95	5	-	/
24	P1*90T10Co	90	10	-	/
25	P3*97T3Co	97	3	-	/
26	P3*95T5Co	95	5	-	/
27	P3*90T10Co	90	10	-	/
28	P5*97T3Co	97	3	-	/
29	P5*95T5Co	95	5	-	/
30	P5*90T10Co	90	10	-	/

หมายเหตุ : P* = สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก 1, 3, 5 pph

T = น้ำมันทัง (Tung oil)

R = เชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสง

Co = มีการเติม Cobalt (II) chloride (CoCl₂)

- = ไม่มีองค์ประกอบหรือวิธีการนั้น

/ = มีองค์ประกอบหรือวิธีการนั้น

3.6 การขึ้นรูปฟิล์ม

- 1) เตรียมกรอบสกรีน โดยวางบนขาตั้งปรับระดับ
- 2) นำสารละลายที่เตรียมไว้ มาขึ้นรูปฟิล์มบนกรอบสกรีน โดยใช้รางปาด ปาดฟิล์มจำนวน 1 รอบ แล้วตั้งทิ้งไว้ 10-15 นาที จากนั้นใช้ลมเย็นเป่าฟิล์มจนแห้ง เมื่อฟิล์มแห้งจะได้ความหนาของฟิล์มอยู่ที่ 35±5 ไมโครเมตร
- 3) นำฟิล์มสูตรที่เติมสารละลาย Methyl Orange ไปฉายแสงช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (ช่วงความยาวคลื่น 400 -700 นาโนเมตร) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 4) นำแผ่นฟิล์มเก็บในเดซิเคเตอร์ความชื้นสัมพัทธ์ 0 %RH เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การทดสอบ (Testing)

3.7.1 การทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มสุดท้าย (%Swelling)

- 1) นำฟิล์มที่มีความหนา 35 ± 5 ไมโครเมตร มาตัดเป็นชิ้นงานตัวอย่างขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$ จากนั้นชั่งน้ำหนักชิ้นงานด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง แล้วนำมาแช่ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 24 ชั่วโมง
- 2) เมื่อครบเวลา นำมาชั่งจนแห้งจากนั้นทำการชั่งน้ำหนัก และบันทึกผลการทดลอง
- 3) คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้นจากสูตร

$$\text{ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มเริ่มต้น} = \frac{\text{น้ำหนักฟิล์มหลังแช่น้ำกลั่น} - \text{น้ำหนักฟิล์มก่อนแช่น้ำกลั่น}}{\text{น้ำหนักฟิล์มก่อนแช่น้ำกลั่น}} \times 100$$

3.7.2 การทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งคงเหลือ (% Solid Remain,)

นำฟิล์มหลังจากการแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากข้อ 3.7.1 มาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วนำฟิล์มแห้งที่ได้จากการอบมาชั่งน้ำหนัก คำนวณค่าปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่จากสูตร

$$\text{ปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่} = \frac{\text{น้ำหนักฟิล์มหลังจากอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักฟิล์มก่อนแช่น้ำกลั่น}} \times 100$$

3.7.3 การทดสอบการดูดความชื้น (Moisture Uptake)

เตรียมชิ้นงานฟิล์มขนาดกว้าง $2 \times 2 \text{ cm}^2$ เก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 0 เปอร์เซ็นต์เป็นเวลา 1 สัปดาห์ และนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปเก็บในเดซิเคเตอร์เพื่อควบคุมความชื้น (ความชื้นสัมพัทธ์ 50-95 เปอร์เซ็นต์) เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วทำการชั่งน้ำหนักแล้วนำมาคำนวณค่าการดูดความชื้นได้จากสมการ

$$\text{Moisture Uptake} = \frac{\text{น้ำหนักหลังเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ}}{\text{น้ำหนักหลังเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ความชื้นสัมพัทธ์ 0 เปอร์เซ็นต์}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.4 การทดสอบมุมสัมผัส (Initial Contact Angle)

นำฟิล์มมาทำการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำกลั่นบนพื้นผิวชิ้นงาน โดยหยดน้ำกลั่น ปริมาณ 2 μL บันทึกค่ามุมสัมผัสที่หยดน้ำกลั่นกระทำกับผิววัสดุด้วยเครื่อง Contact Angle System OCV ตามมาตรฐาน ASTM D 5946

3.7.5 การวิเคราะห์ชิ้นงานตัวอย่างฟิล์มด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

นำฟิล์มหลังเก็บในเดซิเคเตอร์ เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ไปทดสอบเพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของฟิล์มด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ในโหมด ATR ที่เลขคลื่น 700 ถึง 4000 cm^{-1}

3.7.6 การตรวจวัดค่าสภาพต้านทานของชิ้นงานด้วยเทคนิคเข็มวัด 4 จุด (Four Point Probe Resistivity Measurements)

ทดสอบสภาพความต้านทานของฟิล์ม หลังจากเก็บในเดซิเคเตอร์ที่ความชื้น 0–95 %RH เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง แล้วนำมาคำนวณค่าสภาพความต้านทานจากสูตร [47]

$$R = 4.5326 \frac{V}{I}$$

R = ค่าสภาพความต้านทาน (Ω)

V = ค่าความต่างศักย์ตกคร่อม (V)

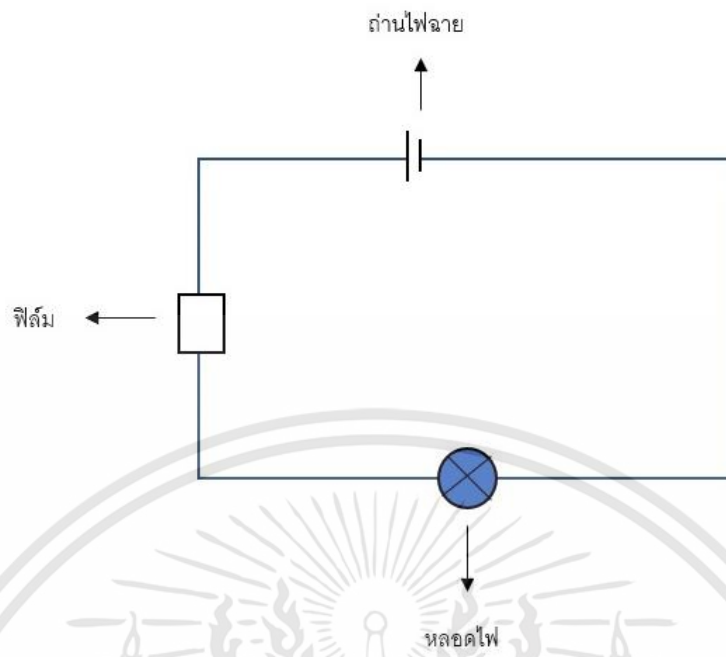
I = กระแสที่ให้ (μA)

3.7.7 การจำลองการประกอบวงจรไฟฟ้าโดยมีชิ้นงานฟิล์มเป็นส่วนประกอบของวงจร

การประกอบวงจรสำหรับทดสอบ ทำได้ดังรูปที่ 3.3 โดยสังเกตการติดของหลอดไฟ LED เมื่อต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ครบวงจร โดยมีอุปกรณ์ดังนี้

1. สายไฟฟ้า
2. หลอดไฟ LED น้ำเงิน
3. ชิ้นงานฟิล์ม ขนาด 2 x 2 cm^2
4. ถ่านไฟฉาย 3 ก้อน ต่อแบบอนุกรม (27 โวลต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แบบจำลองการต่อวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

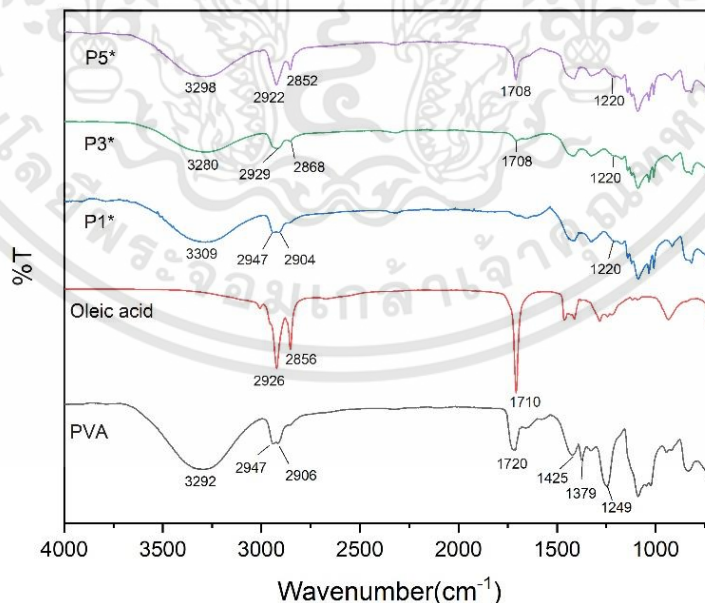
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมฟิล์มตรวจวัดความชื้นจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ดัดแปรโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิกร่วมกับน้ำมันทั้งโดยสูตรฟิล์มมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิกต่อน้ำมันทั้งเป็น 97:3, 95:5, 90:10, โดยน้ำหนัก ทำการเชื่อมโยงทางเคมีด้วยระบบรีดอกซ์โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต และโซเดียมไทโอซัลเฟต และการเชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสงร่วมกับระบบรีดอกซ์ ฟิล์มที่ได้นำมาวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ในโหมด Transmittance และศึกษาสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม, ปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่, มุมสัมผัส, และการดูดความชื้น จากนั้นนำฟิล์มมาควบคุมความชื้น ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0-95% แล้วนำมาหาค่าความต้านทานไฟฟ้าเพื่อศึกษาความสามารถในการตรวจจับความชื้นของฟิล์ม

4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์ม

4.1.1 การตรวจวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ในโหมด Transmittance

การพิสูจน์เอกลักษณ์หาหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงไปของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เมื่อปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิกด้วยเทคนิค FT-IR แสดงผลดังรูป 4.1

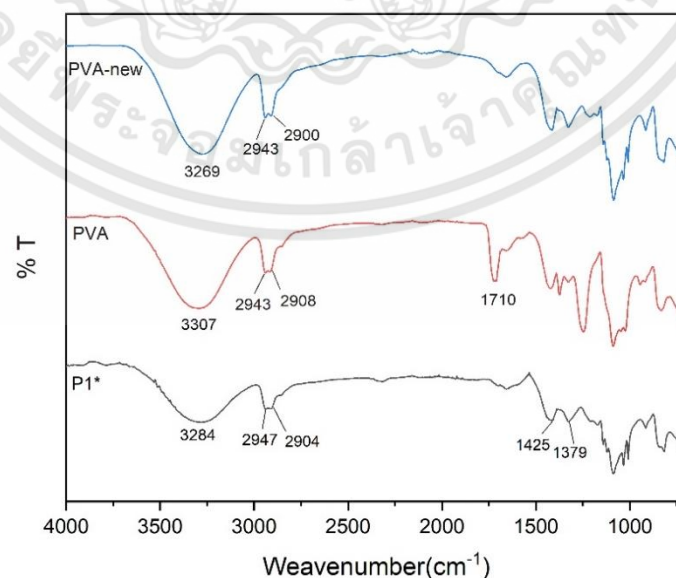


รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PVA, oleic acid, P1*, P3*, และ P5*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาอินฟราเรดสเปกตรัมของ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุง โครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 1 pph (P1*) พบสัญญาณของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ในช่วงเลขคลื่น 3600 ถึง 3100 cm^{-1} เป็นสัญญาณของ O-H Stretching และ ช่วงเลขคลื่น 2937 cm^{-1} เป็นสัญญาณของ -CH_2 Stretching และยังพบว่า พีคที่ช่วงเลขคลื่น 1720 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณของ -C=O Stretching ของหมู่เอซิติท นั้นมีความเข้มที่ลดลง โดย PVA ที่เลือกใช้ในการทดลองนี้มี เปอร์เซ็นต์ไฮโดรไลซิส ประมาณ 85-87 เปอร์เซ็นต์โดยโมล มีหมู่เอซิติทในโครงสร้างประมาณ 13-15 เปอร์เซ็นต์ จากใน ขั้นตอนการทำปฏิกิริยา ได้มีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งส่งผลให้ หมู่เอซิติทของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส กลายเป็นหมู่ O-H เพิ่มมากขึ้น ส่งผล ให้หมู่เอซิติทในโครงสร้างมีค่าลดลง จึงทำให้ความเข้มพีคที่ตำแหน่งนี้มีค่าลดลง และไม่สามารถ ยืนยันสัญญาณของกรดโอเลอิกได้เนื่องจากสูตรนี้ มีปริมาณของกรดโอเลอิก เพียง 1 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เท่านั้น

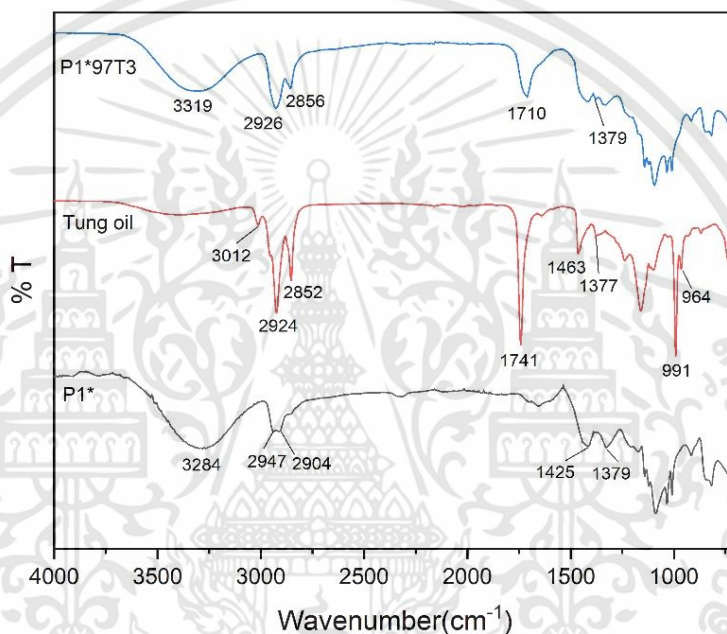
เมื่อพิจารณาการเปรียบเทียบอินฟราเรดสเปกตรัมของสูตร P1*, P3*, และ P5* ตามลำดับ พบสัญญาณของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ในช่วงเลขคลื่น 3600 ถึง 3100 cm^{-1} เป็นสัญญาณ ของ -OH Stretching ในทุกสูตร เมื่อเพิ่มปริมาณกรดโอเลอิกจาก 1 pph เป็น 3 pph พบสัญญาณ ของกรดโอเลอิกที่ช่วงเลขคลื่น 1708 cm^{-1} ซึ่งอาจเป็นสัญญาณ -C=O Stretching ในหมู่เอซิติทที่ เกิดขึ้นในปฏิกิริยาเอซิติทฟิเคชันซ้อนทับกับพีค -C=O Stretching ของกรดโอเลอิกชัดเจนขึ้นและ พบว่าความเข้มของพีคมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณกรดโอเลอิกเป็น 5 pph นอกจากนี้ที่ตำแหน่งหมู่ -C-O Stretching มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งพีคจากช่วง 1250 cm^{-1} เป็น 1220 cm^{-1} ซึ่งเกิดการ เปลี่ยนแปลงตำแหน่งพีคของพันธะ C-O Stretching ของกรดโอเลอิกเป็นโพลิเอทเธอร์ และ พบ พีคในช่วง 2922 cm^{-1} และ 2852 cm^{-1} ชัดเจนขึ้นซึ่งเป็นสัญญาณของ -CH_2 และ -CH_3 Stretching ของส่วนกรดโอเลอิกตามลำดับ



รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของ P1*, PVA, และ PVA-new

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อทดสอบสมมติฐานที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงทำการจำลองวิธีปรับปรุงโครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยทำการให้ความร้อนสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเติมตัวเร่งปฏิกิริยา กรดพาราโทลูอินซัลโฟนิก แต่ไม่มีการเติมกรดโอเลอิก จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่ 90°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม (PVA-New) แล้วนำมาวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (รูปที่ 4.2) พบว่า พีคที่ช่วงเลขคลื่น 1720 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณของ C=O Stretching ของหมู่อะซิเตทของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ นั้นมีความเข้มที่ลดลง ตามสมมติฐานที่กล่าวมาข้างต้นเนื่องจากหมู่ $-\text{OCOCH}_3$ ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส กลายเป็นหมู่ O-H เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความเข้มพีคที่ตำแหน่งนี้มีค่าลดลง



รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของ P1*97T3, น้ำมันทัง, และ P1*

จากรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณาอินฟราเรดสเปกตรัมของ น้ำมันทัง พบสัญญาณของ $-\text{CH}_2$ Stretching และ $-\text{CH}_3$ Stretching ในช่วง 2924 และ 2852 cm^{-1} พีคที่ตำแหน่ง 3012 cm^{-1} เป็นสัญญาณของ $-\text{C}=\text{C}-\text{H}$ Stretching พีคที่ตำแหน่ง 1741 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณของ $-\text{C}=\text{O}$ Stretching ของหมู่เอสเทอร์ พบสัญญาณของ conjugated trans $-\text{C}=\text{C}-\text{H}$ bending ที่ตำแหน่งพีค 991 cm^{-1} และ 964 cm^{-1} เป็นสัญญาณของ conjugated cis $-\text{C}=\text{C}-\text{H}$ bending เมื่อพิจารณาอินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มสูตร P1*97T3 พบสัญญาณช่วง 2926 และ 2952 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณของ $-\text{CH}_2$ Stretching และ $-\text{CH}_3$ Stretching ขึ้นทับซ้อนกันของ PVA และ น้ำมันทัง และพบพีคที่ 1710 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ $-\text{C}=\text{O}$ Stretching จากส่วนของน้ำมันทังและกรดโอเลอิก และพบว่า พีคในช่วง 991 cm^{-1} และ 964 cm^{-1} มีความเข้มที่ลดลง ซึ่งเกิดจากการเชื่อมโยงกันระหว่างสายโซ่บริเวณตำแหน่งพันธะคู่ของน้ำมันทัง ทำให้จำนวนพันธะคู่ในโครงสร้างลดลง

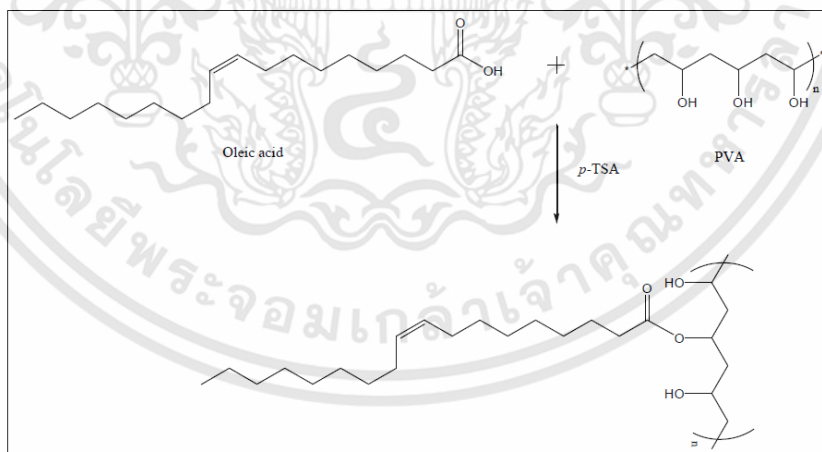
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของฟิล์ม

จากการศึกษาสูตรฟิล์มที่มีอัตราส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก 1, 3, 5 pph และฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิกร่วมกับ น้ำมันทังที่สัดส่วน 97:3, 95:5, 90:10 โดยน้ำหนัก และศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ผลของกรดโอเลอิก และผลของปริมาณน้ำมันทัง ซึ่งในแต่ละปัจจัยได้ทำการทดสอบหาค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม (% Swelling) และ การปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ (% Solid remain) ดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลของปริมาณกรดโอเลอิก

เนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ในโครงสร้างจำนวนมาก ทำให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำ ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานน้ำต่ำ ดังนั้นจึงปรับปรุงพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ให้มีสมบัติการต้านทานน้ำที่ดีขึ้นด้วย กรดโอเลอิก โดยการทำปฏิกิริยาที่หมู่ไฮดรอกซิล ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับหมู่คาร์บอกซิลิกของ กรดโอเลอิกด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งในโครงสร้างของกรดโอเลอิกมีพันธะคู่ 1 ตำแหน่งที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติได้ และมีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนสายยาว ซึ่งทำให้ความมีขั้วลดลง ส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติการต้านทานน้ำที่ดีขึ้น โดยยืนยันได้จากการทดสอบเบื้องต้นการศึกษาผลของปริมาณกรดโอเลอิกที่มีต่อการต้านทานน้ำของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุง โดยปรับเปลี่ยนปริมาณของกรดโอเลอิกเป็น 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์



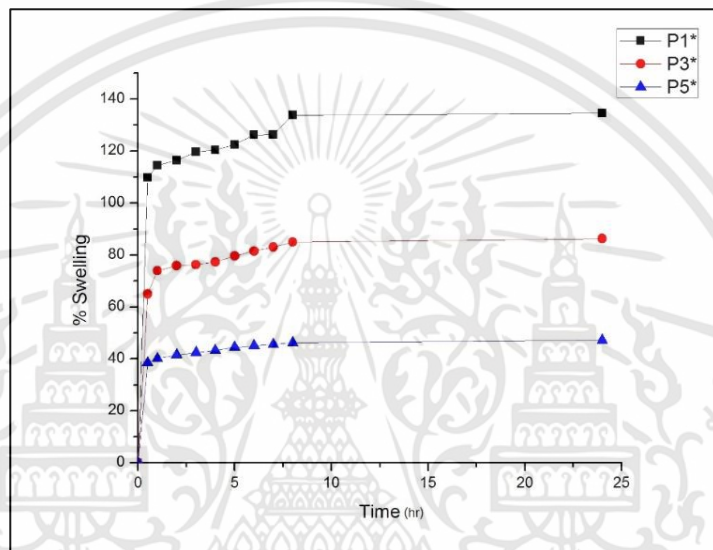
รูปที่ 4.4 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และกรดโอเลอิก [4]

4.2.1.1 การทดสอบหาค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม

จากการทดสอบหาค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม โดยนำฟิล์มไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 24 ชั่วโมง และวัดค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มดังรูปที่ 4.5 พบว่าค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

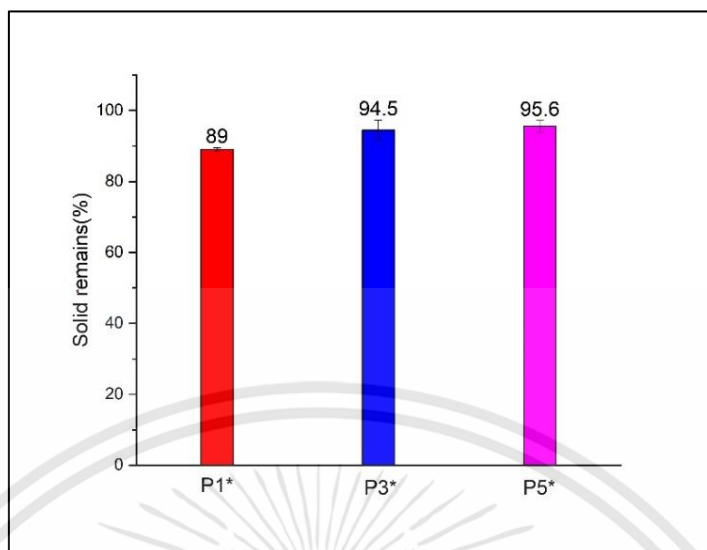
สุดท้ายของฟิล์ม (รูปที่ 4.5) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและเพิ่มขึ้นต่อเนื่องเมื่อทดสอบที่เวลาเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่เมื่อเวลาในการทดสอบผ่านไป 8 ชั่วโมง ผลจากการเพิ่มปริมาณกรดโอเลอิกจาก 1 เป็น 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม มีค่าลดลงจากประมาณ 110 % เป็น 76% และ 41 % ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณกรดโอเลอิกในสูตรฟิล์ม สามารถเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มได้ โดยการลดสภาพขี้ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เกิดการเชื่อมโยงฟิล์มที่ตำแหน่งพันธะคู่ของกรดโอเลอิก และยังมีผลจากการที่หมู่ $-COCH_3$ ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ถูกไฮโดรไลซิส กลายเป็นหมู่ $O-H$ เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.5 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตร P1*, P3*, และ P5*

4.2.1.2 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งที่เหลือ

ปริมาณของแข็งที่เหลือสามารถหาได้โดยนำสูตรฟิล์มต่าง ๆ ไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปอบจนน้ำหนักฟิล์มคงที่ จากนั้นคำนวณผลโดยใช้สูตร ดังแสดงในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.7.2 จากรูปที่ 4.6 แสดงผลค่าปริมาณของแข็งที่เหลือพบว่า ฟิล์มแต่ละสูตรมีค่าปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ในช่วง 89-96 เปอร์เซ็นต์ โดยเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณกรดโอเลอิกที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ถูกปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก ส่งผลให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีขี้ต่ำลง ทนต่อน้ำได้ดีขึ้น ทำให้มีเพียงส่วนน้อยที่ละลายเมื่อผ่านการแช่น้ำที่ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งคงเหลือหลังแช่น้ำกลั่นที่ 24 ชั่วโมงของฟิล์มสูตร P1*, P3*, และ P5*

4.2.2 ผลของระบบเชื่อมโยง

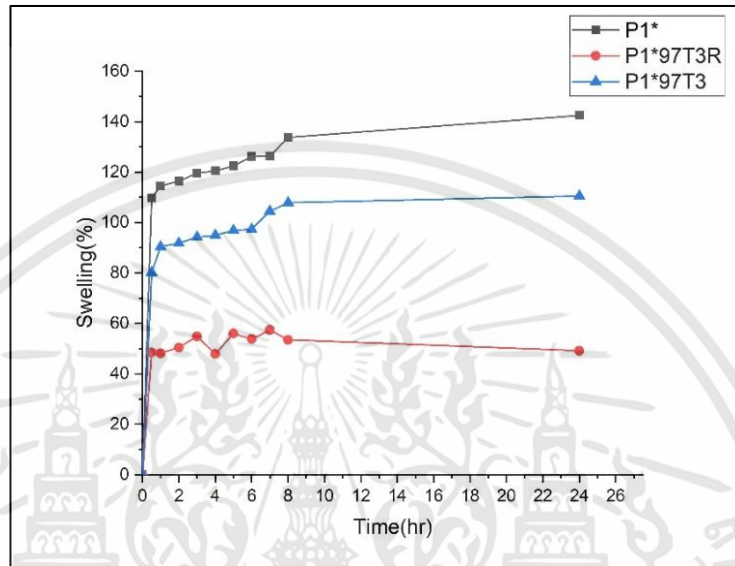
การทดลองในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของระบบเชื่อมโยงที่มีต่อสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มโดยทำการเปรียบเทียบผลของการเชื่อมโยงระหว่างการเชื่อมโยง ด้วยระบบรีด็อกซ์หรือระบบฉายแสงร่วมกับระบบรีด็อกซ์ โดยเริ่มศึกษาจากสูตรฟิล์มที่มีอัตราส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก 1 pph ต่อน้ำมันทั้ง 97:3 โดยน้ำหนัก

4.2.2.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม

จากรูปที่ 4.7 พบว่า สูตรฟิล์มมีค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มในช่วงประมาณ 50-140 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่า ระบบการเชื่อมโยงมีผลอย่างมากต่อสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์ม เมื่อมีการเชื่อมโยงฟิล์มด้วยระบบ รีด็อกซ์ (P1*97T3) พบว่าค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม มีค่าลดลง เนื่องจากตัวริเริ่มโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตสามารถแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่าง $K_2S_2O_8$ (ตัวออกซิไดซ์) และ $Na_2S_2O_3$ (ตัวรีดิวซ์) เกิดการกระตุ้นให้เกิดการเชื่อมโยงที่ตำแหน่งพันธะคู่และตำแหน่งอัลไลลิกของกรดโอเลอิก และน้ำมันทั้ง ดังรูปที่ 4.8 และ 4.11 ส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการต้านทานน้ำที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับสูตร P1* และ เมื่อมีการใช้สารไวแสง เมทิลออเรนจ์ร่วมกับการฉายแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (P1*97T3R) ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสูตรที่เชื่อมโยงด้วยระบบรีด็อกซ์ เนื่องจากพลังงานที่ได้จากการฉายแสงสามารถทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลของสารไวแสง (เมทิลออเรนจ์) เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้น (Ground State) ไปยังสถานะกระตุ้น (Excited State) ซึ่งไม่เสถียร จึงคายพลังงานออกมาอยู่ในรูปพลังงานแสง โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานสามารถไปกระตุ้นที่ตำแหน่งพันธะคู่ของกรดโอเลอิก และน้ำมันทั้งได้โดยตรง และ กระตุ้นให้ตัวริเริ่มโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้เข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่และตำแหน่งอัลไลลิกของสายโซ่โมเลกุลของกรดโอเลอิกและน้ำมันทั้ง เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุล เป็นโครงร่างตาข่ายดังรูปที่ 4.8-4.11

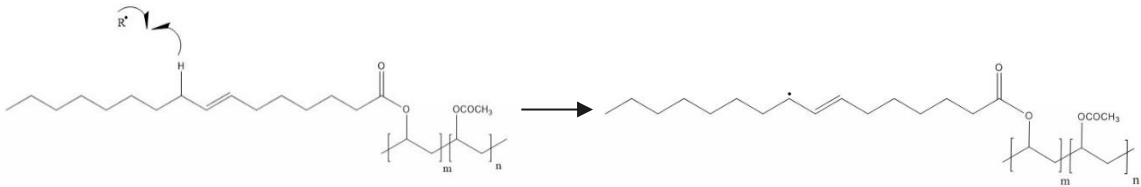


รูปที่ 4.7 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตร P1*, P1*97T3R, และ P1*97T3

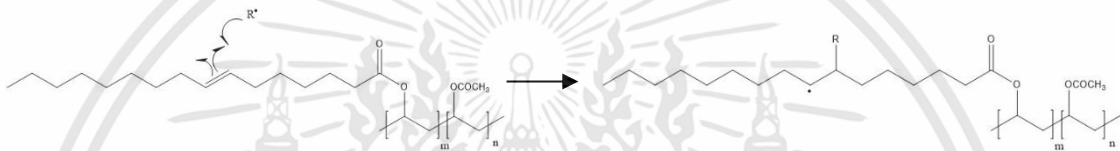
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{SO}_4^{2-} + \text{SO}_4^-$; $\text{SO}_4^- + \text{S}_2\text{O}_3^-$ โดยใช้สัญลักษณ์ R^{\bullet}

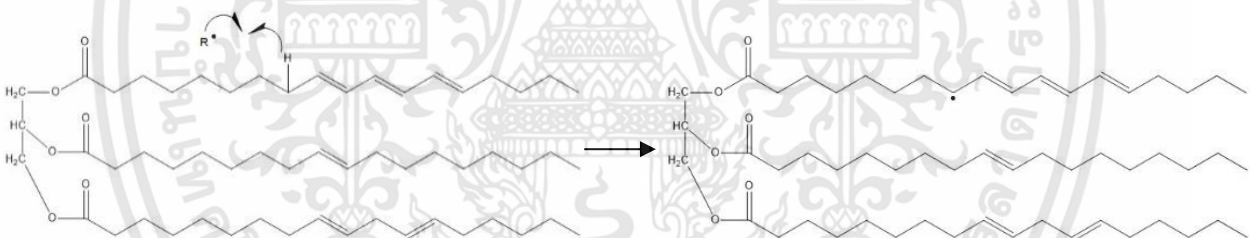
การเกิดปฏิกิริยาที่ตำแหน่งอัลไลลิกของกรดโอเลอิก



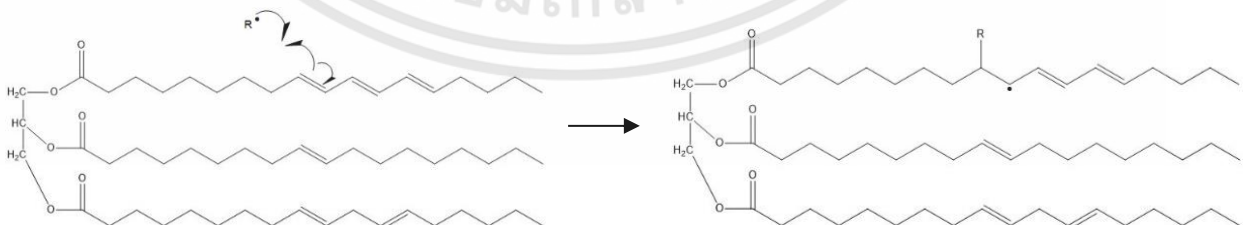
การเกิดปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ของกรดโอเลอิก



การเกิดน้ำมันหึ่งปฏิกิริยาที่ตำแหน่งอัลไลลิกของน้ำมันหึ่ง

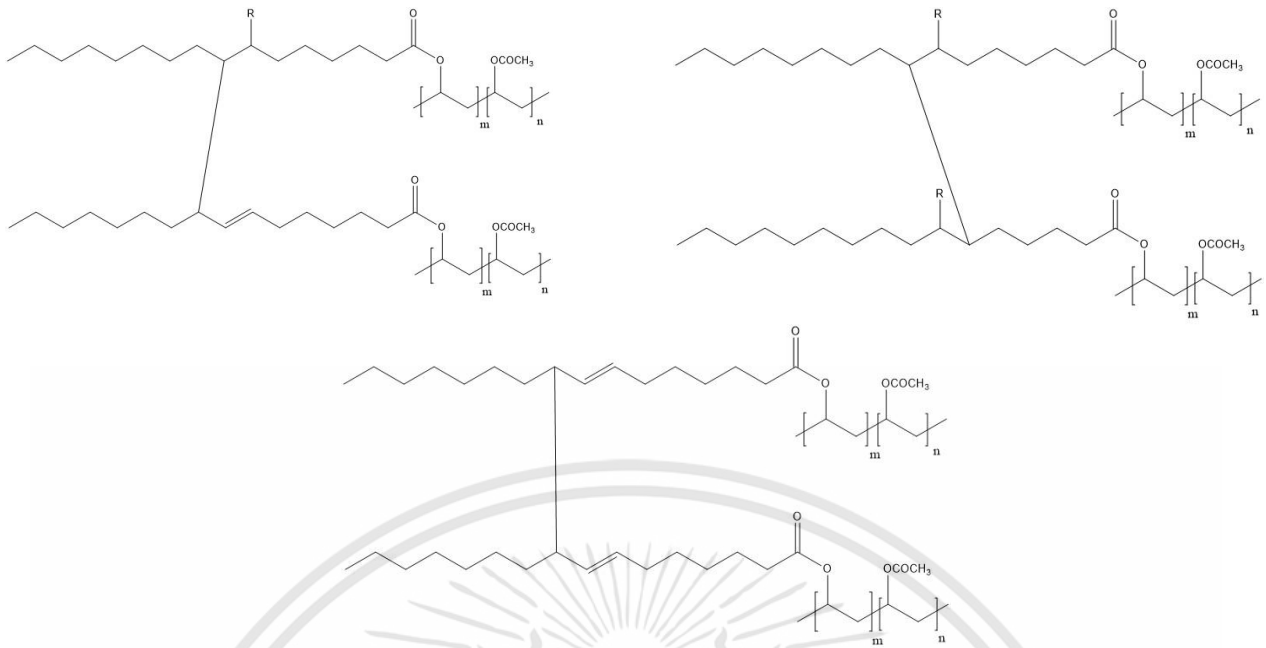


การเกิดน้ำมันหึ่งปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ของน้ำมันหึ่ง



รูปที่ 4.8 ปฏิกิริยาการแตกตัวโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต และโซเดียมไทโอซัลเฟต และทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งอัลไลลิกหรือพันธะคู่ของกรดโอเลอิก และน้ำมันหึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

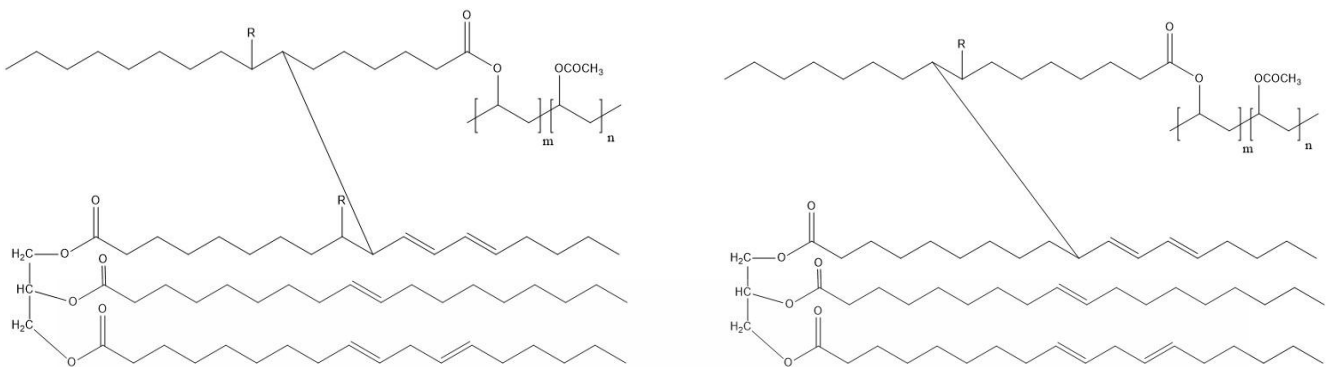


รูปที่ 4.9 การเชื่อมโยงกันของกรดโอเลอิก



รูปที่ 4.10 การเชื่อมโยงกันของน้ำมันหัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

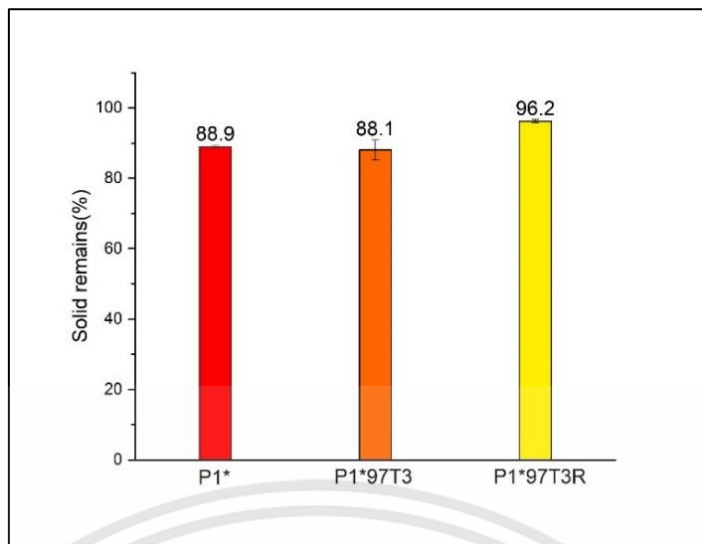


รูปที่ 4.11 การเชื่อมโยงกันระหว่างกรดโอเลอิกและน้ำมันทั้ง

4.2.2.2 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งที่เหลือ

จากรูปที่ 4.12 फिल्मแต่ละสูตรมีค่าปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ในช่วง 89-96 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่า फिल्मสูตร P1* และ P1*97T3 มีค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งที่เหลือที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามพบว่า สูตรที่มีการใช้สารไวแสงร่วมกับการฉายแสง (P1*97T3R) มีค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งที่เหลือประมาณ 96 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากพลังงานจากการฉายแสงส่งผลให้เกิดการกระตุ้นที่ตำแหน่งพันธะคู่ของกรดโอเลอิก และน้ำมันทั้งได้โดยตรง และ กระตุ้นให้ตัวริเริ่มโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้เข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ของสายโซ่อื่น เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลเป็นโครงสร้างตาข่ายอย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



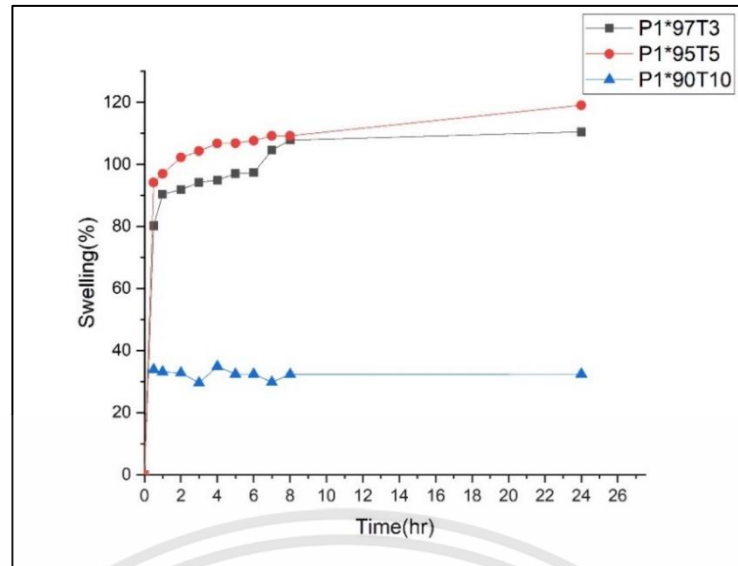
รูปที่ 4.12 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งคงเหลือหลังแช่น้ำกลั่นที่ 24 ชั่วโมงสูตร P1*, P1*97T3, และ P1*97T3R

4.2.3 ผลของปริมาณน้ำมันทั้ง

การทดลองส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณน้ำมันทั้งในสูตรฟิล์มที่มีต่อสมบัติการต้านทานน้ำโดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก (P1*) ต่อน้ำมันทั้งเป็น 97:3, 95:5 และ 90:10 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

4.2.3.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม

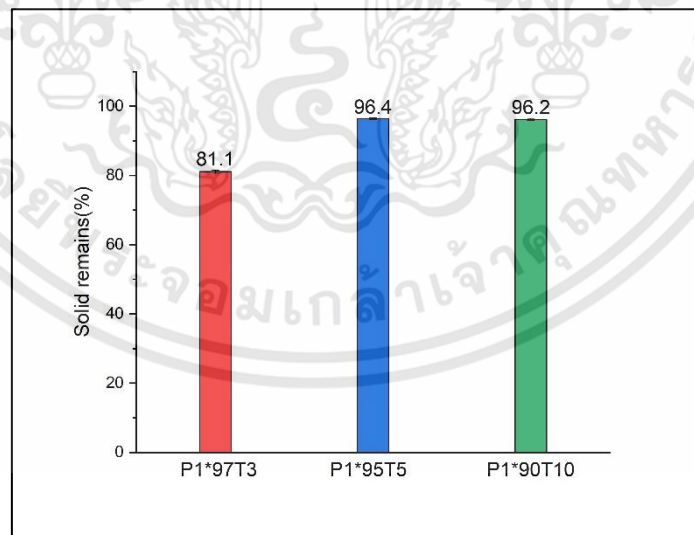
จากรูปที่ 4.13 ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มสุดท้ายของฟิล์มในสูตรที่ใช้ อัตราส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก (P1*) ต่อน้ำมันทั้งเป็น 97:3 และ 95:5 มีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามเมื่อปรับเปลี่ยนอัตราส่วนเป็น 90:10 พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักฟิล์มสุดท้ายของฟิล์ม มีค่าลดลงเนื่องจาก น้ำมันทั้งมีองค์ประกอบที่มาจาก Eleosteric acid (C18:3) ในปริมาณมาก ซึ่งมีพันธะคู่ 3 ตำแหน่งแบบคอนจูเกต มีสมบัติที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชัน จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้ดี โดยน้ำมันทั้งสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่ตำแหน่งอัลไลลิก หรือพันธะคู่กับกรดโอเลอิกหรือน้ำมันทั้งด้วยตัวเอง ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 เมื่อมีปริมาณน้ำมันทั้งเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้มีส่วนที่เชื่อมโยงกันเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลให้ฟิล์มมีค่าความต้านทานน้ำสูงขึ้น



รูปที่ 4.13 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตร P1*97T3, P1*95T5, และ P1*90T10

4.2.3.2 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งคงเหลือ

จากรูปที่ 4.14 พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือของฟิล์มสูตร P1*97T3 น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มทั้ง 2 สูตร เนื่องจาก ฟิล์มสูตรนี้มีปริมาณน้ำมันทั้งน้อยกว่าฟิล์มทั้ง 2 สูตร จึงส่งผลให้มีความหนาแน่นเชื่อมโยงที่น้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือของฟิล์มสูตร P1*95T5 และ P1*90T10 มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 96 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเชื่อมโยงที่ดีของฟิล์ม ซึ่งมีผลทั้งจากระบบเชื่อมโยง กรดโอเลอิก และ น้ำมันทั้ง ส่งผลให้มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ละลายออกมาในขั้นตอนการทดสอบ



รูปที่ 4.14 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งคงเหลือหลังแช่น้ำกลั่นที่ 24 ชั่วโมงของฟิล์มสูตร P1*97T3, P1*95T5, และ P1*90T10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของฟิล์มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ

การทดสอบการดูดความชื้น สามารถทำได้โดยนำฟิล์มเก็บในเดซิเคเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ฟิล์มแห้งจนน้ำหนักฟิล์มคงที่ จากนั้นนำไปเก็บในเดซิเคเตอร์ โดยทำการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 50 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วเปรียบเทียบผลของค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้น ในช่วงสภาวะความชื้นต่าง ๆ และเมื่อปรับเปลี่ยนสูตรฟิล์ม

4.3.1 ผลของปริมาณกรดโอเลอิกต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของฟิล์มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากปริมาณไอน้ำมีค่าสูงขึ้นจึงส่งผลให้ฟิล์มดูดความชื้นเข้ามาได้มากขึ้น และพบว่าฟิล์ม PVA มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นที่สูงที่สุดในทุกช่วงความชื้นสัมพัทธ์ลักษณะของฟิล์มหลังการทดสอบมีการเสียสภาพโดยเกิดการละลายออกของเนื้อฟิล์มจนไม่สามารถวัดค่าได้ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจาก พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ประกอบไปด้วย หมู่ -OH ในโครงสร้างจำนวนมากทำให้มีความชอบน้ำสูง แม้มีความชื้นเพียงเล็กน้อยก็สามารถดูดความชื้นได้ดี

เมื่อมีการปรับปรุงโครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยกรดโอเลอิก (ลำดับที่ 2- 4) พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นมีค่าลดลง เมื่อเทียบกับฟิล์ม PVA และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากฟิล์มมีการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก ส่งผลให้ฟิล์มมีองค์ประกอบของส่วนที่ไม่มีขั้วมากขึ้น ฟิล์มมีความชอบน้ำลดลง ส่งผลให้ดูดความชื้นได้น้อยลง อย่างไรก็ตาม ฟิล์มที่ทำการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 1 และ 3 pph เมื่อควบคุมความชื้นที่ 95 %RH พบว่า ฟิล์มมีการเสียสภาพ เนื่องจากในฟิล์มสูตรนี้มีเพียงกรดโอเลอิก ซึ่งมีจำนวนพันธะคู่เฉลี่ยเพียง 1 ตำแหน่งในแต่ละสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน ซึ่งส่งผลให้การเชื่อมโยงบริเวณตำแหน่งพันธะคู่มีปริมาณน้อย จึงทำให้สมบัติการต้านทานน้ำน้อยกว่าฟิล์มที่ทำการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 5 pph เนื้อฟิล์มยังคงอยู่ได้ และมีค่าการดูดความชื้นที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับ ฟิล์มที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 1 และ 3 pph

ตารางที่ 4.1 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของฟิล์มที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50-95 %RH

ลำดับที่	ชื่อสูตร	Moisture contents ที่ 50%RH	Moisture contents ที่ 75%RH	Moisture contents ที่ 95%RH
1	PVA film	10.26	15.40	เสียหาย
2	P1*	2.75	8.91	104.09
3	P3*	3.09	7.33	106.12
4	P5*	3.92	6.05	59.57
5	P1*97T3	4.07	9.45	109.39
6	P1*95T5	3.52	8.06	79.93
7	P1*90T10	2.44	4.18	64.44
8	P1*97T3R	5.27	7.70	47.06
9	P1*95T5R	3.38	6.80	26.08
10	P1*90T10R	2.68	5.76	28.15
11	P3*97T3	4.34	9.01	66.11
12	P3*95T5	3.62	7.58	40.82
13	P3*90T10	3.05	7.34	40.91
14	P1*97T3Co	5.63	14.30	100.66
15	P1*95T5Co	8.75	10.82	80.00
16	P1*90T10Co	3.20	9.44	54.69
17	P3*97T3Co	7.76	19.70	42.11
18	P3*95T5Co	5.51	7.72	40.08
19	P3*90T10Co	4.63	5.93	39.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลของปริมาณน้ำมันทั้งต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของฟิล์มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.1 ลำดับที่ 5-7 พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น เมื่อมีการเพิ่มปริมาณน้ำมันทั้งในเนื้อฟิล์มเพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของฟิล์มจะมีค่าลดลงในทุกช่วงความชื้นสัมพัทธ์ อย่างไรก็ตามพบว่า ที่ปริมาณสูตรฟิล์มที่มีการใช้ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้าง 1 pph (P1*) ต่อน้ำมันทั้งเป็น 97:3 และ 95:5 มีค่าการดูดความชื้นในช่วง 50-75 %RH ที่ใกล้เคียงกันแต่ในสัดส่วนที่มีการใช้ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้าง 1 pph (P1*) ต่อน้ำมันทั้งเป็น 90:10 นั้นมีค่าการดูดความชื้นต่ำกว่าทุกสูตร เนื่องจากในเนื้อฟิล์มมีปริมาณน้ำมันทั้งมาก ทำให้มีความหนาแน่นเชื่อมโยงมากส่งผลให้ความชื้นซึมผ่านเนื้อฟิล์มได้ยาก

4.3.3 ผลของระบบเชื่อมโยงต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของฟิล์มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.1 ลำดับที่ 5-7 และ 8-10 เป็นการเปรียบเทียบผลของระบบเชื่อมโยงโดยเปรียบเทียบระหว่าง ฟิล์มที่ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก 1 pph (P1*) ร่วมกับน้ำมันทั้ง 97:3, 95:5 และ 90:10 เชื่อมโยงด้วยระบบรีด็อกซ์ และระบบรีด็อกซ์ร่วมกับการฉายแสง พบว่าสูตรฟิล์มที่มีการฉายแสงมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้น ที่ใกล้เคียงกัน ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50 - 75 %RH ในทุก ๆ สูตร อย่างไรก็ตามที่ความชื้นสัมพัทธ์ 95 %RH สูตรฟิล์มที่มีการฉายแสง มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นที่ต่ำกว่าสูตรที่ไม่มีการฉายแสงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการฉายแสงทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้น ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้เข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งพันธะคู่ของสายโซ่ของน้ำมันทั้งและกรดโอเลอิก เกิดพันธะเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลเป็นโครงร่างตาข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้มีความหนาแน่นเชื่อมโยงสูงกว่าสูตรที่ไม่มีการฉายแสง ส่งผลให้ฟิล์มมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นต่ำ

4.3.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิกร่วมกับน้ำมันทั้ง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ

จากตารางที่ 4.1 ลำดับ 5-7 และ 11-13 เป็นการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของ ฟิล์มที่มีการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิกร่วม 1 pph และ 3 pph ร่วมกับน้ำมันทั้งในอัตราส่วน 97:3, 95:5, และ 90:10 พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของสูตรฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกัน ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50-75 %RH เนื่องจากสูตรฟิล์มมีการเชื่อมโยงเป็นโครงร่างแบบสามมิติ ความชื้นสามารถซึมผ่านได้น้อย ทำให้ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ดังกล่าว ฟิล์มสามารถดูดความชื้นได้เพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามที่ความชื้นสัมพัทธ์ 95 %RH ฟิล์มที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 1 pph ร่วมกับน้ำมันทั้ง มีค่าการดูดความชื้นที่สูงกว่าสูตรฟิล์มที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 3 pph ร่วมกับน้ำมันทั้ง เนื่องจาก ในเนื้อฟิล์มมีปริมาณกรดโอเลอิกน้อยกว่า เกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่

ของกรดโอเลอิกกับน้ำมันทั้งน้อยกว่า ส่งผลให้มีความหนาแน่นเชื่อมโยงน้อยกว่า ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นมีค่ามากกว่า

4.3.5 ผลของการเติม CoCl_2 ต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นของฟิล์มที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดความชื้นของฟิล์ม งานวิจัยนี้จึงทำการเติมสารช่วยดูดความชื้น CoCl_2 ลงในเนื้อฟิล์ม จากนั้นนำฟิล์มเก็บในเดซิเคเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ฟิล์มแห้งจนน้ำหนักฟิล์มคงที่ จากนั้นนำไปเก็บในเดซิเคเตอร์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 50 ถึง 95 %RH เป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วทำการเปรียบเทียบผลของค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้น กับสูตรฟิล์มที่ไม่มีการเติม CoCl_2

จากตารางที่ 4.1 ลำดับที่ 5-7 และ 14-16 เป็นการเปรียบเทียบสูตรฟิล์มที่ใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 1 pph ร่วมกับน้ำมันทั้ง 97:3, 95:5 และ 90:10 โดยแบ่งเป็นสูตรที่เติมและไม่เติม CoCl_2 พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นเพิ่มขึ้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50-75 %RH เนื่องจาก CoCl_2 สามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำในอากาศได้จึงมีความสามารถในการดูดความชื้นที่ดี เมื่ออยู่ในเนื้อฟิล์มสามารถช่วยดึงน้ำเข้ามาอยู่ในฟิล์มได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์ดูดความชื้นมีค่าสูงขึ้นแม้มีความชื้นในอากาศอยู่น้อย อย่างไรก็ตาม ที่ความชื้น 95 %RH แม้จะมีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นสูงที่สุด แต่ค่าการดูดความชื้นของฟิล์มทั้ง 2 ระบบ ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มสูตรที่ไม่มี CoCl_2 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 95 %RH สามารถดูดความชื้นได้สูงอยู่แล้ว ส่งผลให้ฟิล์มสามารถดูดความชื้นได้มากที่สุดอยู่แล้ว ดังนั้นการเติม CoCl_2 ลงในฟิล์มจึงไม่พบความแตกต่าง

ตารางที่ 4.1 ลำดับที่ 11-13 และ 17-19 เป็นการเปรียบเทียบสูตรฟิล์มที่ใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 3 pph ร่วมกับน้ำมันทั้ง 97:3, 95:5 และ 90:10 โดยแบ่งเป็นสูตรที่เติมและไม่เติม CoCl_2 พบว่า ฟิล์มเฉพาะสูตร P3*97T3 มีการเปลี่ยนแปลง เปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นเมื่อมีการเติม CoCl_2 ในทุกช่วงความชื้นสัมพัทธ์ แต่ฟิล์มสูตร P3*95T5Co และ P3*90T10Co ไม่พบความแตกต่างที่ชัดเจนเมื่อเติม CoCl_2 เนื่องจากฟิล์มสูตรนี้มีปริมาณกรดโอเลอิกในเนื้อฟิล์มมากกว่าส่งผลให้มีความไม่ชอบน้ำมากกว่า และเมื่อมีปริมาณน้ำมันทั้งมากขึ้นส่งผลให้มีความหนาแน่นเชื่อมโยงสูงขึ้นซึ่งทำให้ความชื้นผ่านเข้ามาได้ยากแม้จะมี CoCl_2 อยู่ในเนื้อฟิล์ม

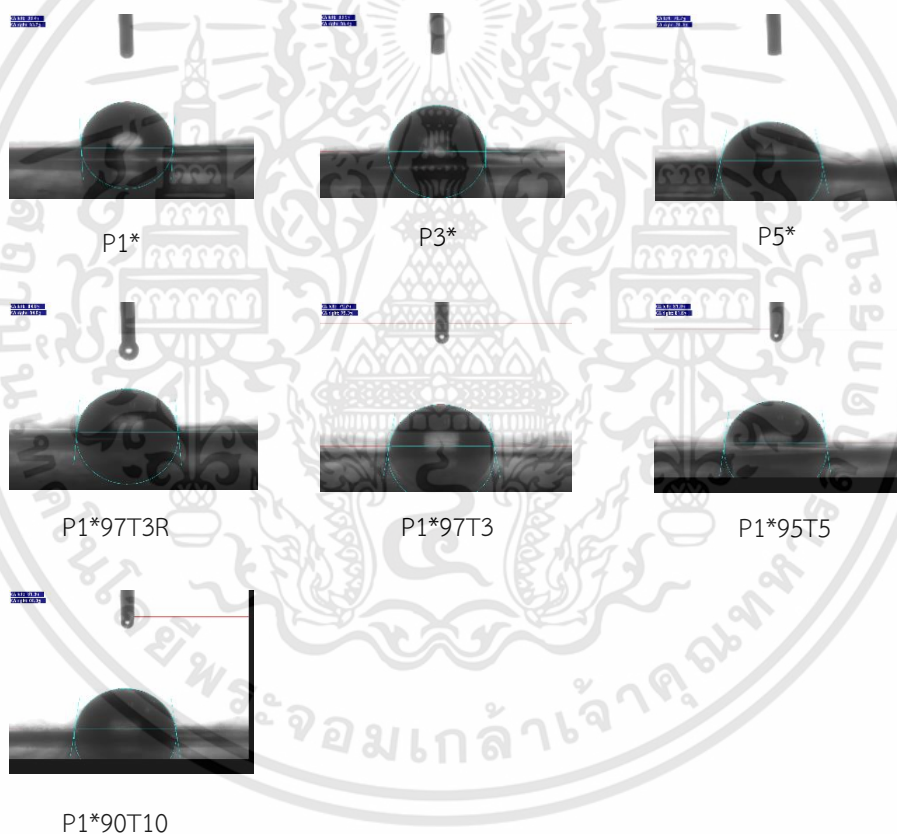
4.4 การทดสอบมุมสัมผัส (Initial Contact Angle)

การทดสอบมุมสัมผัสด้วยน้ำกลั่น ได้ทำการเลือกสูตรฟิล์มดังนี้ P1*, P3*, P5*, P1*97T3R, P1*97T3, P1*95T5, และ P1*90T10

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 เป็นการวัดค่ามุมสัมผัสที่นาที่เริ่มต้นของฟิล์มแต่ละสูตร พบว่า ฟิล์มในสูตรที่ยังไม่มีการปรับปรุงโครงสร้างร่วมกับน้ำมันทั้ง (P1*, P3*, P5*) มีค่ามุมสัมผัสที่ไม่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

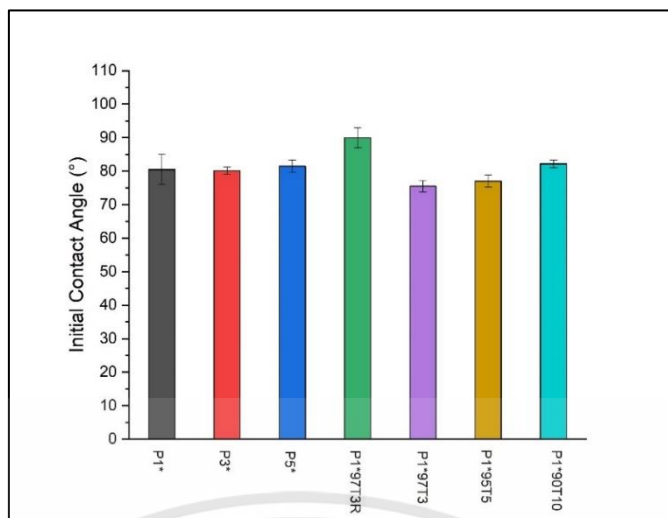
แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และมีค่ามุมสัมผัสอยู่ในช่วง 75 -80 องศา ซึ่งแสดงถึงภาวะการเปียกของผิวอยู่ในระดับที่ค่อนข้างไม่ดี และเมื่อมีการปรับปรุงฟิล์มร่วมกับน้ำมันทั้งในสัดส่วน 97:3 และ เชื่อมโยงฟิล์มด้วยระบบบริดจ์ร่วมกับการฉายแสง (P1*97T3R) พบว่าค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้นเป็น 90 องศาแสดงถึงการเปียกที่ไม่ดีของพื้นผิว ซึ่งแสดงให้เห็นความสามารถในการต้านทานน้ำที่ดีของฟิล์ม ทำให้หยดน้ำสามารถก่อตัวเป็นทรงหยดน้ำได้ ทั้งนี้ เนื่องจากการปรับปรุงโครงสร้างของพอลิไวนิล แอลกอฮอล์ด้วยกรดโอเลอิก และน้ำมันทั้ง ทำให้ความมีขี้ขี้ต่ำลง

ในฟิล์มสูตรที่ไม่มีการฉายแสง (P1*97T3, P1*95T5, และ P1*90T10) เมื่อเปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสกับฟิล์มที่มีการฉายแสง พบว่าค่ามุมสัมผัสมีค่าลดลงแสดงถึงประสิทธิภาพเชื่อมโยงที่ต่ำกว่าแบบฉายแสง และยังพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณน้ำมันทั้งค่ามุมสัมผัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณน้ำมันทั้งเป็นการเพิ่มส่วนที่ไม่มีขี้ขี้ในเนื้อฟิล์ม จึงส่งผลให้พื้นผิวฟิล์มมีความชอบน้ำลดลง



รูปที่ 4.15 ตัวอย่างการวัดมุมสัมผัสเริ่มต้นของฟิล์มสูตรต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

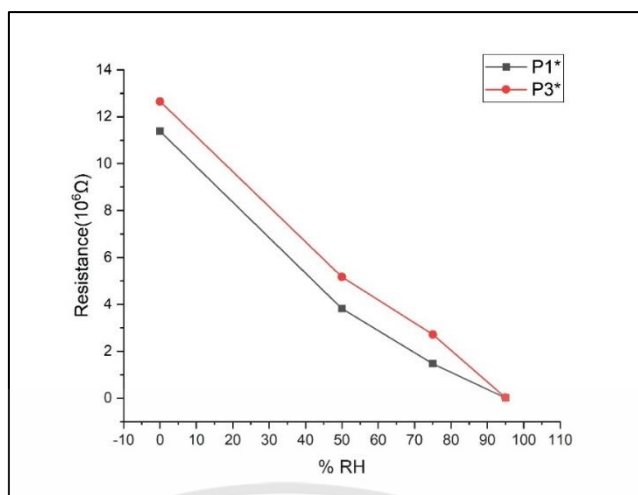
4.5 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ

จากการทดสอบค่าเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นพบว่า ฟิล์มที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 5 pph และฟิล์มสูตรที่มีการเชื่อมโยงด้วยระบบบริดจร่วมกับการฉายแสง มีค่าการเปอร์เซ็นต์ดูดความชื้นที่ต่ำมาก ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าสูงมากจนไม่เหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นวัสดุตรวจจับความชื้น ในผลการทดลองส่วนนี้จึงทำการเลือกฟิล์มที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 1 pph และ 3pph ร่วมกับน้ำมันทั้ง 97:3, 95:5, และ 90:10 มาทำการควบคุมความชื้นในช่วง 0-95 %RH และนำมาวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าทานด้วยเทคนิค 4 point probe measurement เพื่อศึกษาสมบัติการตอบสนองต่อความชื้นของฟิล์ม

4.5.1 ผลของปริมาณกรดโอเลอิกต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.17 เป็นการเปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างฟิล์มสูตรที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 1 และ 3 pph (P1* และ P3*) พบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง $12.65 \times 10^6 - 1.65 \times 10^4 \Omega$ ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มวัสดุฉนวนไฟฟ้า ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในอากาศที่ถูกดูดเข้ามาในฟิล์ม โดยพบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น และพบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มสูตร P1* มีค่าต่ำกว่า P3* ในช่วงความชื้น 0-75 %RH อย่างไรก็ตามความชื้นสัมพัทธ์ที่ 95 %RH ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิกส่งผลให้ฟิล์มมีขั้วน้อยลง และมีการเชื่อมโยงกันเป็นโครงร่างตาข่ายบริเวณตำแหน่งพันธะคู่ของกรดโอเลอิกซึ่งส่งผลให้ฟิล์มมีความชอบน้ำลดลง อย่างไรก็ตามฟิล์มสูตร P3* มีปริมาณกรดโอเลอิกมากกว่า ส่งผลให้มีการเชื่อมโยงมากกว่า ทำให้ดูดความชื้นได้น้อยกว่า ซึ่งส่งผลให้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าสูตร P1* อย่างไรก็ตามฟิล์มทั้ง 2 สูตร มีการเสถียรภาพเมื่อทำการควบคุมความชื้นที่ 95 %RH เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มสูตร P1* และ P3* ที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0-95 %RH

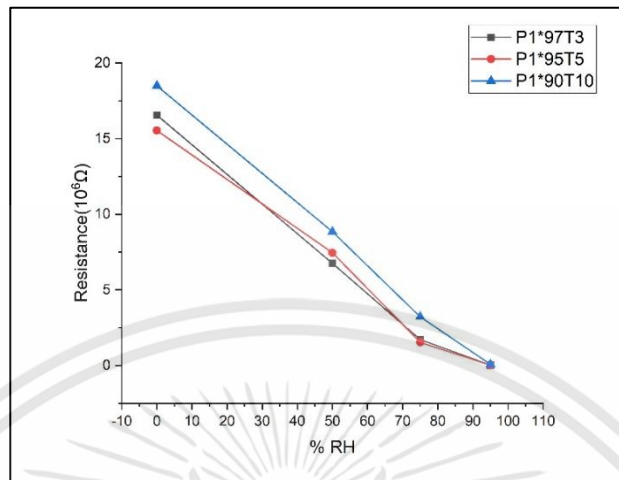
4.5.2 ผลของปริมาณน้ำมันทั้งต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่สถานะความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.18 เป็นการเปรียบเทียบผลของการปรับปรุงโครงสร้างของฟิล์มด้วยกรดโอเลอิก ร่วมกับน้ำมันทั้งในอัตราส่วน 97:3, 95:5, และ 90:10 พบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มสูตร P1* และ P3* โดยอยู่ในช่วง $18 \times 10^6 - 1.71 \times 10^4 \Omega$ โดยพบว่า ฟิล์มที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิกร่วมกับน้ำมันทั้ง ในสัดส่วน 97:3 และ 95:5 (P1*97T3 และ P1*95T5) มีค่าความต้านทานไฟฟ้าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมันทั้งในสัดส่วน 90:10 (P1*90T10) พบว่ามีค่าความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าทั้ง 2 สูตรข้างต้นในทุกช่วงความชื้น เนื่องจากน้ำมันทั้งสามารถเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่ตำแหน่งอัลลิลิก หรือพันธะคู่กับกรดโอเลอิกหรือน้ำมันทั้งด้วยตัวเอง หรือ เกิดการเชื่อมโยงข้ามสายโซ่ ระหว่างกรดโอเลอิกและน้ำมันทั้ง เมื่อมีปริมาณน้ำมันทั้งมากขึ้น จึงส่งผลให้มีตำแหน่งที่เกิดการเชื่อมโยงสูงขึ้น มีความหนาแน่นเชื่อมโยงสูงขึ้น เป็นผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นเนื่องจากฟิล์มดูดความชื้นได้ลดลง

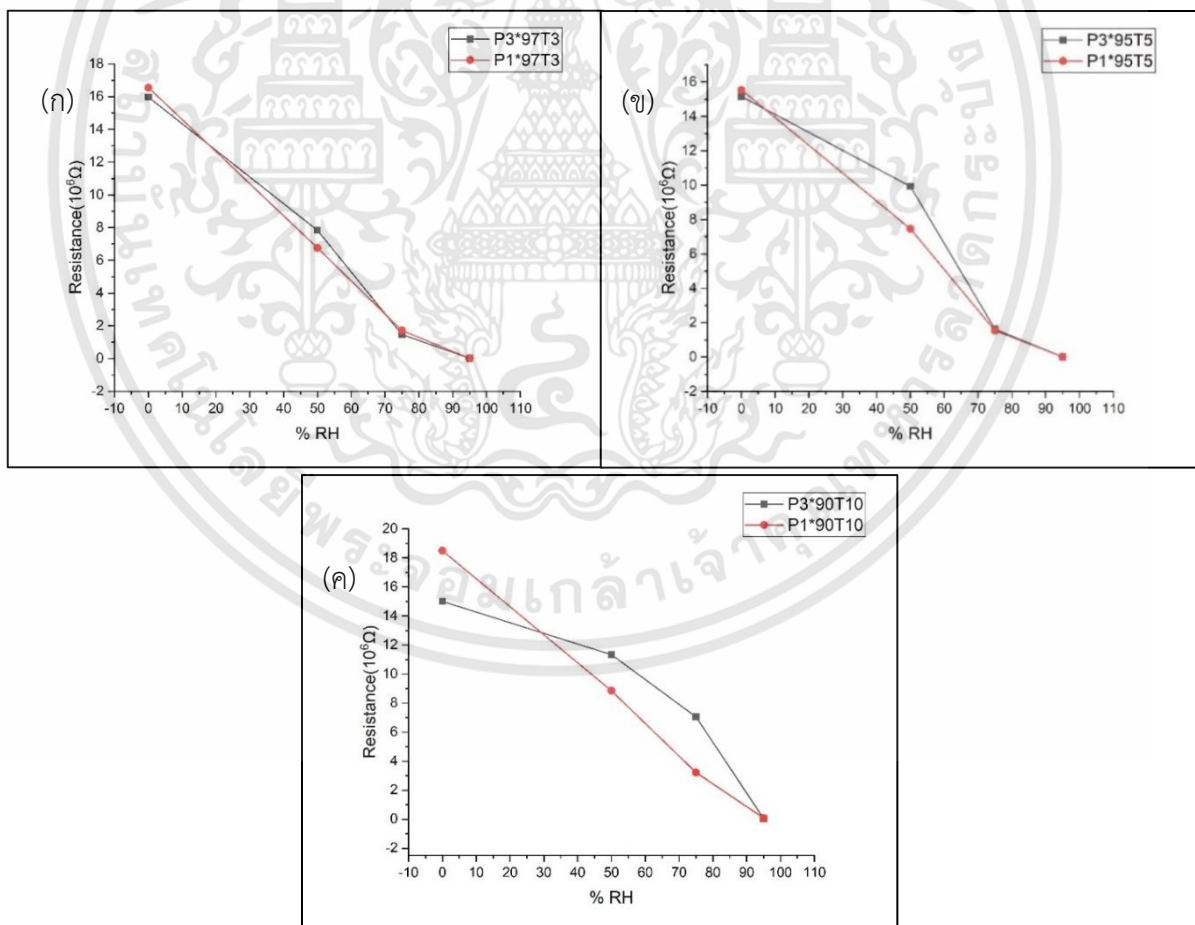
เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่างฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 1 pph และ 3 pph ร่วมกับน้ำมันทั้งในสัดส่วน 97:3, 95:5, และ 90:10 ดังแสดงในรูป 4.19 พบว่า ฟิล์มสูตร P1*97T3 และ P3*97T3 มีค่าความต้านทานไฟฟ้าใกล้เคียงกันในทุก ๆ ช่วงความชื้นสัมพัทธ์โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง $16.55 \times 10^6 - 1.26 \times 10^4 \Omega$ เนื่องจากฟิล์ม 2 สูตรนี้มีน้ำมันทั้งน้อย ทำให้ความหนาแน่นเชื่อมโยงน้อยกว่าฟิล์มสูตรอื่น ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดความชื้นที่ใกล้เคียงกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าฟิล์มสูตร P1*90T10 และ P3*90T10 พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มทั้ง 2 สูตรนี้มีค่าต่างกันในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50-75 %RH เนื่องจากในฟิล์มทั้งสองสูตรนี้มีปริมาณน้ำมันทั้งสูง ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการดูดความชื้นของฟิล์มลดลง ค่า

ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มจึงมีค่าสูงขึ้นและมีความแตกต่างกันมากกว่า สูตรที่มีปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้างต่อน้ำมันทั้ง 97:3 และ 95:5



รูปที่ 4.18 ค่าความต้านทานไฟฟ้าสูตร P1*97T3, P1*95T5, และ P1*90T10 ของฟิล์มในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0-95 %RH

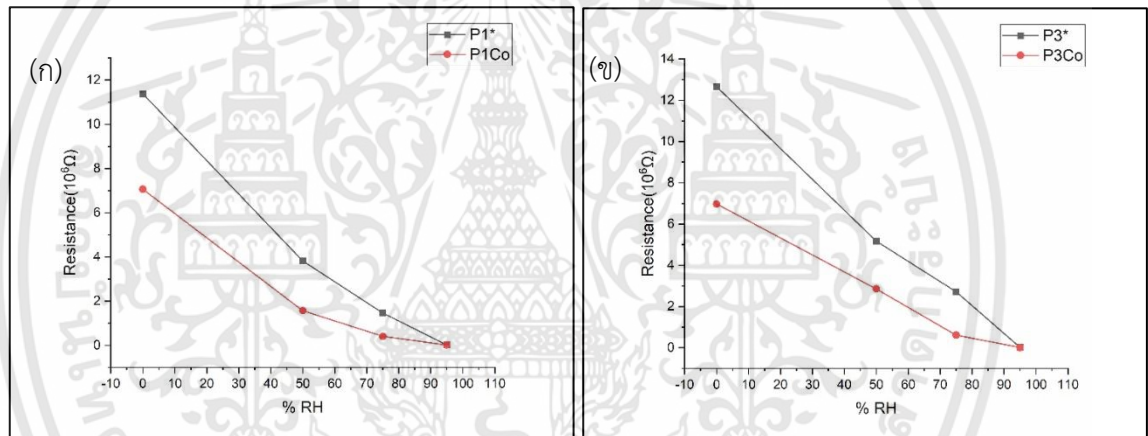


รูปที่ 4.19 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0-95 %RH ก) สูตร P3*97T3 และ P1*97T3 ข) สูตร P3*95T5 และ P1*95T5 ค) สูตร P3*90T10 และ P1*90T10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

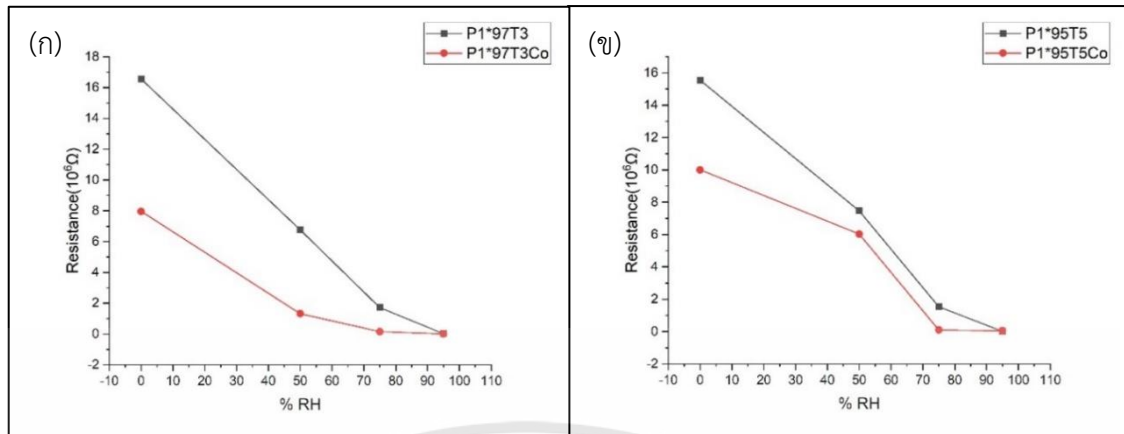
4.5.3 ผลของการเติม CoCl_2 ต่อความสามารถในการตรวจจับความชื้นของฟิล์มที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ

เพื่อเพิ่มความสามารถในการตรวจจับความชื้นของฟิล์ม จึงทำการเติม CoCl_2 ลงในเนื้อฟิล์มที่นำมาตรวจวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า จากรูปที่ 4.20 เป็นการเปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มสูตร P1^* และ P3^* ที่ไม่มีการเติม CoCl_2 และฟิล์มสูตรที่มีการเติม CoCl_2 คือ $\text{P1}^*\text{Co}$ และ $\text{P3}^*\text{Co}$ พบว่า เมื่อทำการเติม CoCl_2 ฟิล์มสามารถอ่านค่าความต้านทานได้ต่ำ ลงในทุกช่วงความชื้นสัมพัทธ์ โดยมีอัตราการลดลงเฉลี่ยถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ในทุก ๆ ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นผลเนื่องจาก CoCl_2 สามารถเกิดพันธะกับน้ำในอากาศได้ มีสมบัติในการดูดความชื้นที่ดี เมื่ออยู่ในเนื้อฟิล์มจึงมีส่วนช่วยดูดความชื้นเข้ามาในฟิล์มได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าในเนื้อฟิล์มมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามฟิล์มสูตร $\text{P1}^*\text{Co}$ และ $\text{P3}^*\text{Co}$ มีการเสถียรภาพของฟิล์มเมื่อมีการควบคุมความชื้นที่ 95 %RH



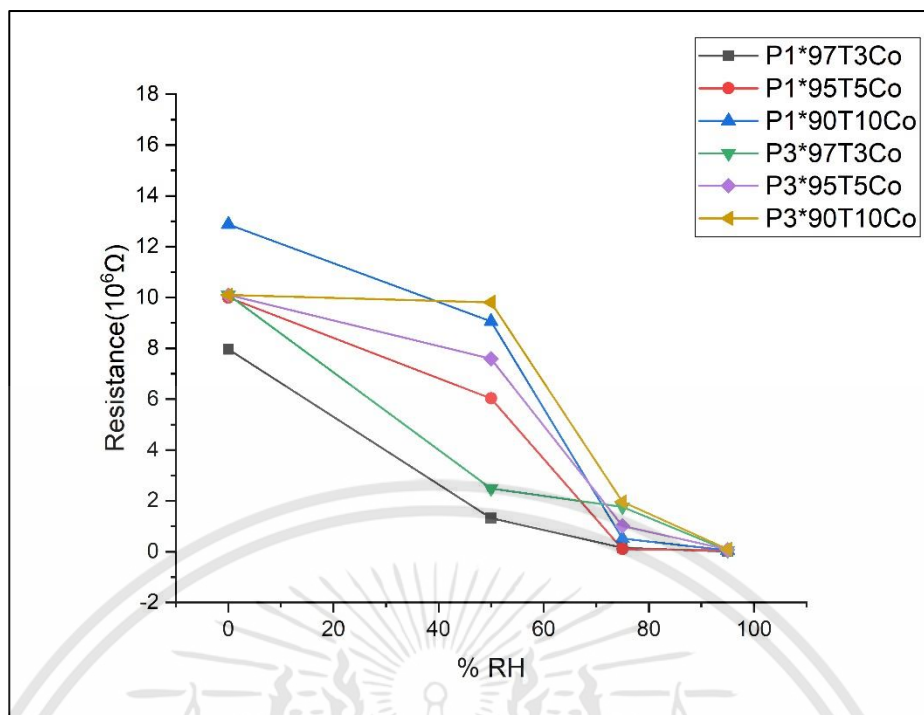
รูปที่ 4.20 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0-95 %RH ก) สูตร P1^* และ $\text{P1}^*\text{Co}$ ข) สูตร P3^* และ $\text{P3}^*\text{Co}$

จากรูปที่ 4.21 เป็นการเปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าระหว่าง ฟิล์มสูตร $\text{P1}^*97\text{T3}$, $\text{P1}^*95\text{T5}$, และ $\text{P1}^*90\text{T10}$ โดยเปรียบเทียบกับสูตรที่มีการเติม CoCl_2 พบว่าเมื่อมีการเติม CoCl_2 ลงในเนื้อฟิล์ม ค่าความต้านทานจะมีค่าลดลง ในทุก ๆ ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ และพบว่า ฟิล์มสูตร $\text{P1}^*97\text{T3Co}$ มีร้อยละการลดลงของค่าความต้านทานไฟฟ้ามากที่สุด และฟิล์มสูตร $\text{P1}^*90\text{T10Co}$ มีร้อยละการลดลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อยที่สุด เนื่องมาจาก ในเนื้อฟิล์มมีปริมาณน้ำมันทั้งอยู่ในปริมาณมากส่งผลให้มีการเชื่อมโยงที่หนาแน่น ทำให้ความชื้นในอากาศซึมผ่านไปในเนื้อฟิล์มได้ยากแม้จะมีการเติม CoCl_2 ลงไปในเนื้อฟิล์มก็ตาม



รูปที่ 4.21 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0-95 %RH ก) สูตร P1*97T3 และ P1*97T3Co ข) สูตร P1*95T5 และ P1*95T5Co ค) สูตร P1*90T10 และ P1*90T10Co

จากรูปที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานไฟฟ้าของสูตรฟิล์มที่มีการเติม CoCl_2 ช่วงค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มมีค่าต่ำลงเมื่อเทียบกับสูตรฟิล์มที่ไม่มีการเติม CoCl_2 และพบว่าฟิล์มที่ใช้ P3* ร่วมกับน้ำมันทั้ง ทุกสัดส่วนมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูงกว่า สูตรที่ใช้ P1* ร่วมกับน้ำมันทั้งโดยเห็นได้อย่างชัดเจนในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50 %RH เนื่องจากฟิล์มในสูตรนี้ มีปริมาณกรดโอเลอิกมีมากกว่าทำให้มีตำแหน่งเชื่อมโยงที่มากกว่า ซึ่งส่งผลให้มีความหนาแน่นเชื่อมโยงสูงกว่า ทำให้ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ฟิล์มสามารถดูดความชื้นเข้ามาได้น้อยกว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าจึงมีค่าสูงกว่าอย่างชัดเจน

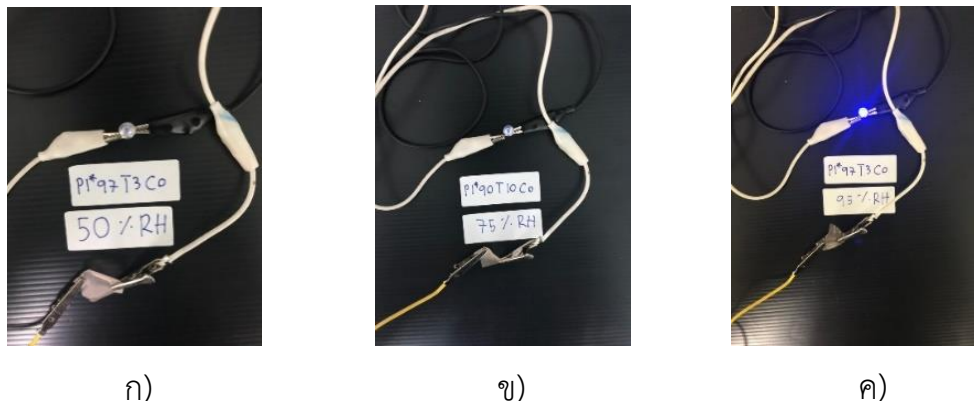


รูปที่ 4.22 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0-95 %RH ของสูตรฟิล์มที่มีการเติม CoCl_2 ลงในเนื้อฟิล์ม

4.6 การจำลองการประกอบวงจรไฟฟ้าโดยมีฟิล์มสูตรต่าง ๆ เป็นส่วนประกอบของวงจร

การจำลองการประกอบวงจรไฟฟ้า เป็นการศึกษาการนำฟิล์มไปประยุกต์ใช้งานโดยทำการเลือกสูตรฟิล์ม ดังตารางที่ 4.2 โดยทำการประกอบวงจรตามหัวข้อที่ 3.7.8 ที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50-90 %RH พบว่าเมื่อปรับเปลี่ยนความชื้นสัมพัทธ์หลอดไฟ LED มีการตอบสนอง (ไฟติด) ที่แตกต่างกัน โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50 %RH มีฟิล์ม P1*97T3Co เพียงสูตรเดียวเท่านั้นที่สามารถทำให้หลอดไฟ LED ติดได้ เนื่องจาก ฟิล์มสูตรนี้มีปริมาณกรดโอเลอิกและน้ำมันที่น้อยกว่าฟิล์มสูตรอื่น ทำให้มีความหนาแน่นเชื่อมโยงน้อยกว่าสูตรอื่น และยังมี CoCl_2 ในเนื้อฟิล์มซึ่งช่วยดูดความชื้นในอากาศเข้ามาในเนื้อฟิล์มได้มากขึ้น ฟิล์มมีความต้านทานลดลงในช่วงความชื้นต่ำ จึงส่งผลให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้มากกว่าฟิล์มสูตรอื่น และเมื่อปรับความชื้นสัมพัทธ์เป็น 75 %RH พบว่าฟิล์มทุกสูตรสามารถทำให้หลอดไฟ LED ติดได้ยกเว้นเพียงสูตร P5*90T10 เนื่องจากฟิล์มสูตรนี้มีปริมาณกรดโอเลอิกและน้ำมันที่มากกว่าฟิล์มสูตรอื่น มีความหนาแน่นเชื่อมโยงมาก ทำให้ความชื้นสามารถผ่านเข้าไปในเนื้อฟิล์มได้ยาก ฟิล์มจึงมีความต้านทานสูง กระแสไฟฟ้าจึงไหลผ่านได้ยาก ทั้งนี้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 95 %RH พบว่าฟิล์มทุกสูตร สามารถทำให้หลอด LED ติดได้ เนื่องจากในอากาศมีปริมาณไอน้ำในอากาศมาก ฟิล์มสามารถดูดความชื้นได้มากขึ้นจึงส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 ตัวอย่างการประกอบวงจรไฟฟ้า โดยใช้ฟิล์มสูตร P1*97T3Co เป็นส่วนประกอบของวงจร ก) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50 %RH ข) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75 %RH ค) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 95 %RH

ตารางที่ 4.2 การติดของหลอดไฟ LED ที่ความชื้นสัมพัทธ์ช่วง 50-95 %RH ของฟิล์มสูตรต่างๆ

ลำดับที่	ชื่อสูตร	50%RH	75%RH	95%RH
1	P1*97T3	-	/	/
2	P1*95T5	-	/	/
3	P1*90T10	-	/	/
4	P3*97T3	-	/	/
5	P3*95T5	-	/	/
6	P3*90T10	-	/	/
8	P5*95T5	-	/	/
9	P5*90T10	-	-	/
10	P1*97T3Co	/	/	/
11	P1*95T5Co	-	/	/
12	P1*90T10Co	-	/	/
13	P3*97T3Co	-	/	/
14	P3*95T5Co	-	/	/
15	P3*90T10Co	-	/	/

/ = หลอดไฟ LED ติด

- = หลอดไฟ LED ไม่ติด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1 เวลาการตอบสนองของหลอดไฟ LED ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ

งานวิจัยนี้จึงได้เลือกสูตรฟิล์มที่ใช้ศึกษาการสร้างวงจรตรวจจับความชื้นอย่างง่าย มาทำการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 50-95 %RH แล้วจับเวลาเพื่อดูการตอบสนองของหลอดไฟ LED ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่า หลอดไฟ LED มีการติดที่ช้า ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ 50 %RH และมีการติดที่เร็วขึ้นเมื่อ ทดสอบที่ความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น โดย ฟิล์มสูตร P1*97T3Co มีการตอบสนองของหลอดไฟ LED อยู่ในเวลา 120, 65, และ 20นาทีกี่ ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50, 75, และ 95 %RH ตามลำดับ ฟิล์มสูตร P1*97T3 มีการตอบสนองของหลอดไฟ LED เฉพาะที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75 และ 95 %RH ที่ 64 และ 22 นาทีกี่ตามลำดับ และฟิล์มสูตร P5*90T10 มีการตอบสนองของหลอดไฟ LED เฉพาะที่ความชื้นสัมพัทธ์ 95 %RH ที่เวลา 50 นาที

ตารางที่ 4.3 เวลาการติดของหลอดไฟ LED ของฟิล์มสูตร P1*97T3Co, P1*97T3, และP5*90T10 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ

ลำดับที่	ชื่อสูตร	50%RH	75%RH	95%RH
1	P1*97T3Co	120 นาที	65 นาที	20 นาที
2	P1*97T3	ไม่ตอบสนอง	64 นาที	22 นาที
3	P5*90T10	ไม่ตอบสนอง	ไม่ตอบสนอง	50 นาที

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมวัสดุตรวจจับความชื้นจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิกร่วมกับน้ำมันทั้ง โดยทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ผลของปริมาณกรดโอเลอิก ปริมาณน้ำมันทั้ง และ ผลของระบบเชื่อมโยง ด้วยการทดสอบสมบัติเบื้องต้น คือ ปริมาณน้ำคงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์ม และ ค่าปริมาณของแข็งคงเหลือ จากการศึกษาสมบัติการเบื้องต้นของฟิล์มพบว่า ฟิล์มมีสมบัติการต้านทานน้ำสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณกรดโอเลอิกและน้ำมันทั้งในเนื้อฟิล์ม นอกจากนี้เมื่อมีการเชื่อมโยงฟิล์มด้วยระบบฉายแสงร่วมกับสารไวแสง ทำให้ฟิล์มมีสมบัติการต้านทานน้ำที่สูงขึ้น จากนั้นนำฟิล์มมาทดสอบสมบัติอื่น ๆ ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- จากการศึกษาสมบัติการดูดความชื้นของฟิล์ม ที่ความชื้นสัมพัทธ์ช่วง 50-95 %RH พบว่าฟิล์มมีการดูดความชื้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อทดสอบในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้น โดยพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณกรดโอเลอิกและน้ำมันทั้ง ฟิล์มสามารถดูดความชื้นได้ลดลง เมื่อเพิ่ม CoCl_2 ลงในเนื้อฟิล์ม พบว่าฟิล์มสามารถดูดความชื้นได้มากขึ้น โดยพบว่าฟิล์มที่มีค่าการดูดความชื้นที่สูงที่สุดคือฟิล์มสูตร P1*97T3Co
- จากการทดสอบมุมสัมผัสด้วยน้ำกลั่นพบว่า ค่ามุมสัมผัสของฟิล์มมีค่าใกล้เคียงกันโดยอยู่ในช่วง 75-90 องศา โดยค่ามุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณน้ำมันทั้งในเนื้อฟิล์ม แสดงให้เห็นพื้นผิวฟิล์มมีการเปียกที่ไม่ดี
- ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์หาหมู่ฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงไปของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เมื่อปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก และน้ำมันทั้ง พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้เกิด การเชื่อมโยง โดยยืนยันผลด้วยเทคนิค FT-IR
- ผลจากการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มที่ความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 0-90 %RH พบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มมีค่าลดลง เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น โดยมีค่าในช่วงประมาณ $18 \times 10^6 - 1 \times 10^4 \Omega$ และพบว่าฟิล์มสูตร P1*97T3 สามารถตอบสนองต่อความชื้นที่ดีกว่าฟิล์มสูตรอื่น เมื่อมีการเติม CoCl_2 พบว่าฟิล์มสามารถอ่านค่าความต้านทานได้ต่ำลงเมื่อเทียบกับสูตรฟิล์มที่ไม่มีการเติม CoCl_2
- ผลจากการจำลองการประกอบวงจรไฟฟ้าพบว่า ฟิล์มทุกสูตร สามารถทำให้หลอดไฟ LED มีการตอบสนองในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 75 และ 95 %RH ยกเว้นฟิล์มสูตร P5*90T10 ที่หลอดไฟ LED ไม่ตอบสนองที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75 %RH และเฉพาะฟิล์มสูตร P1*97T3Co ที่สามารถทำให้หลอดไฟ LED ตอบสนองที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50 %RH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. พัฒนาฟิล์มให้ตอบสนองกับความชื้นได้ดีขึ้น โดยการเติมสารช่วยดูดความชื้นชนิดอื่น ที่อาจเห็นการเปลี่ยนสีเมื่อมีการดูดความชื้น
2. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกช่วงความชื้นสัมพัทธ์ ควรทดสอบฟิล์มที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์หลาย ๆ ช่วง
3. เนื่องจากฟิล์มที่เตรียมได้มีสมบัติการต้านทานน้ำที่ดี โดยใช้สารเชื่อมโยงที่ไม่เป็นพิษ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานประเภทอื่น ๆ เช่น ฟิล์มห่ออาหาร บรรจุภัณฑ์ เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] ยิ่งยศ พรพัฒน์กุล. 2011 “พอลิเมอร์นำไฟฟ้าพอลิอะนิลีนที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีดีสเพอร์ชันพอลิเมอไรเซชัน” *The Journal of KMUTNB*. 21: 220-229.
- [2] Eliassaf, J. 1972. “Detection of small quantity of Poly (vinyl alcohol) in poly (vinyl chloride) resins.” *Polym*. 16: 225-235.
- [3] Zehentbauer, F. M., Moretto, C., Stephen, R., Thevar, T., Gilchrist, J. R., Pokrajac, D., & Kiefer, J. (2014). “Fluorescence spectroscopy of Rhodamine 6G: concentration and solvent effects.” *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 121: 147-151.
- [4] มานิตย์ ไชยวงศ์, สกลรัตน์ พัดโท, อมรา สาเทียน. 2559. “การศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก และน้ำมันลินสีด เชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสง และระบบรีดอกซ์.” *วิทยาศาสตร์บัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*.
- [5] สถาบันปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย. 2553. “รู้จักกับฟิล์มลามิเนต (Laminated Films).” *Plastics Intelligence Update*. 1(2): 1-9.
- [6] สมาคมอุตสาหกรรมพลาสติกไทย. 2554. **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับพลาสติก**. [Online]. Available: <http://oknation.nationtv.tv/blog/gift2say/2012/09/18/entry-1>.
- [7] Eliassaf, J. 1972. “Detection of small quantity of Poly (vinyl alcohol) in poly (vinyl chloride) resins.” *Polymer Letter*. 10: 697-698
- [8] Goodship, V., & Jacobs, D. K. (2009). **Polyvinyl alcohol: materials, processing and applications (Vol. 16, No. 12)**. Shrewsbury: Smithers Rapra Technology.
- [9] Saxena, S. K. (2004). “Polyvinyl alcohol (PVA).” *Chemical and Technical Assessment*. 1(3): 3-5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Undin, J., Finne-Wistrand, A., & Albertsson, A. C. (2013). "Copolymerization of 2-methylene-1, 3-dioxepane and glycidyl methacrylate, a well-defined and efficient process for achieving functionalized polyesters for covalent binding of bioactive molecules." *Biomacromolecules*. 14(6): 2095-2102.
- [11] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. "ปฏิกิริยาการตัดแปรรโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์." คณะพลังงาน และ วัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 177-196.
- [12] Cano, A. I., Cháfer, M., Chiralt, A., & González-Martínez, C. (2015). "Physical and microstructural properties of biodegradable films based on pea starch and PVA." *Journal of Food Engineering*. 167: 59-64.
- [13] Schildknecht, C. E. (1974). **Polyvinyl alcohol, properties and applications**. New York: CA Finch, Wiley.
- [14] Rustan, A. C., & Drevon, C. A. (2001). **Fatty acids: structures and properties**. Oslo: University of Oslo.
- [15] Talbot, G. (2011). "Saturated fats in foods and strategies for their replacement: an introduction." *Reducing Saturated Fats in Foods.*: 3-28.
- [16] List, Gary R., James A. Kenar, and Bryan R. Moser. "History of Fatty Acids Chemistry." *Fatty Acids*. 1: 1-22.
- [17] Laposata, M. (1995). "Fatty acids: biochemistry to clinical significance." *American journal of clinical pathology*. 104(2): 172-179.
- [18] Jones, F. N., Nichols, M. E., & Pappas, S. P. (2017). **Organic coatings: science and technology**. Michigan: John Wiley & Sons.
- [19] ไทยเกษตรศาสตร์. 2012. **สมุนไพรมะเยา**. [online]. Available: <http://www.thaikasetsart.com/สมุนไพรมะเยา/>
- [20] Lee, Y. C., & Nobles, W. L. (1959). "A chemical study of American tung oil." *Journal of the American Pharmaceutical Association*. 48(3): 162-165.

- [21] Schönemann, A., Frenzel, W., Unger, A., & Kenndler, E. (2006). "An investigation of the fatty acid composition of new and aged tung oil." *Studies in conservation*. 51(2): 99-110.
- [22] Chen, Y. H., Chen, J. H., Chang, C. Y., & Chang, C. C. (2010). "Biodiesel production from tung (*Vernicia montana*) oil and its blending properties in different fatty acid compositions." *Bioresource Technology*. 101(24): 9521-9526.
- [23] Preedy, V. R., & Watson, R. R. (Eds.). (2010). **Olives and olive oil in health and disease prevention**. London: Academic press.
- [24] Caballero, B., Trugo, L., & Finglas, P. (2003). **Encyclopedia of food sciences and nutrition**. Volumes 1-10 (No. Ed. 2). Elsevier Science BV.
- [25] Christie, W. W. (1993). "Preparation of ester derivatives of fatty acids for chromatographic analysis." *Advances in lipid methodology*. 2(69): 111.
- [26] Marchetti, J. M., & Errazu, A. F. (2008). "Comparison of different heterogeneous catalysts and different alcohols for the esterification reaction of oleic acid." *Fuel*. 87(15-16): 3477-3480.
- [27] Guler, S. D., Ghosh, D. D., Pan, J., Mathai, J. C., Zeidel, M. L., Nagle, J. F., & Tristram-Nagle, S. (2009). "Effects of ether vs. ester linkage on lipid bilayer structure and water permeability." *Chemistry and physics of lipids*. 160(1): 33-44.
- [28] Fehér, J., Csomós, G., & Vereckei, A. (2012). **Free radical reactions in medicine**. Berlin: Springer Science & Business Media.
- [29] Silberberg, M. (2018). **Chemistry: The Molecular Nature of Matter and Change with Advanced Topics**. New York: McGraw-Hill.
- [30] Matyjaszewski, K., & Davis, T. P. (2003). **Handbook of radical polymerization**. Hoboken: John Wiley & Sons.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [31] Peyton, G. R. (1993). "The free-radical chemistry of persulfate-based total organic carbon analyzers." *Marine Chemistry*. 41(1-3): 91-103.
- [32] Matyjaszewski, K., & Davis, T. P. (2003). **Handbook of radical polymerization**. New Jersey: John Wiley & Sons.
- [33] Denisov, E. T., Denisova, T. G., & Pokidova, T. S. (2005). **Handbook of free radical initiators**. New Jersey: John Wiley & Sons.
- [34] Shang, X., Li, B., Zhang, T., Li, C., & Wang, X. (2013). "Photocatalytic Degradation of Methyl Orange with Commercial Organic Pigment Sensitized TiO₂." *Procedia Environmental Sciences*. 18: 478-485.
- [35] Camalet, J. L., Lacroix, J. C., Aeiyaich, S., & Lacaze, P. C. (1998). "Characterization of polyaniline films electrodeposited on mild steel in aqueous p-toluenesulfonic acid solution." *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 445(1-2): 117-124.
- [36] Rotronic Instrument Corp. 2005. **The Rotronic Humidity Handbook**. East Main Street Huntington: Rotronic Instrument Corp.
- [37] Shaman, J., Pitzer, V. E., Viboud, C., Grenfell, B. T., & Lipsitch, M. (2010). "Absolute humidity and the seasonal onset of influenza in the continental United States." *PLoS biology*. 8(2): e1000316.
- [38] Cassar, M., & Hutchings, J. (2000). **Relative Humidity and Temperature Pattern Book-a guide to understanding and using data on the museum environment**. Museums & Galleries Commission.
- [39] สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.). ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์: **การตรวจวัดความชื้นสัมพัทธ์ที่มีในอากาศ** [Online]. Available: http://globethailand.ipst.ac.th/?page_id=4075.
- [40] Li, T., Dong, X., Chan, C. C., Ni, K., Zhang, S., & Shum, P. P. (2013). "Humidity sensor with a PVA-coated photonic crystal fiber interferometer." *Ieee Sensors Journal*. 13(6): 2214-2216.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [41] Borini, S., White, R., Wei, D., Astley, M., Haque, S., Spigone, E., ... & Ryhanen, T. (2013). "Ultrafast graphene oxide humidity sensors." *ACS nano*. 7(12): 11166-11173.
- [42] Su, D., Qiao, X., Rong, Q., Sun, H., Zhang, J., Bai, Z., ... & Feng, Z. (2013). "A fiber Fabry-Perot interferometer based on a PVA coating for humidity measurement." *Optics Communications*. 311: 107-110.
- [43] Xu, W., Huang, W. B., Huang, X. G., & Yu, C. Y. (2013). "A simple fiber-optic humidity sensor based on extrinsic Fabry-Perot cavity constructed by cellulose acetate butyrate film." *Optical Fiber Technology*. 19(6): 583-586.
- [44] เจริญชัย เหลืองอ่อน. 2554. "การวัดค่าความต้านทาน ด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด" หน้า 74-79. **ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ**. กรุงเทพฯ : หน่วยปฏิบัติการวิจัยด้านสิ่งแวดล้อม ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
- [45] ASTM Designation: F4 3 - 9 3 , "Standard Test Methods for Resistivity of Semiconductor Materials", ASTM, 1993
- [46] นุจรินทร์ รามัญกุล. 2546. "การปลูกผลึกซิลิกอนหลายชั้นโดย วิธีอีพิแทคซี สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์." **ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ**
- [47] Bridge Technology 2002: **Four-Point Probe Manual** [Online]. Available: http://www-inst.eecs.berkeley.edu/~ee143/fa10/lab/four_point_probe.pdf. เข้าถึงเมื่อวันที่ 16 พ.ค. 61.
- [48] Oyman, Z. O., Ming, W., & Van der Linde, R. (2005). "Oxidation of drying oils containing non-conjugated and conjugated double bonds catalyzed by a cobalt catalyst." *Progress in organic coatings*. 54(3): 198-204.
- [49] กณิกนันต์ จันทร์ประดิษฐ์, กนกวรรณ ไชยนิสงค์ และนิภาพร ศรีพรประเสริฐ. 2558. **การศึกษา สมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก และ น้ำมันละหุ่ง เชื่อมโยงด้วยระบบฉายแสง**. วิทยาศาสตร์บัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 1-66.

- [50] Lim, M., Kwon, H., Kim, D., Seo, J., Han, H., & Khan, S. B. (2015). "Highly-enhanced water resistant and oxygen barrier properties of cross-linked poly (vinyl alcohol) hybrid films for packaging applications." *Progress in Organic Coatings*. 85: 68-75.
- [51] Riyajan, S. A., & Sasithornsonti, Y. (2013). "Chemical crosslink degradable pva aqueous solution by potassium persulphate." *Journal of Polymers and the Environment*. 21(2): 472-478.
- [52] ภคพล ลัคนาพรวิสิฐ. 2555. กาวติดไม้ไร้สารฟอร์มัลดีไฮด์จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับน้ำมัน ชักแห้งธรรมชาติสำหรับงานแผ่นพาร์ทิเคิล. วิทยานิพนธ์ สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะ วิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 1-69.
- [53] รักษ์สุดา สวรรค์ดอน, รุ่งเรืองชัย คำเมืองไหว และ ลลิตา อุไรสกุล. 2557. การพัฒนาฟิล์มกาว อัดจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงด้วยกรดโอเลอิก พอลิไวนิลอะซิเตต และน้ำมัน ลินสีดสำหรับงานพิมพ์สกรีน. โครงการงานพิเศษสาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะ วิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 43.
- [54] Ogura, K., Saino, T., Nakayama, M., & Shiigi, H. (1997). "The humidity dependence of the electrical conductivity of a soluble polyaniline-poly (vinyl alcohol) composite film." *Journal of Materials Chemistry*. 7(12): 2363-2366.
- [55] Jang, J. H., & Han, J. I. (2017). "Cylindrical relative humidity sensor based on poly-vinyl alcohol (PVA) for wearable computing devices with enhanced sensitivity." *Sensors and Actuators A: Physical*. 261: 268-273.
- [56] Kumari, M., Ding, B., & Blaikie, R. (2016). "Enhanced resonant absorption in dyed polymer thin-film cavities for water vapour sensing." *Sensors and Actuators B: Chemical*. 231: 88-94.
- [57] Tellis, J. C., Strulson, C. A., Myers, M. M., & Kneas, K. A. (2010). "Relative humidity sensors based on an environment-sensitive fluorophore in hydrogel films." *Analytical chemistry*. 83(3): 928-932.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของฟิล์ม

ตารางที่ ก-1 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตรที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก

เวลา(ชั่วโมง)	% swelling		
	P1*	P3*	P5*
1	109.76	76.29	41.49
2	114.51	73.95	38.40
3	116.41	75.88	44.42
4	119.64	76.29	46.29
5	120.45	79.58	45.01
6	122.48	81.50	45.63
7	126.19	83.00	42.37
8	126.36	84.94	40.16
24	133.73	86.27	48.19

ตารางที่ ก-2 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตรที่มีการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 1 pph ร่วมกับน้ำมันทั้งเชื่อมโยงด้วยการฉายแสง

เวลา(ชั่วโมง)	% swelling		
	P1*97T3R	P1*95T5R	P1*9T10R
1	80.19	94.14	33.83
2	90.37	96.91	33.14
3	91.86	102.22	32.82
4	94.19	104.28	29.62
5	94.95	106.71	34.90
6	96.95	106.83	32.46
7	97.30	107.64	32.49
8	104.53	109.13	29.79
24	133.73	109.17	32.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-3 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตรที่มีการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 3 pph ร่วมกับน้ำมันทั้งเชื่อมโยงด้วยการฉายแสง

เวลา(ชั่วโมง)	% swelling		
	P3*97T3R	P3*95T5R	P3*9T10R
1	40.55	25.31	15.77
2	41.16	25.94	13.04
3	45.57	27.37	10.61
4	45.81	27.38	14.47
5	47.79	28.52	15.35
6	48.41	29.30	11.09
7	50.02	30.92	11.95
8	52.52	32.86	14.77
24	52.89	34.44	15.66

ตารางที่ ก-4 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตรที่มีการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 5 pph ร่วมกับน้ำมันทั้งเชื่อมโยงด้วยการฉายแสง

เวลา(ชั่วโมง)	% swelling		
	P5*97T3R	P5*95T5R	P5*9T10R
1	51.95	23.52	5.593
2	53.06	29.36	7.80
3	56.06	20.37	7.91
4	56.52	27.40	8.58
5	58.47	27.63	10.06
6	58.57	31.42	10.24
7	58.66	26.31	10.25
8	59.15	27.35	10.59
24	60.71	28.27	10.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-5 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตรที่มีการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 1 pph ร่วมกับน้ำมันทั้ง

เวลา(ชั่วโมง)	% swelling		
	P1*97T3	P1*95T5	P1*9T10
1	80.19	94.14	33.83
2	90.37	96.91	33.14
3	91.86	102.22	32.82
4	94.19	104.28	29.62
5	94.95	106.71	34.90
6	96.95	106.83	32.46
7	97.30	107.64	32.49
8	104.53	109.13	29.79
24	107.82	109.17	32.33

ตารางที่ ก-6 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตรที่มีการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 3 pph ร่วมกับน้ำมันทั้ง

เวลา(ชั่วโมง)	% swelling		
	P3*97T3	P3*95T5	P3*9T10
1	120.04	89.51	24.56
2	117.66	95.95	15.78
3	124.44	96.37	23.24
4	119.20	92.74	17.98
5	120.93	95.65	23.24
6	119.35	91.46	26.75
7	118.81	94.41	23.68
8	120.81	94.55	23.68
24	126.64	90.65	24.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-7 ค่าปริมาณน้ำที่คงอยู่ต่อน้ำหนักสุดท้ายของฟิล์มสูตรที่มีการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดโอเลอิก 5 pph ร่วมกับน้ำมันทั้ง

เวลา(ชั่วโมง)	% swelling		
	P5*97T3	P5*95T5	P5*9T10
1	46.98	42.78	16.55
2	47.36	43.85	17.91
3	48.95	46.10	20.41
4	49.89	46.31	21.83
5	50.22	47.31	22.29
6	50.55	47.55	22.74
7	52.14	48.11	23.66
8	53.10	52.97	24.08
24	57.98	53.88	24.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-8 ค่าปริมาณของแข็งที่เหลืออยู่ของฟิล์มหลังแช่น้ำกลั่น 24 ชั่วโมง ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

ชื่อสูตร	% Solid remains				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
P1*	88.70	89.62	88.63	88.99	0.55
P3*	97.50	96.92	92.30	95.60	2.87
P5*	93.98	100.00	85.13	94.49	9.60
P1*97T3R	84.90	89.86	89.67	88.14	2.81
P1*95T5R	89.17	89.08	91.32	89.86	1.27
P1*90T10R	89.27	90.74	93.80	91.27	2.31
P3*97T3R	93.16	87.86	90.39	90.47	2.65
P3*95T5R	90.29	91.46	92.27	91.34	0.99
P3*90T10R	88.98	92.73	89.47	90.39	2.03
P5*97T3R	92.05	81.45	100.00	91.48	9.75
P5*95T5R	85.77	78.22	92.48	85.49	7.13
P5*90T10R	92.34	92.88	100.0	95.07	4.27
P1*97T3	95.87	96.17	96.79	96.27	0.46
P1*95T5	96.94	96.68	96.47	96.70	0.23
P1*90T10	95.67	95.87	96.17	95.90	0.25
P3*97T3	91.75	89.16	93.62	91.51	2.24
P3*95T5	96.08	95.17	96.66	95.97	0.75
P3*90T10	96.33	96.77	90.00	94.36	1.44
P5*97T3	95.23	94.70	98.5	96.17	2.05
P5*95T5	98.63	99.55	98.81	99.00	0.48
P5*90T10	96.75	100.00	98.68	98.48	1.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบการดูดความชื้น

ตารางที่ ข-1 ค่าการดูดความชื้นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

ชื่อสูตร	Moisture contents ที่ 50%RH	Moisture contents ที่ 75%RH	Moisture contents ที่ 95%RH
PVA film	10.26	15.40	-
P1*	2.75	8.91	104.09
P3*	3.09	7.33	106.12
P5*	3.92	6.05	59.57
P1*97T3R	5.27	7.70	47.06
P1*95T5R	3.38	6.80	26.08
P1*90T10R	2.68	5.76	28.15
P3*97T3R	7.34	9.01	68.51
P3*95T5R	2.66	7.34	55.71
P3*90T10R	1.58	7.58	31.18
P5*97T3R	1.33	7.72	41.59
P5*95T5R	2.68	7.33	55.71
P5*90T10R	3.08	4.00	31.18
P1*97T3	4.07	9.45	109.39
P1*95T5	3.52	8.06	79.93
P1*90T10	2.44	4.18	64.44
P3*97T3	4.34	9.01	66.11
P3*95T5	3.62	7.58	40.82
P3*90T10	3.05	7.34	40.91
P5*97T3	3.95	6.00	39.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 ค่าการดูดความชื้นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ต่อ)

ชื่อสูตร	Moisture contents ที่ 50%RH	Moisture contents ที่ 75%RH	Moisture contents ที่ 95%RH
P5*95T5	3.38	4.21	42.71
P5*90T10	1.75	4.63	24.62
P1*97T3Co	5.63	14.30	100.66
P1*95T5 Co	8.75	10.82	80.00
P1*90T10Co	3.20	9.44	54.69
P3*97T3Co	7.76	19.70	42.11
P3*95T5Co	5.51	7.72	40.08
P3*90T10Co	4.63	5.93	39.66
P5*97T3Co	4.87	6.00	22.61
P5*95T5Co	3.14	3.01	25.34
P5*90T10Co	2.50	2.63	16.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

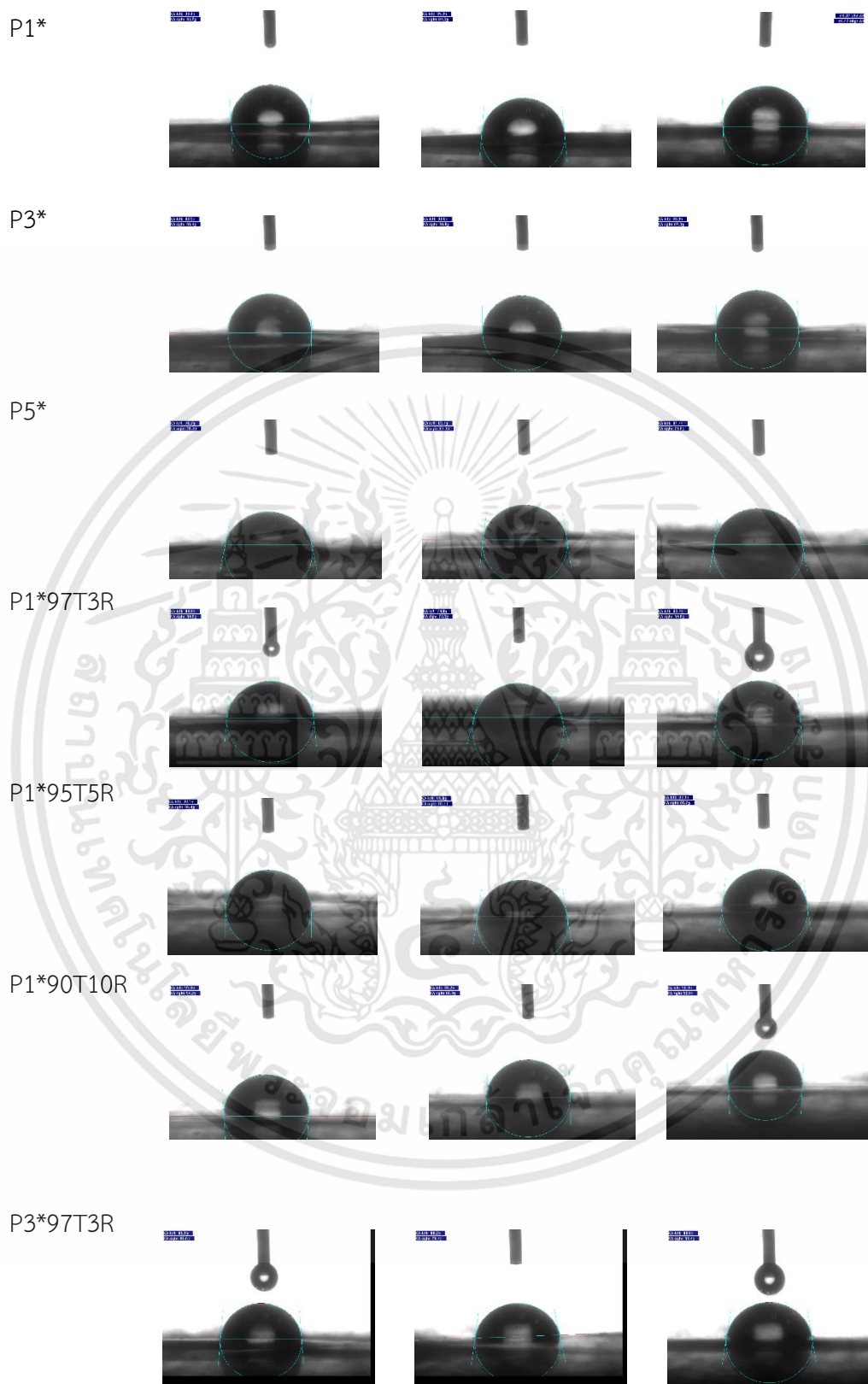
ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบมุมสัมผัส

ตารางที่ ค-1 ค่าเฉลี่ยมุมสัมผัสที่นาที่เริ่มต้นด้วยน้ำกลั่นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

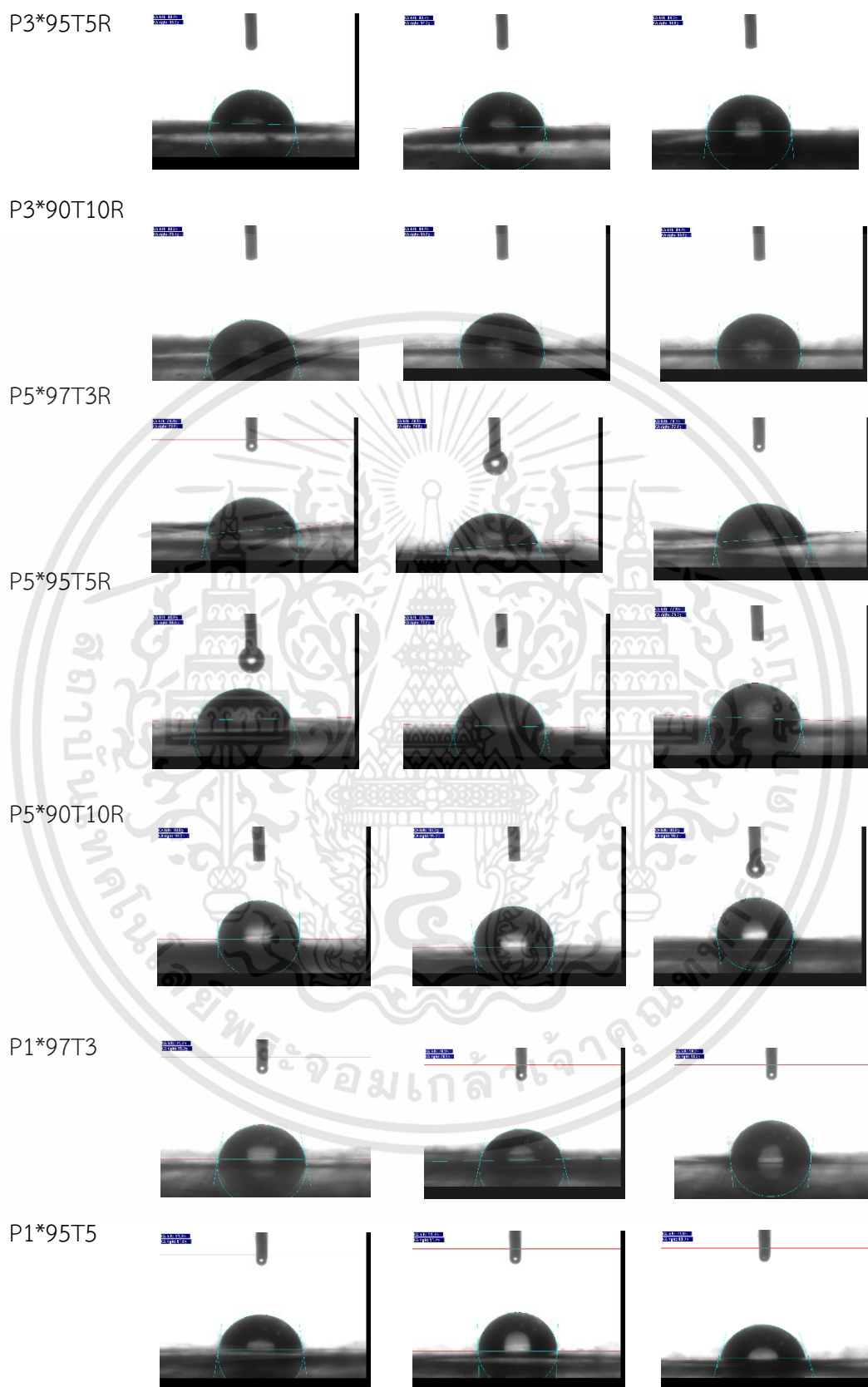
ชื่อสูตร	ค่าเฉลี่ย	SD
P1*	89.96	4.46
P3*	89.11667	1.14
P5*	80.48	1.86
P1*97T3R	80.98	6.00
P1*95T5R	84.53	5.01
P1*90T10R	91.66	3.00
P3*97T3R	81.88	3.02
P3*95T5R	82.65	2.14
P3*90T10R	81.01	2.45
P5*97T3R	75.76	1.76
P5*95T5R	74.86	4.58
P5*90T10R	95.00	4.09
P1*97T3	77.53	1.73
P1*95T5	75.01	5.78
P1*90T10	82.16	1.15
P3*97T3	82.30	5.22
P3*95T5	83.51	2.84
P3*90T10	81.18	4.57
P5*97T3	72.43	5.20
P5*95T5	76.88	3.21
P5*90T10	79.85	6.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-1 ภาพมุมสัมผัสผิวน้ำกลิ้งของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



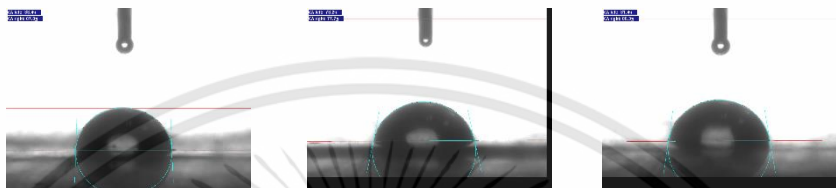
รูปที่ ค-1 ภาพมุมสัมผัสน้ำกลิ้งของฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P1*90T10



P3*97T3



P3*95T5



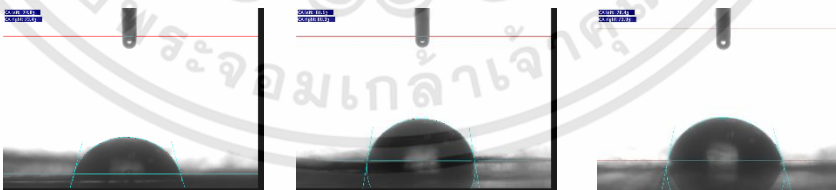
P3*90T10



P5*97T3



P5*95T5



รูปที่ ค-1 ภาพมุมสัมผัสน้ำกลิ้งของฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม

ตารางที่ ง-1 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0-95 %RH

ชื่อสูตร	Resistance(Ω)			
	0 %RH	50 %RH	75 %RH	95 %RH
P1*	11.38×10^6	3.82×10^6	2.72×10^6	1.65×10^4
P3*	12.65×10^6	5.17×10^6	2.81×10^6	2.44×10^4
P5*	18×10^6	9.4×10^6	5.43×10^6	1.32×10^4
P5*97T3R	11.6×10^6	17.81×10^6	11.2×10^6	1.08×10^6
P5*95T5R	30.6×10^6	20.57×10^6	15.66×10^6	1.68×10^6
P5*90T10R	11.2×10^6	17.39×10^6	12.69×10^6	5.53×10^6
P3*97T3R	19.34×10^6	7.07×10^6	4.63×10^6	1.90×10^6
P3*95T5R	9.88×10^6	10.63×10^6	9.20×10^6	2.39×10^6
P3*90T10R	11.0×10^6	13.57×10^6	12.66×10^6	3.17×10^6
P1*97T3R	16.14×10^6	7.66×10^6	5.275×10^6	2.55×10^6
P1*95T5R	16.67×10^6	7.86×10^6	4.80×10^6	1.71×10^6
P1*90T10R	19.9×10^6	18.52×10^6	16.3×10^6	1.31×10^6
P5*97T3	14.83×10^6	13.2×10^6	3.62×10^6	2.44×10^5
P5*95T5	15.31×10^6	10.07×10^6	2.83×10^6	3.21×10^5
P5*90T10	17.05×10^6	12.69×10^6	10.66×10^6	3.42×10^5
P3*97T3	15.97×10^6	7.84×10^6	1.47×10^6	1.26×10^4
P3*95T5	15.15×10^6	11.33×10^6	1.63×10^6	1.72×10^4
P3*90T10	15.00×10^6	10.93×10^6	7.05×10^6	3.72×10^4
P1*97T3	16.55×10^6	6.79×10^6	1.72×10^6	1.91×10^4
P1*95T5	15.54×10^6	7.46×10^6	1.57×10^6	1.71×10^4
P1*90T10	18.49×10^6	8.85×10^6	3.22×10^6	7.13×10^4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-1 ค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 0–95 %RH (ต่อ)

ชื่อสูตร	Resistance(Ω)			
	0 %RH	50 %RH	75 %RH	95 %RH
P1* CO	7.06×10^6	1.57×10^6	4.106×10^5	1.926×10^4
P3*CO	1.08×10^6	2.862×10^6	4.00×10^5	3.73×10^4
P5*CO	1.13×10^6	6.79×10^6	9.69×10^5	1.25×10^4
P5*97T3CO	1.41×10^6	12.96×10^6	13.32×10^5	11×10^4
P5*95T5CO	1.10×10^6	3.245×10^6	12.80×10^5	1.33×10^4
P5*90T10CO	1.10×10^6	8.79×10^6	17.82×10^5	1.74×10^4
P3*97T3CO	1.10×10^6	16.81×10^6	18.76×10^5	11.01×10^4
P3*95T5 CO	1.10×10^6	7.59×10^6	20.48×10^5	5.66×10^4
P3*90T10 CO	1.10×10^6	2.49×10^6	19.64×10^5	8.31×10^4
P1*97T3 CO	7.96×10^6	1.02×10^6	1×10^5	1.17×10^4
P1*95T5 CO	3.33×10^6	10.99×10^6	5.39×10^5	4.73×10^4
P1*90T10 CO	1.38×10^6	9.60×10^6	9.65×10^5	5.05×10^4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ




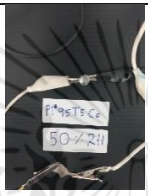

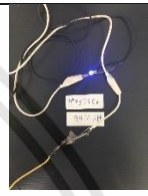



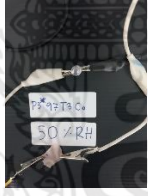
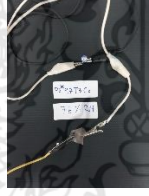
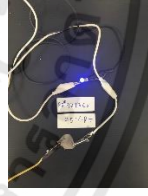






การจำลองการประกอบวงจรไฟฟ้าโดยมีฟิล์มสูตรต่าง ๆ เป็นส่วนประกอบของวงจร

ตารางที่ จ-1 การติดของหลอดไฟ LED ที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50-95 %RH ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

ชื่อสูตร	50%RH	75%RH	95%RH
P1*97T3			
P1*95T5			
P1*90T10			
P3*97T3			
P3*95T5			
P3*90T10			





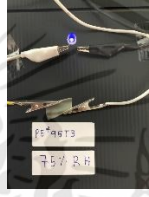


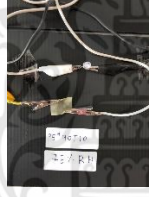

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-1 การตอบสนองของหลอดไฟ LED ที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50-95 %RH ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ต่อ)

ชื่อสูตร	50%RH	75%RH	95%RH
P1*97T3Co			
P1*95T5Co			
P1*90T10Co			
P3*97T3Co			
P3*95T5Co			
P3*90T10Co			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-1 การตอบสนองของหลอดไฟ LED ที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 50-95 %RH ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ (ต่อ)

ชื่อสูตร	50%RH	75%RH	95%RH
P5*97T3			
P5*95T5			
P5*90T10			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายภาณุวัฒน์ ดวงรัมย์
วัน เดือน ปี เกิด	31 มีนาคม พ.ศ. 2537
ที่อยู่ปัจจุบัน	164/2 หมู่ 3 ซอยเก็กงาม 2 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
ประวัติการศึกษา	ปีการศึกษา 2558 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรตเฉลี่ย 2.76 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	1. กิตติชัย ศรสำแดง, ภาณุวัฒน์ ดวงรัมย์, และมงคล นิมลมูล.2558. “การเตรียมซิงค์ออกไซด์ฟิล์มอาร์มอนด์มอริลโกลด์สำหรับ ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2. P. Duangrussamee and P. Monvisade. 2018. “Development of Humidity-Sensitive Films from Oleic Acid – Modified PVA.” TICHE. : 163 – 169.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้