

การปรับสภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่ง  
ต่อกิ่งคองโกเรดด้วยเมทิลีนบลูเพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับออกซิเจน

SURFACE TREATMENT OF CASTOR OIL-BASED POLYURETHANE  
GRAFTED CONGO RED FILMS WITH METHYLENE BLUE FOR  
OXYGEN SENSOR APPLICATION

นิตานาท ตันตระภักดีธารา

NISANAT TANTRAPAKDEETARA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-014-060

การปรับสภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่ง  
ต่อกิ่งคองโกเรดด้วยเมทิลีนบลูเพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับออกซิเจน

SURFACE TREATMENT OF CASTOR OIL-BASED POLYURETHANE  
GRAFTED CONGO RED FILMS WITH METHYLENE BLUE FOR  
OXYGEN SENSOR APPLICATION

นิตานาถ ตันตระภักดีธารา  
NISANAT TANTRAPAKDEETARA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-014-060

SURFACE TREATMENT OF CASTOR OIL-BASED POLYURETHANE  
GRAFTED CONGO RED FILMS WITH METHYLENE BLUE FOR  
OXYGEN SENSOR APPLICATION

NISANAT TANTRAPAKDEETARA

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  
YEAR 2019  
KMITL-2019-SC-M-014-060

COPYRIGHT 2019

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับสภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งต่อกึ่งคองโกเรตด้วยเมทิลีนบลูเพื่อประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับออกซิเจน
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนิศานาถ ตันตระภักดีธารา
รหัสประจำตัว	59605033
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมตัวตรวจจับออกซิเจนจากเมทิลีนบลู โดยใช้ฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งและต่อกึ่งบนพื้นผิวด้วยคองโกเรตเป็นวัสดุรองรับ ฟิล์มที่เตรียมได้นี้นำมาพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่า เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของหมู่อะซิโไฮยาเนตต่อหมู่อะโรมาติกซิลในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนสูงขึ้น ทำให้มีหมู่อะซิโไฮยาเนตที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาเหลืออยู่บนฟิล์มมากขึ้น เมื่อนำฟิล์มมาวัดเฉดสีด้วยเครื่องวัดสี พบว่าการต่อกึ่งบนพื้นผิวของฟิล์มด้วยคองโกเรตทำให้ฟิล์มมีความทึบมากขึ้น อีกทั้งยังมีเฉดสีแดงและเฉดสีเหลืองเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อนำฟิล์มมาพิสูจน์องค์ประกอบของคองโกเรตที่ต่อกึ่งบนพื้นผิวด้วยเทคนิค UV-Visible สเปกตรัมที่ได้ปรากฏพิศการดูดกลืนแสงของคองโกเรต ซึ่งเป็นการยืนยันการมีอยู่ของคองโกเรตบนพื้นผิวของฟิล์ม และจากการนำฟิล์มที่เตรียมได้ไปวัดค่ามุมสัมผัสกับน้ำกลั่น พบว่าการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของอะซิโไฮยาเนตให้สูงขึ้นและการต่อกึ่งคองโกเรตบนพื้นผิวของฟิล์ม ทำให้ฟิล์มมีค่ามุมสัมผัสลดลงเล็กน้อย หรือมีความชอบน้ำมากขึ้น จากนั้นจึงทำการทดสอบการดูดซับเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของฟิล์ม ซึ่งพบว่าฟิล์มสูตร H4C1R ในสภาวะกรด มีประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูในสภาวะเบสได้ดีที่สุด และการดูดซับดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นเมื่อปรับความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูให้สูงขึ้น และจากการทดสอบความว่องไวต่อออกซิเจนของลูโคเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของฟิล์มสูตร H4C1R ในสภาวะกรด พบว่าการดูดซับลูโคเมทิลีนบลูไว้บนพื้นผิวของฟิล์มแล้วตั้งทิ้งไว้ให้สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ฟิล์มจะเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีน้ำเงิน และจากการวัดเฉดสีของฟิล์มหลังผ่านการทดสอบความว่องไวต่อออกซิเจน พบว่าฟิล์มมีความทึบมากขึ้น มีเฉดสีแดงจางลง และมีเฉดสีน้ำเงินเข้มขึ้น แสดงให้เห็นว่าฟิล์มสูตร H4C1R ในสภาวะกรด แล้วผ่านการปรับปรุงโดยการดูดซับลูโคเมทิลีนบลูไว้บนพื้นผิว สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับออกซิเจนได้

คำสำคัญ : คองโกเรต ตัวตรวจจับออกซิเจน น้ำมันละหุ่ง พอลิยูรีเทน เมทิลีนบลู

<b>Thesis Title</b>	Surface Treatment of Castor oil-based polyurethane grafted Congo red films with Methylene blue for oxygen sensor application
<b>Student Name</b>	Nisanat Tantrapakdeetara
<b>Student ID</b>	59605033
<b>Degree</b>	Master of Science (Polymer Technology)
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Year</b>	2019
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Pathavuth Monvisade

### Abstract

This research studied on the preparation of oxygen sensor from methylene blue using castor oil-based polyurethane grafted congo red films as supporting substrate. The prepared films were characterized by FTIR. It was found that unreacted isocyanate group increased with increasing proportional of isocyanate group/hydroxyl group. The grafted congo red on the surface of the film effect to the increasing opacity, red color and yellow color examined by colorimeter. The absorbance spectrum of the grafted congo red film showed absorption peak of congo red and it can be proved that the surface of film was attached by congo red. The increased isocyanate mole ratio and the grafted congo red on film slightly decreased the contact angle leading to gradually increase in hydrophilicity of the films. From the methylene blue adsorption on surface of film, it was found that H4C1R film in acidic condition led to the highest efficiency methylene blue adsorption under basic condition. In addition, the adsorption increased when methylene blue concentration was increased. Oxygen sensitivity test by adsorbed leuco methylene blue onto the surface of H4C1R film under acidic condition and exposed to oxygen in the air demonstrated that the color of the film changed from colorless to blue color. The results from colorimeter showed the decrease in red color while increase in opacity and blue color. The comprehensive results suggested the H4C1R film in acidic condition with adsorbed leuco methylene blue on surface can be potentially applied for oxygen sensor.

**Keywords :** Congo red, Oxygen sensor, Castor oil, Polyurethane, Methylene blue

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง และปัญหาต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้ ทำให้การจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการ ผศ.ดร.ธนิดา ตระกูลสุจริตโชค ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก สถาบันฯ และ ผศ.ดร.การุณย์ สาดอ่อน อาจารย์บัณฑิตประจำ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้คำแนะนำ ตรวจสอบความถูกต้อง รวมถึงปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่มอบทุนเสนอผลงานวิจัยให้ ทำให้มีโอกาสงานวิจัยนี้ไปเผยแพร่แก่ผู้อื่น และได้รับประสบการณ์รวมถึงความรู้เพิ่มมากขึ้น

ขอขอบพระคุณภาควิชาเคมี คณาจารย์ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเคมี เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือฯ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนในการจัดซื้อสารเคมี และการส่งทดสอบ รวมถึงความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ในการวิเคราะห์และทดสอบชิ้นงานตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณครอบครัว และเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และเป็นกำลังใจในการดำเนินงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ประโยชน์ และความรู้อันพึงมีจากงานวิจัยนี้ขอมอบแต่ครอบครัว ผู้มีพระคุณ และคณาจารย์ทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขอน้อมรับ และขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวนิศานาถ ต้นตระกูลคีธารา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทยอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฒ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ตัวตรวจจับออกซิเจน (Oxygen sensor) หรืออินดิเคเตอร์ออกซิเจน (Oxygen indicator).....	4
2.1.1 การตรวจวัดทางแสง.....	4
2.1.2 การออกแบบตัวตรวจวัดทางแสง.....	5
2.1.3 อินดิเคเตอร์ (Indicator).....	5
2.1.3.1 เมทิลีนบลู (Methylene blue).....	7
2.1.4 การยึดติดอินดิเคเตอร์กับวัสดุรองรับ.....	8
2.1.4.1 การยึดติดทางกายภาพ (physical embedding).....	8
2.1.4.2 การดัดแปรพื้นผิวทางเคมี (Chemical surface modification) ....	9
2.2 พอลิยูรีเทน (Polyurethane).....	9
2.2.1 การสังเคราะห์พอลิยูรีเทน.....	9
2.2.2 ไอโซไซยาเนต (Isocyanate).....	9
2.2.2.1 การเกิดปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนต.....	10
2.2.3 พอลิออล (Polyol).....	11
2.2.4 ลักษณะทั่วไปของพอลิยูรีเทน.....	12
2.2.5 สมบัติของพอลิยูรีเทน.....	13
2.2.6 การประยุกต์ใช้พอลิยูรีเทน.....	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.6.1 พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์ .....	14
2.2.6.2 พอลิยูรีเทนโพน .....	14
2.2.6.3 สารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน.....	14
2.2.6.4 สารยึดเกาะพอลิยูรีเทน.....	14
2.2.6.5 เส้นใยพอลิยูรีเทน .....	14
2.2.6.6 หนังเทียม.....	15
2.3 น้ำมันธรรมชาติ (Natural Oils).....	15
2.3.1 องค์ประกอบของน้ำมัน.....	15
2.3.2 กรดไขมัน.....	15
2.3.3 ชนิดของน้ำมัน.....	17
2.3.4 การวิเคราะห์น้ำมัน .....	17
2.3.5 น้ำมันละหุ่ง (Castor oil).....	20
2.3.5.1 ลักษณะภายนอกของเมล็ดละหุ่ง.....	20
2.3.5.2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันละหุ่ง .....	20
2.3.5.3 โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันในน้ำมันละหุ่ง.....	21
2.3.5.4 สมบัติของน้ำมันละหุ่ง.....	22
2.3.5.5 การจำแนกประเภทน้ำมันละหุ่ง .....	22
2.3.5.6 การแปรรูปน้ำมันละหุ่ง .....	23
2.3.5.7 ประโยชน์ของน้ำมันละหุ่ง .....	24
2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา .....	24
2.4.1 หน้าที่และหลักการทำงาน .....	24
2.4.2 ไตบิวทิลทินไดลอเรต (DBTDL).....	25
2.4.2.1 โครงสร้างและสมบัติ.....	25
2.5 การปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์ (Surface modification of polymer).....	25
2.5.1 การปรับปรุงพื้นผิวของพอลิยูรีเทน .....	26
2.6 คองโกเรด (Congo red).....	26
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>30</b>
3.1 สารเคมี.....	30
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ .....	30

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การเตรียมสารละลาย.....	31
3.3.1 สารละลายคองโกเรด 1% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (%w/v).....	31
3.3.2 สารละลายเมทิลีนบลู 5000 ppm.....	31
3.3.3 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M.....	32
3.3.4 สารละลายไฮโดรคลอริก 1 M.....	32
3.4 การเตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทน .....	32
3.5 การเตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนแบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรด .....	32
3.6 การตรวจวิเคราะห์ .....	33
3.6.1 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR).....	33
3.6.2 การวัดเฉดสีด้วยเครื่องวัดสี .....	33
3.6.3 การพิสูจน์คองโกเรดบนฟิล์มพอลิยูรีเทนด้วยเทคนิค UV-Visible Spectrophotometry .....	34
3.6.4 การทดสอบมุมสัมผัส (Initial Contact Angle).....	34
3.6.5 การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของฟิล์ม .....	34
3.6.5.1 ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมล -NCO/-OH และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ .....	34
3.6.5.2 ศึกษาผลของสภาวะของฟิล์มและสภาวะของสารละลายเมทิลีนบลู .....	35
3.6.6 การศึกษาความว่องไวต่อออกซิเจนของลูโคเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของฟิล์ม ...	36
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>	<b>38</b>
4.1 การเตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรด.....	38
4.2 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์ม .....	40
4.3 การวัดสีของฟิล์ม .....	43
4.4 การพิสูจน์คองโกเรดบนฟิล์มพอลิยูรีเทนด้วยเทคนิค UV-Visible Spectrophotometry.....	45
4.5 มุมสัมผัส (Initial Contact Angle).....	46
4.6 การดูดซับเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของฟิล์ม.....	46
4.6.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมล -NCO/-OH และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ .....	46
4.6.1.1 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง .....	47
4.6.1.2 การเปลี่ยนแปลงเฉดสีของฟิล์มพอลิยูรีเทน.....	48

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6.2 ผลของสภาวะของฟิล์มและสภาวะของสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้ใน การดูดซับ .....	49
4.6.2.1 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง .....	49
4.6.2.2 การเปลี่ยนแปลงเฉดสีของฟิล์มพอลิยูรีเทน .....	51
4.6.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้ในการดูดซับ .....	52
4.6.3.1 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง .....	52
4.6.3.2 การเปลี่ยนแปลงเฉดสีของฟิล์มพอลิยูรีเทน .....	53
4.7 ทดสอบความว่องไวต่อออกซิเจนของลูโคเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของฟิล์ม .....	54
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>58</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	58
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	59
เอกสารอ้างอิง .....	60
ภาคผนวก .....	65
ภาคผนวก ก .....	66
ภาคผนวก ข .....	67
ภาคผนวก ค .....	68
ภาคผนวก ง .....	70
ภาคผนวก จ .....	74
ประวัติผู้เขียน .....	75

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างโครงสร้างของกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวชนิดต่าง ๆ.....	16
2.2 กรดไขมันที่สำคัญของน้ำมันละหุ่ง .....	21
2.3 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันละหุ่ง .....	22
2.4 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไดบิวทิลทินไดลอเรต.....	25
3.1 องค์ประกอบของฟิล์มพอลิยูรีเทนแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิวและแบบปรับปรุงพื้นผิวด้วย คองโกเรต .....	33
ข-1 ค่ามุมสัมผัสของฟิล์มแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิวและแบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต.....	67
ค-1 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงจากการดูดซับเมทิลีนบลูบนฟิล์มสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิว (H4C1, H6C1 และ H8C1) และสูตรปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต (H4C1R, H6C1R และ H8C1R) ที่เวลาต่าง ๆ.....	68
ค-2 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด (H4C1R(A)) ปกติ (H4C1R) และเบส (H4C1R(B)) ที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลู 100 ppm ในสภาวะกรด ปกติ และเบส.....	68
ค-3 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด ที่ผ่านการดูดซับเมทิลีน บลูความเข้มข้น 10, 50, 100, 500 และ 1000 ppm สภาวะเบส.....	69
ง-1 ค่าความสว่าง ( $L^*$ ), เฉดสีเขียว-แดง ( $a^*$ ) และเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $b^*$ ) ของฟิล์มพอลิยูรี- เทนสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิว (H4C1, H6C1 และ H8C1) และสูตรปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโก เรต (H4C1R, H6C1R และ H8C1R).....	70
ง-2 ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ) ของฟิล์มสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิว (H4C1, H6C1 และ H8C1) และสูตรปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต (H4C1R, H6C1R และ H8C1R) หลังผ่าน การดูดซับเมทิลีนบลูที่เวลาต่าง ๆ .....	70
ง-3 ผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) ของฟิล์มสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิว (H4C1, H6C1 และ H8C1) และสูตรปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต (H4C1R, H6C1R และ H8C1R) หลังผ่าน การดูดซับเมทิลีนบลูที่เวลาต่าง ๆ .....	71
ง-4 ผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) ของฟิล์มสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิว (H4C1, H6C1 และ H8C1) และสูตรปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต (H4C1R, H6C1R และ H8C1R) หลัง ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูที่เวลาต่าง ๆ.....	71

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง-5 ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), เฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) และเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) ของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด (H4C1R(A)) ปกติ (H4C1R) และ เบส (H4C1R(B)) ที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลู 100 ppm ในสภาวะกรด ปกติ และเบส.....	72
ง-6 ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), เฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) และเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) ของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด ที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้น 10, 50, 100, 500 และ 1000 ppm สภาวะเบส.....	72
ง-7 ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), เฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) และเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) ของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด หลังผ่านการดูดซับลูโคเมทิลีนบลูปริมาณ 50, 100 และ 150 ไมโครลิตร แล้วตั้งให้สัมผัสออกซิเจนในอากาศที่เวลาต่าง ๆ.....	73
จ-1 ลักษณะฟิล์มหลังสัมผัสออกซิเจนในอากาศที่เวลาต่าง ๆ.....	74

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแบบอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี : A – การสะท้อนแสง, B – การหักเหแสง, C – การดูดกลืนแสง และ D – การคายแสง.....	5
2.2 ปฏิกริยาระหว่างสีย้อมรีดอกซ์กับสารให้ไฮโดรเจนอะตอม เพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับออกซิเจน	6
2.3 ปฏิกริยาระหว่างสีย้อมรีดอกซ์กับสารกึ่งตัวนำและตัวให้อิเล็กตรอนเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต เพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับออกซิเจน .....	7
2.4 โครงสร้างของเมทิลีนบลู.....	8
2.5 ปฏิกริยารีดอกซ์ของเมทิลีนบลู.....	8
2.6 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบไดไฮโซไซยาเนตที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตพอลิยูรีเทน ...	10
2.7 สูตรโครงสร้างทางเคมีทั่วไปของพอลิอีเทอร์พอลิโออล และพอลิเอสเทอร์พอลิโออล .....	12
2.8 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของพอลิโออลที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน .....	12
2.9 โครงสร้างทั่วไปของพอลิยูรีเทน .....	13
2.10 การสังเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์.....	15
2.11 เมล็ดละหุ่ง .....	20
2.12 โครงสร้างของน้ำมันละหุ่งเมื่อมีกรดรีซิโนเลอิกเป็นส่วนหนึ่งของกรดไขมัน.....	21
2.13 โครงสร้างโมเลกุลของไดบิวทิลทินไดลอเรต .....	25
2.14 โครงสร้างของคองโกเรด.....	26
2.15 โครงสร้างของคองโกเรดที่สมดุลกรด-เบส.....	27
3.1 กรอบสกรีน .....	31
3.2 (ก.) เครื่องวัดสี (Colorimeter) และ (ข.) แบบจำลอง Lab.....	34
3.3 ลักษณะของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อเกิดปฏิกริยารีดักชันและออกซิเดชัน.....	37
4.1 ปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่ง .....	39
4.2 ปฏิกริยาการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรด .....	40
4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มพอลิยูรีเทน (ก.) แบบไม่ปรับปรุงพื้นผิว และ (ข.) แบบไม่ปรับปรุงพื้นผิว (H4C1) เปรียบเทียบกับแบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรด (H4C1R).....	41
4.4 อัตราส่วนความเข้มของพีค $-CH_2-/N=C=O$ จากผล FTIR ในฟิล์มพอลิยูรีเทนอัตราส่วนต่าง ๆ .....	42
4.5 ค่าเฉดสีของฟิล์มพอลิยูรีเทนแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิวและแบบปรับปรุงพื้นผิว (ก.) ค่าความสว่าง (L*), (ข.) เฉดสีเขียว-แดง (a*) และ (ค.) เฉดสีน้ำเงิน-เหลือง (b*) .....	43

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ลักษณะของฟิล์มสูตร H4C1 (แบบไม่ปรับปรุงพื้นผิว) และสูตร H4C1R (แบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต).....	44
4.7 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มพอลิยูรีเทนสูตร H4C1 (แบบไม่ปรับปรุงพื้นผิว) และสูตร H4C1R (แบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต).....	45
4.8 ค่ามัมสัมพัทธ์ที่ผ่านการทดสอบด้วยน้ำกลั่นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ.....	46
4.9 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงจากการดูดซับเมทิลีนบลูบนฟิล์มสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิว (H4C1, H6C1 และ H8C1) และสูตรปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต (H4C1R, H6C1R และ H8C1R) ที่เวลาต่าง ๆ.....	47
4.10 การเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของฟิล์มพอลิยูรีเทนสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิว (H4C1, H6C1 และ H8C1) และสูตรปรับปรุงพื้นผิว (H4C1R, H6C1R และ H8C1R) หลังผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูที่เวลาต่าง ๆ (ก.) ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), (ข.) ผลต่างของเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) และ (ค.) เฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ).....	48
4.11 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด (H4C1R(A)) ปกติ (H4C1R) และเบส (H4C1R(B)) ที่ผ่านการดูดซับเมทิลีน 100 ppm ในสภาวะกรด ปกติ เบส.....	50
4.12 โครงสร้างของเมทิลีนบลู (ก.) สภาวะกรด และ (ข.) สภาวะเบส.....	50
4.13 การเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด (H4C1R(A)) ปกติ (H4C1R) และเบส (H4C1R(B)) ที่ผ่านการดูดซับเมทิลีน 100 ppm ในสภาวะกรด ปกติ เบส (ก.) ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), (ข.) ผลต่างของเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) และ (ค.) เฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ).....	51
4.14 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด ที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้น 10, 50, 100, 500 และ 1000 ppm สภาวะเบส.....	52
4.15 การเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด หลังผ่านการดูดซับเมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้น 10, 50, 100, 500 และ 1000 ppm สภาวะเบส (ก.) ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), (ข.) ผลต่างของเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) และ (ค.) เฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ).....	53
4.16 ลักษณะและโครงสร้างของฟิล์มพอลิยูรีเทนสูตรปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรตที่ผ่านการดูดซับลูโคเมทิลีนบลูปริมาณ 150 ไมโครลิตร ไว้บนพื้นผิว (ก.) ก่อนสัมผัสออกซิเจน และ (ข.) หลังสัมผัสออกซิเจน 1440 นาที.....	55

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 การเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด หลังผ่านการดูดซับลูโค เมทิลีนบลู ปริมาณ 50, 100, 150 ไมโครลิตร แล้วตั้งให้สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศที่ เวลาต่าง ๆ (ก.) ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), (ข.) ผลต่างของเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) และ (ค.) เฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ).....	56
ก-1 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มพอลิยูรีเทนแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิวเปรียบเทียบกับแบบปรับปรุง พื้นผิวด้วยคองโกเรต .....	66

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	ความหมาย
CO	น้ำมันละหุ่ง
HDI	เฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต
PU	พอลิยูรีเทน
CR	คองโกเรต
MB	เมทิลีนบลู
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

แก๊สออกซิเจน ( $O_2$ ) จัดเป็นแก๊สที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทั้งมนุษย์ สัตว์ และพืชต่าง ๆ ดังนั้นที่ผ่านมามีการประดิษฐ์ คิดค้น อุปกรณ์ หรือ เครื่องมือเพื่อใช้ในการตรวจติดตาม หรือตรวจจับออกซิเจน ทั้งในอากาศ และในน้ำ ซึ่งอุปกรณ์หรือเครื่องมือดังกล่าวมีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า ตัวตรวจจับออกซิเจน (Oxygen sensor) นอกจากนี้ยังได้มีการประยุกต์ใช้ตัวตรวจจับออกซิเจนในงานด้านต่าง ๆ อาทิเช่น ในด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อควบคุมมลภาวะ หรือในด้านอุตสาหกรรมอาหารเพื่อตรวจสอบความสดใหม่ของอาหาร เป็นต้น

การวิเคราะห์หรือตรวจจับออกซิเจน สามารถทำได้หลายวิธี เช่น อาศัยหลักการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical) ทางแสง (Optical) หรือทางเคมี (Chemical) เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันตัวตรวจจับออกซิเจนโดยอาศัยหลักการทางแสง หรือตัวตรวจจับออกซิเจนเชิงแสง (Optical oxygen sensor) เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความสนใจมากที่สุด เนื่องจากมีข้อดี คือ ราคาถูก ตอบสนองรวดเร็ว (Fast response) มีความเที่ยงตรง (Precision) และแม่นยำ (Accuracy) สูง ตัวตรวจจับออกซิเจนเชิงแสงคือ อุปกรณ์ที่ต้องอาศัยสีย้อมอินดิเคเตอร์ (Indicator dye) ที่มีหมู่ฟังก์ชันว่องไวต่อออกซิเจนแล้ว ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางแสง เช่น การดูดกลืนแสง (Absorption) หรือการเรืองแสง (Photoluminescence) [1-2]

เมทิลีนบลู (Methylene blue) คือ สีย้อมอินดิเคเตอร์ประเภทรีดอกซ์ (Redox dye) ซึ่งสามารถถูกรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปลูโค (Leuco form) หรือรูปสารละลายไม่มีสี (Colorless) ภายใต้บรรยากาศไร้ออกซิเจน และสามารถถูกออกซิไดซ์เป็นสีฟ้าได้อย่างรวดเร็วภายใต้บรรยากาศออกซิเจน [3] ดังนั้นเมทิลีนบลูจึงเหมาะสมอย่างยิ่งแก่การใช้เป็นสีย้อมอินดิเคเตอร์ในการตรวจจับออกซิเจน แต่เนื่องด้วยส่วนใหญ่เมทิลีนบลูถูกใช้งานในรูปแบบสารละลาย ซึ่งหากนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับออกซิเจน อาจมีข้อเสีย คือ ไม่สะดวกต่อการใช้งาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาตัวตรวจจับชนิดนี้ให้อยู่ในรูปแบบของแข็ง โดยผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูลงบนพื้นผิวของวัสดุรองรับ เพื่อให้สะดวกต่อการพกพาและใช้งาน อีกทั้งยังสามารถตรวจวิเคราะห์เบื้องต้นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งวัสดุรองรับที่ดีควรมีสมบัติในการคงรูปที่ดี ทนทานต่อน้ำและสารละลาย ไม่รบกวนการทำงานของตัวตรวจจับ และสิ่งสำคัญ คือ วัสดุรองรับต้องมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดพันธะที่แข็งแรงกับตัวตรวจจับ หรือมีโครงสร้างที่เอื้อต่อการยึดเกาะของตัวตรวจจับ

พอลิยูรีเทน จัดเป็นพอลิเมอร์ทางเลือกหนึ่งที่มีประโยชน์หลากหลาย สามารถสังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างไดออลและไดไอโซไซยาเนต ในอดีตนิยมใช้ไดออลจำพวกปิโตรเลียม เช่น พอลิพรอพิลีนไกลคอล (Poly(propylene glycol)) และ พอลิคาโพรแลคโตนไดออล (Polycapro-

lactone diol) เป็นต้น เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพอลิยูรีเทน แต่เนื่องจากสารจำพวกปิโตรเลียมมีราคาสูง มีความเป็นพิษ และเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป ในปัจจุบันจึงหันมาให้ความสำคัญกับการใช้วัสดุจากธรรมชาติ ได้แก่ น้ำมันพืช แทนการใช้วัสดุจากปิโตรเลียมมากขึ้น เนื่องจากน้ำมันพืชเป็นน้ำมันที่ราคาถูก มีความบริสุทธิ์สูง มีความเป็นพิษต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถใช้เป็นทรัพยากรทดแทนปิโตรเลียมได้ โดยส่วนใหญ่ใช้น้ำมันพืชที่นิยมนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพอลิยูรีเทนเพื่อทดแทนปิโตรเลียม คือ น้ำมันละหุ่ง (Castor oils) [4-6] เนื่องจากน้ำมันละหุ่งมีองค์ประกอบของกรดริซินอิลิก (Ricinoleic Acid) ในปริมาณสูงถึง 85-95% ซึ่งกรดไขมันดังกล่าวนี้มีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่บนสายโซ่โมเลกุล จึงเหมาะแก่การนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นพอลิออลในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน [7-9] พอลิยูรีเทนมีสมบัติเด่น คือ ความเหนียว ความแข็ง ความยืดหยุ่น มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความใส ทนทานต่อความร้อน, สารเคมี และน้ำ อีกทั้งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถปรับแต่งให้มีสมบัติต่าง ๆ ตามต้องการได้ง่าย โดยผ่านการปรับเปลี่ยนชนิดและสัดส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ นอกจากนี้พอลิยูรีเทนยังมีโครงสร้างที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับเมทิลีนบลูได้ จากสมบัติเด่นของพอลิยูรีเทนและโครงสร้างที่เอื้อต่อการยึดติดกับเมทิลีนบลู บ่งบอกให้ทราบว่าพอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่เหมาะสมแก่การใช้เป็นวัสดุรองรับเมทิลีนบลู และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดติดเมทิลีนบลูได้โดยการต่อกิ่ง (Grafting) คองโกเรด (Congo red) บนพื้นผิวพอลิยูรีเทน

คองโกเรด คือสีย้อมประเภทสีไโดเร็กทีในกลุ่มสารประกอบอะโซ (Azo dyes) ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นตัวบ่งชี้ความเป็นกรด-เบส, เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อนในตัวกลางที่เป็นกรด และเนื่องจากสีย้อมดังกล่าวมีหมู่ฟังก์ชันเป็นเกลือของกรดซัลโฟนิค ( $-SO_3^-Na^+$ ) อยู่ในโครงสร้าง ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยาไอออน-ไอออน (Ion-Ion interaction) กับเมทิลีนบลูซึ่งมีประจุบวกได้ แล้วก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงเมื่อเกิดอันตรกิริยากับไอออนประจุบวก [10] แต่อย่างไรก็ตามที่ผ่านมายังไม่พบงานวิจัยที่นำพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งและต่อกิ่งคองโกเรดมาปรับสภาพพื้นผิวด้วยสีย้อมเมทิลีนบลู เพื่อประยุกต์ใช้ในงานตรวจจับออกซิเจน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการเตรียมตัวตรวจจับออกซิเจนชนิดใหม่ โดยใช้ฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งและต่อกิ่งด้วยคองโกเรดเป็นวัสดุรองรับเมทิลีนบลู ซึ่งเป็นสารที่ไวต่อออกซิเจน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานตรวจจับออกซิเจน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่ง และต่อกิ่งบนพื้นผิวด้วยคองโกเรด
- 2) เพื่อศึกษาผลของการดูดซับเมทิลีนบลูของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่ง และต่อกิ่งบนพื้นผิวด้วยคองโกเรด

- 3) เพื่อศึกษาความว่องไวในการตรวจจับออกซิเจนของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งและตอกิ่งด้วยคองโกเรด

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนจากเฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนตและน้ำมันละหุ่ง
- 2) ปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของหมู่ไอโซไซยาเนตกับหมู่ไฮดรอกซิล (NCO/OH)
- 3) ตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มพอลิยูรีเทนด้วยเทคนิค FTIR และตรวจสอบคองโกเรดบนพื้นผิวฟิล์มพอลิยูรีเทนด้วยเทคนิค Colorimetry และเทคนิค UV-Visible spectroscopy
- 4) ศึกษาผลการดูดซับเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งและตอกิ่งด้วยคองโกเรด
- 5) ศึกษาความว่องไวในการตรวจจับออกซิเจนของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งและตอกิ่งด้วยคองโกเรด

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้องค์ความรู้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่ง และตอกิ่งด้วยคองโกเรด
- 2) สามารถนำฟิล์มพอลิยูรีเทนที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูบนพื้นผิวมาประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับออกซิเจนได้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ตัวตรวจจับออกซิเจน (Oxygen sensor) หรืออินดิเคเตอร์ออกซิเจน (Oxygen indicator)

ตัวตรวจจับออกซิเจน คือตัวชี้วัดปริมาณแก๊สออกซิเจน โดยส่วนใหญ่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากในบรรจุภัณฑ์ที่มีการสะสมแก๊สออกซิเจนในปริมาณที่สูงเกินไปหรือเป็นระยะเวลาเวลานาน จะก่อให้เกิดผลเสียต่ออาหารตามมา เช่น ทำให้อาหารเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแล้วมีกลิ่นเหม็นหืน หรือทำให้เชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนอยู่ในอาหาร เช่น รา หรือแบคทีเรียต่าง ๆ ที่ต้องการอากาศ มีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มสูงขึ้น แล้วส่งผลให้อาหารเกิดการเน่าเสีย ซึ่งหากรับประทานเข้าไปอาจเป็นอันตรายต่อร่างกายได้ เป็นต้น ดังนั้นตัวตรวจจับออกซิเจนจึงถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า หรือทางสีเมื่อตัวตรวจจับดังกล่าว นั้นถูกออกซิไดซ์

วิธีที่ใช้ในการตรวจวัดออกซิเจน แบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามหลักการที่ใช้ ดังนี้

- (1) การตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical detection) ได้แก่ กระแสไฟฟ้า (Amperometric), ศักย์ไฟฟ้า (Potentiometric) หรือการนำไฟฟ้า (Conductometric) เป็นต้น
- (2) การตรวจวัดทางแสง (Optical detection) ได้แก่ การดูดกลืนแสง (Absorption) หรือการเรืองแสง (Photoluminescence) เป็นต้น
- (3) การตรวจวัดทางเคมี (Chemical detection) ได้แก่ การไทเทรตด้วยวิธีของริงคเลอร์ (Winkler titration) เป็นต้น [1]

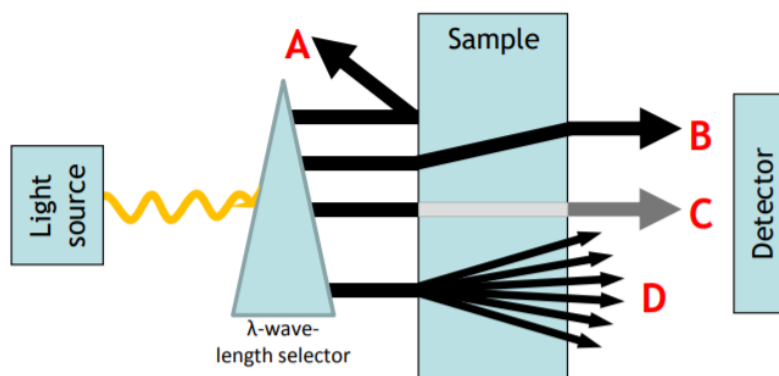
#### 2.1.1 การตรวจวัดทางแสง

การตรวจวัดทางแสง สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีโดยผ่านการวิเคราะห์จากความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสี (Radiation) กับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ ซึ่งอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นนั้น สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

- (1) การดูดกลืนแสง
- (2) การคายแสง ได้แก่ การวาวแสง (Fluorescence) หรือการเรืองแสง
- (3) การสะท้อนแสง (Reflection) หรือ การหักเหแสง (Refraction)

รูปแบบการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับตัวอย่างวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งข้อดีของตัวตรวจจับทางแสง คือ ราคาถูก มีความเที่ยงตรงและแม่นยำสูง และสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยตาเปล่า เป็นต้น [2]

วิธีตรวจวัดทางแสงที่นิยมใช้มากที่สุด คือ การวัดการดูดกลืนแสงหรือการคายแสง



รูปที่ 2.1 รูปแบบอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี :  
A – การสะท้อนแสง, B – การหักเหแสง, C – การดูดกลืนแสง และ D – การคายแสง  
[11]

### 2.1.2 การออกแบบตัวตรวจวัดทางแสง

วิธีตรวจวัดทางแสง แบ่งออกเป็น 2 วิธี ดังนี้

(1) วิธีตรวจวัดทางแสงโดยตรง (Direct sensing) คือ วิธีตรวจวัดสมบัติทางแสงภายใน (Intrinsic optical property) สารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์โดยตรง เช่น การดูดกลืนแสง หรือการเรืองแสง

(2) วิธีตรวจวัดทางแสงโดยผ่านอินดิเคเตอร์ (Indicator mediated sensing) คือ วิธีตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองทางแสงของอินดิเคเตอร์ เพื่อใช้ในการตรวจติดตามความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ วิธีนี้เหมาะสมอย่างยิ่งในการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่ไม่มีสมบัติทางแสงภายใน หรือไม่สามารถตรวจวัดสมบัติทางแสงได้โดยตรง โดยทั่วไปอินดิเคเตอร์ที่นิยมนำมาใช้เป็นสารตัวกลางสำหรับการตรวจวัดด้วยวิธีนี้ คือ โมเลกุลสีย้อม

สำหรับการตรวจวัดโดยผ่านอินดิเคเตอร์นั้น จำเป็นต้องมีวัสดุรองรับเพื่อยึดติดสารตัวกลางไว้ สำหรับวัสดุที่สามารถนำมาใช้ในการรองรับสารตัวกลางนั้นมีหลากหลายชนิด เช่น ฟิล์ม, เจล, เส้นใยแก้วนำแสง (Optical fibres) หรืออนุภาคนาโน เป็นต้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่นิยมใช้ฟิล์มพอลิเมอร์แบบบาง (Thin polymer films) หรือเมมเบรนเป็นวัสดุรองรับสารตัวกลาง [11]

### 2.1.3 อินดิเคเตอร์ (Indicator)

หลักการพื้นฐานทางเคมีของอินดิเคเตอร์ที่ใช้ในงานตรวจวัดเคมีทางแสง (Optical chemical sensor) คือการวัดความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ทางอ้อม โดยผ่านการตรวจวัดสมบัติทางแสงที่เปลี่ยนแปลงไปของอินดิเคเตอร์ ซึ่งสามารถแสดงผลได้ในรูปของสัญญาณอินดิเคเตอร์ที่ใช้ในงานตรวจวัดเคมีทางแสง แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

(1) อินดิเคเตอร์ทางสี (Colorimetric indicators) คืออินดิเคเตอร์ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสีเมื่อมีการรวมตัวหรือยึดติดกับสารวิเคราะห์ได้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสีที่เกิดขึ้นนั้นสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า หรือใช้การวิเคราะห์ผ่านการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีร่วมด้วย ตัวอย่างอินดิเคเตอร์ทางสี เช่น อินดิเคเตอร์พีเอช (pH indicators), อินดิเคเตอร์รีดอกซ์ (Redox indicators) หรืออินดิเคเตอร์โลหะ (Metal indicators) เป็นต้น

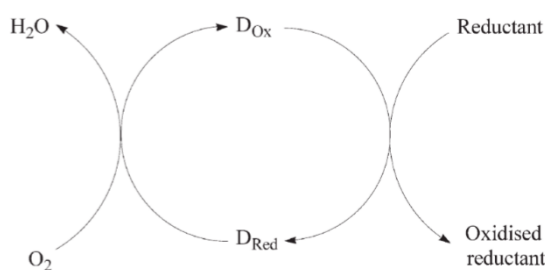
อินดิเคเตอร์รีดอกซ์ จัดเป็นอินดิเคเตอร์ทางสีชนิดหนึ่งที่สามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์แบบผันกลับได้ เช่น สารอินทรีย์จำพวกสีย้อมรีดอกซ์ สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสีย้อมรีดอกซ์กับสารชนิดต่าง ๆ ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดแก๊สออกซิเจน มีดังนี้

- สีย้อมรีดอกซ์ทำปฏิกิริยากับสารให้ไฮโดรเจนอะตอม

สีย้อมรีดอกซ์ในรูปออกซิไดซ์ สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) กับสารให้ไฮโดรเจนอะตอม เช่น กลูโคสที่อยู่ในสารละลายเบส แล้วเกิดการเปลี่ยนรูปสีย้อมรีดอกซ์ให้อยู่ในรูปรีดิวซ์ ในขณะที่สารให้ไฮโดรเจนอะตอมถูกออกซิไดซ์ ดังสมการที่ 2.1 แล้วส่งผลให้สีของสีย้อมเกิดการเปลี่ยนแปลง



นอกจากนี้สถานะของสีย้อมยังส่งผลต่อสีที่เกิดขึ้น หากสีย้อมอยู่ในสถานะปราศจากออกซิเจน จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาฟอกสี (Bleaching reaction) ซึ่งทำให้สีย้อมรีดอกซ์ถูกรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปใสไม่มีสี แต่ในทางตรงกันข้าม หากอยู่ในสถานะที่มีออกซิเจนสีย้อมรีดอกซ์จะถูกออกซิไดซ์ให้กลับมาอยู่ในรูปมีสี ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

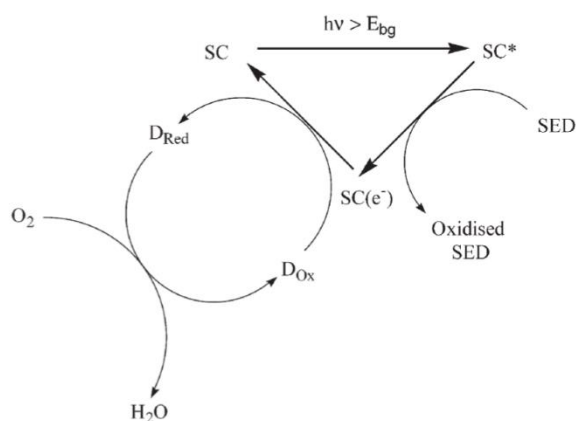


รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมรีดอกซ์กับสารให้ไฮโดรเจนอะตอม เพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับออกซิเจน; D<sub>Ox</sub> คือ สีย้อมรีดอกซ์ในรูปออกซิไดซ์ และ D<sub>Red</sub> คือสีย้อมรีดอกซ์ในรูปรีดิวซ์ [12]

- สีย้อมรีดอกซ์ทำปฏิกิริยากับสารกึ่งตัวนำและตัวให้อิเล็กตรอน

การบรรจุอนุภาคสารกึ่งตัวนำลงในฟิล์มพอลิเมอร์ แล้วกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลต เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-หลุม (Electron-hole pairs) โดยหลุมที่เกิดขึ้นนี้สามารถถูกออกซิไดซ์ได้อย่างรวดเร็วและไม่สามารถผันกลับได้เมื่อมีตัวให้อิเล็กตรอนอยู่ในระบบ จึงส่งผลให้เกิดการสะสมของอิเล็กตรอนบนอนุภาคกึ่งตัวนำ ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะไปรีดิวซ์สีย้อมรีดอกซ์ที่อยู่ในรูปออกซิไดซ์ให้มี

สีจางลงจนกระทั่งกลายเป็นใสไม่มีสี อย่างไรก็ตามสีย้อมรีดอกซ์ในรูปใสไม่มีสีสามารถถูกออกซิไดซ์กลับมาเป็นสีย้อมรีดอกซ์ที่มีสีดั้งเดิมเมื่อมีออกซิเจนในระบบ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสีย้อมรีดอกซ์กับสารกึ่งตัวนำและตัวให้อิเล็กตรอนเมื่อมีการกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



**รูปที่ 2.3** ปฏิกิริยาระหว่างสีย้อมรีดอกซ์กับสารกึ่งตัวนำและตัวให้อิเล็กตรอนเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต เพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับออกซิเจน; SC คือ สารกึ่งตัวนำ และ SED คือ ตัวให้อิเล็กตรอน [12]

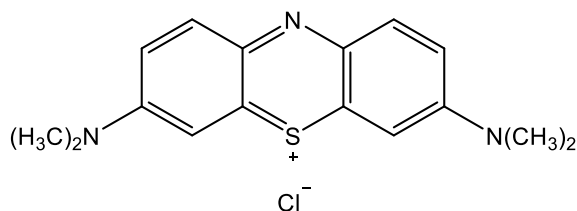
(2) อินดิเคเตอร์ทางแสง (Luminescent indicators) คืออินดิเคเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารวิเคราะห์ ผ่านการวัดค่าการคายแสงที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเกิดการคอมเพล็กซ์กับสารวิเคราะห์ ตัวอย่างอินดิเคเตอร์ทางแสง เช่น อินดิเคเตอร์เรืองแสง (Fluorescent indicators) เป็นต้น [11]

### 2.1.3.1 เมทิลีนบลู (Methylene blue)

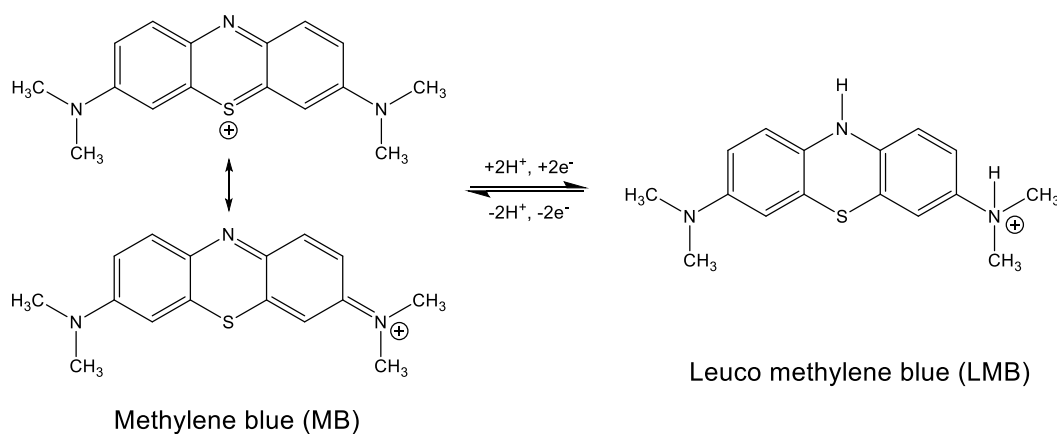
เมทิลีนบลู คือ สีย้อมที่มีลักษณะเป็นผงสีเขียวเข้ม ละลายได้ดีในน้ำ และละลายได้เล็กน้อยในแอลกอฮอล์ เมื่อละลายน้ำจะได้สารละลายสีน้ำเงินเข้ม เมทิลีนบลูเป็นสารอินทรีย์ที่มีการนำไปใช้ประโยชน์ในหลาย ๆ ด้าน ได้แก่ ใช้เป็นสีย้อม และใช้ในทางการแพทย์ เช่น ใช้เป็นยารักษาโรคในมนุษย์ และยารักษาโรคในปลา เป็นต้น [13]

เมทิลีนบลู จัดเป็นสีเบสิด (Basic dyes) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.4 และเนื่องจากเมทิลีนบลูมีไอออนประจุบวกอยู่ในโครงสร้าง จึงอาจเรียกสีประเภทนี้ว่า สีแคทไอออนิก (Cationic Dyes) นอกจากนี้เมทิลีนบลูยังจัดเป็นสีย้อมรีดอกซ์ (Redox dye หรือ Redox indicator) เมื่ออยู่ในสภาวะปราศจากออกซิเจน เมทิลีนบลูจะถูกรีดิวซ์มาอยู่ในรูปลูโคเมทิลีนบลู (Leuco methylene blue) ซึ่งเป็นรูปที่ใสไม่มีสี (Colorless form) ผ่านการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยส่วนใหญ่นิยมใช้กลูโคสเป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) และมีเบสเป็นตัวเร่งการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งกลูโคสที่

ใช้เป็นตัวรีดิวซ์ในที่นี่จะถูกออกซิไดซ์ให้อยู่ในรูปกรดกลูโคนิก (Gluconic acid) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อลูโคเมทิลีนบลู อยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนจะถูกออกซิไดซ์กลับมาอยู่ในรูปเมทิลีนบลู หรือรูปที่มีสีน้ำเงินอย่างรวดเร็วผ่านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [3] ซึ่งการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของเมทิลีนบลูสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเมทิลีนบลู



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยารีดอกซ์ของเมทิลีนบลู [14]

#### 2.1.4 การยึดติดอินดิเคเตอร์กับวัสดุรองรับ

การออกแบบตัวตรวจจับให้อยู่ในรูปแบบของแข็งเพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานนั้น สามารถทำได้โดยการยึดติดอินดิเคเตอร์หรือโมเลกุลตรวจวัดลงบนพื้นผิวของวัสดุรองรับที่เป็นของแข็ง วิธีที่ใช้ในการยึดติดโมเลกุลตรวจวัด แบ่งออกเป็น 2 วิธีตามแรงที่ใช้ในการยึดติด ได้แก่

##### 2.1.4.1 การยึดติดทางกายภาพ (physical embedding)

การยึดติดอินดิเคเตอร์ทางกายภาพ คือการสร้างชั้นเคลือบหรือการยึดอินดิเคเตอร์ไว้บนพื้นผิวของวัสดุรองรับ ซึ่งอินดิเคเตอร์และวัสดุรองรับที่ใช้นั้นไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกัน เช่น กระบวนการโซลเจล (Sol-gel), กระบวนการจุ่ม-อัด-ผนึกด้วยความร้อน (Pad-dry-cure) หรือการใช้สารยึดติด (Binder) เป็นต้น โดยส่วนใหญ่นิยมใช้วิธีนี้ในกรณีที่ว่าวัสดุรองรับเป็นเส้นใย

### 2.1.4.2 การดัดแปรพื้นผิวทางเคมี (Chemical surface modification)

การยึดติดอินดิเคเตอร์ผ่านการดัดแปรพื้นผิวทางเคมี คือการใช้พันธะเคมีในการยึดติดระหว่างอินดิเคเตอร์กับวัสดุรองรับ ซึ่งอินดิเคเตอร์และวัสดุรองรับมีความจำเพาะของหมู่ฟังก์ชันในการสร้างพันธะซึ่งกันและกัน นอกจากนี้การยึดติดด้วยวิธีนี้มีข้อดี คือ มีความแข็งแรงสูงกว่าการยึดติดทางกายภาพ ทำให้อินดิเคเตอร์ไม่สามารถเคลื่อนตัวหรือหลุดออกจากวัสดุรองรับได้ ทำให้การตรวจวัดที่ได้มีประสิทธิภาพสูงกว่าการยึดติดทางกายภาพ [15]

ตัวอย่างการยึดติดอินดิเคเตอร์กับพอลิเมอร์ เช่น

- การย้อม (Impregnation) หรือการตรึงอินดิเคเตอร์ไว้บนพอลิเมอร์ ผ่านการดูดซับทางกายภาพ, การดูดซับทางเคมี หรือด้วยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต ซึ่งทำได้โดยการจุ่มฟิล์มพอลิเมอร์ลงในสารละลายอินดิเคเตอร์ที่อิ่มตัว แล้วระเหยตัวทำละลายออก [16]
- การเติม (Doping) อินดิเคเตอร์ลงในสารละลายพอลิเมอร์ตั้งต้น เพื่อให้อินดิเคเตอร์ยึดติดกับพอลิเมอร์ในระหว่างกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน [17]

## 2.2 พอลิยูรีเทน (Polyurethane)

### 2.2.1 การสังเคราะห์พอลิยูรีเทน

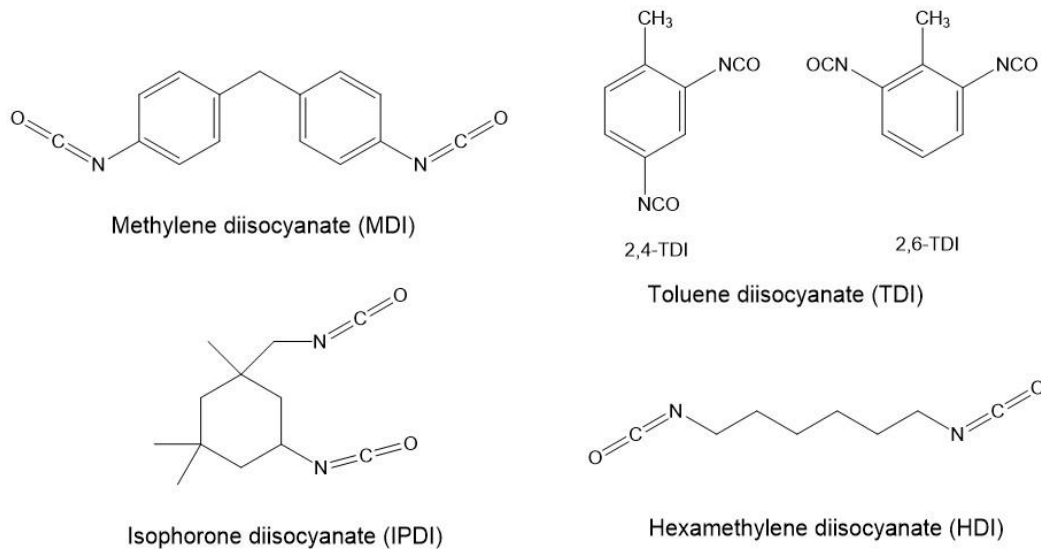
พอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถสังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไอโซไซยาเนต (-NCO group) ของไดไอโซไซยาเนต, ไตรไอโซไซยาเนต หรือพอลิไอโซไซยาเนต กับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) ของไดออล, ไตรออล หรือพอลิออล โดยผ่านปฏิกิริยาการเติมแบบขั้น (Step-addition) ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาจะมีพันธะยูรีเทน (-RNHCOOR'-) อยู่ภายในสายโซ่

### 2.2.2 ไอโซไซยาเนต (Isocyanate)

ไอโซไซยาเนต คือสารประกอบอินทรีย์ประเภทอะโรมาติกหรืออะลิฟาติกที่มีหมู่ไอโซไซยาเนต (-NCO) อยู่ในโครงสร้าง สารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ไอโซไซยาเนต 1 หมู่ เรียกว่า ไอโซไซยาเนต และสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ไอโซไซยาเนต 2 หมู่ เรียกว่า ไดไอโซไซยาเนต (Diisocyanate)

สารประกอบไอโซไซยาเนตที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายชนิด เช่น เฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (HDI), โทลูอีนไดไอโซไซยาเนต (TDI), ไอโซฟอโรนไดไอโซไซยาเนต (IPDI), และ เมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (MDI) เป็นต้น ส่วนใหญ่นิยมนำสารประกอบไอโซไซยาเนตมาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตโฟมพอลิยูรีเทน ใช้ทำสีพอลิยูรีเทนสำหรับงานเคลือบภายนอก และใช้เป็นสารปรับสภาพกลุ่มพอลิยูรีเทนในยางสังเคราะห์ สำหรับสารประกอบไอโซไซยาเนตที่มีหมู่ฟังก์ชัน

มากกว่าสองหมู่จะนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตพอลิยูรีเทนเป็นส่วนใหญ่ [18] ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบไดไอโซไซยาเนตที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตพอลิยูรีเทนแสดงดังรูปที่ 2.6



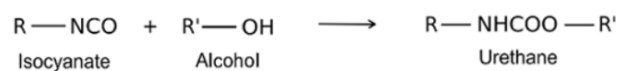
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบไดไอโซไซยาเนตที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตพอลิยูรีเทน

### 2.2.2.1 การเกิดปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนต

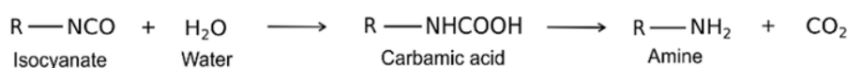
หมู่ฟังก์ชันไอโซไซยาเนตมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงมาก เนื่องจากมีพันธะคู่ถึง 2 พันธะ โดยโครงสร้างของไอโซไซยาเนตสามารถเขียนได้หลายแบบ แม้ว่าจะเป็นไอโซไซยาเนตเหมือนกัน แต่ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของหมู่ฟังก์ชันนั้นอาจมีค่าเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ ซึ่งเป็นผลมาจากความเกะกะของโครงสร้างด้วย เช่น ในกรณีของ 2,4-โทลูอินไดไอโซไซยาเนต หมู่ไอโซไซยาเนตอยู่ในตำแหน่ง para มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหมู่ไอโซไซยาเนตในตำแหน่ง ortho [19]

ปฏิกิริยาที่สำคัญของไอโซไซยาเนตกับสารต่าง ๆ มีดังนี้ [20]

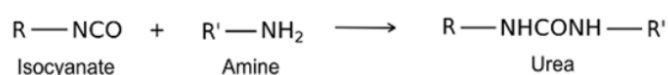
- 1) ไอโซไซยาเนตทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ เกิดเป็นยูรีเทน



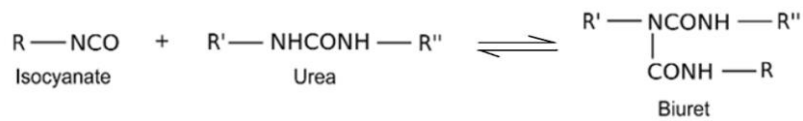
- 2) ไอโซไซยาเนตทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีน



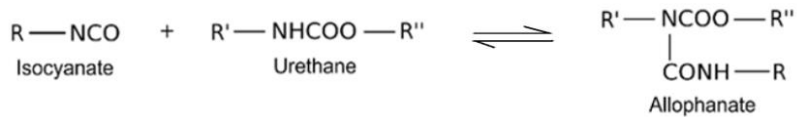
- 3) ไอโซไซยาเนตทำปฏิกิริยากับเอมีน เกิดเป็นยูเรีย



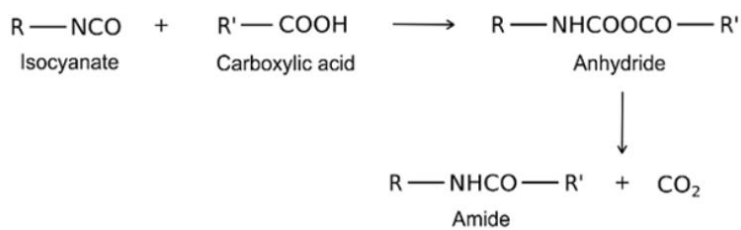
4) ไอโซไซยาเนตทำปฏิกิริยากับยูเรีย เกิดเป็นไบยูเรต (Biuret)



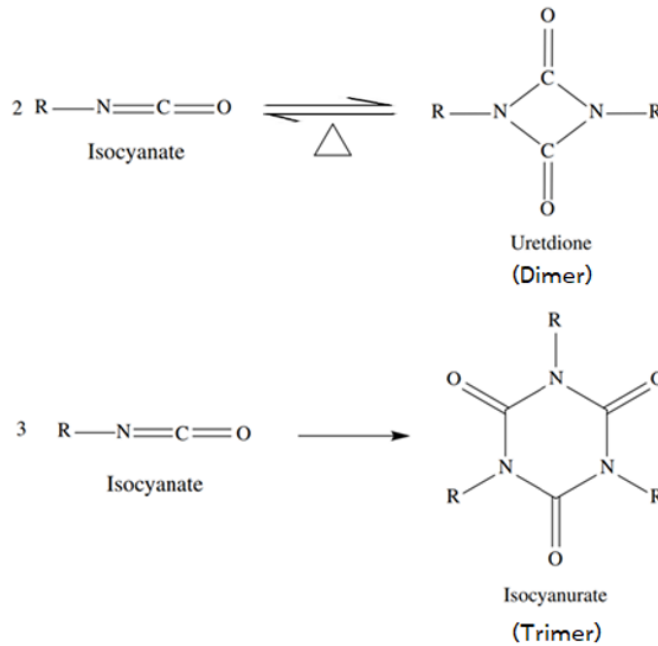
5) ไอโซไซยาเนตทำปฏิกิริยากับยูรีเทน เกิดเป็นอัลโลฟานาต (Allophanate)



6) ไอโซไซยาเนตทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอกซิลิก เกิดเป็นเอไมด์ (Amide)



7) ไอโซไซยาเนตทำปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนต เกิดเป็นไดเมอร์ หรือ ไตรเมอร์

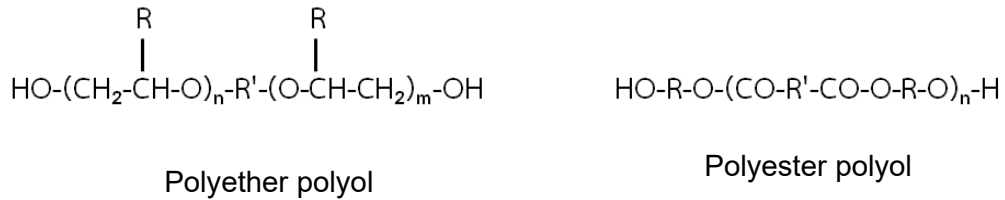


### 2.2.3 พอลิโออล (Polyol)

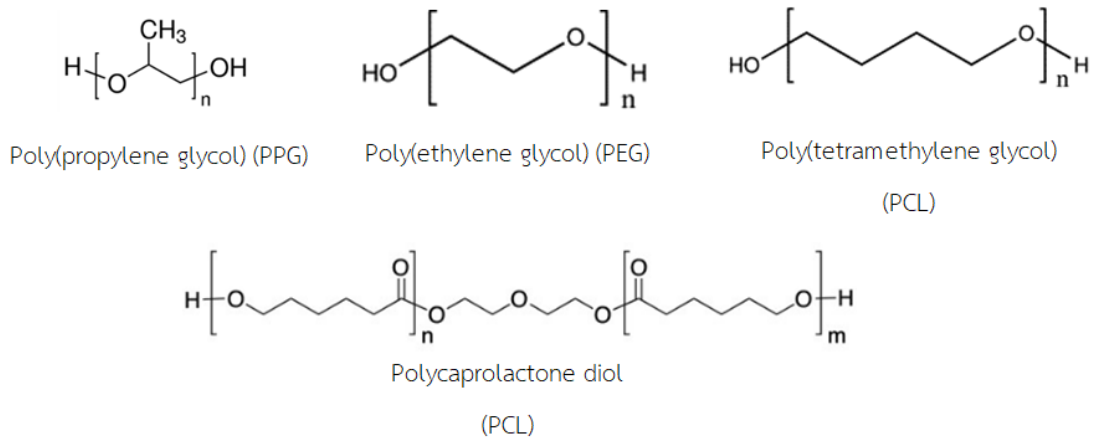
เป็นสารประกอบพอลิเมอร์ไฮดรอกซิลที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อย่างน้อยสองหมู่ขึ้นไป และมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 2000 - 10000 กรัมต่อโมล

พอลิโออลที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน มี 2 ชนิด ได้แก่ พอลิอีเทอร์พอลิโออล (Polyether polyol) และพอลิเอสเทอร์พอลิโออล (Polyester polyol) ซึ่งมีสูตรโครงสร้าง

ทางเคมีทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.7 สมบัติของพอลิยูรีเทนขึ้นอยู่กับชนิด, โครงสร้างทางเคมี, น้ำหนักโมเลกุล และค่าไฮดรอกซิลของพอลิออล นอกจากนี้โครงสร้างทางเคมีของพอลิออลยังส่งผลโดยตรงต่อความยืดหยุ่นของพอลิยูรีเทน [21] ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของพอลิออลที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างทางเคมีทั่วไปของพอลิอีเทอร์พอลิออล และพอลิเอสเทอร์พอลิออล



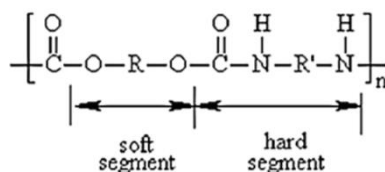
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของพอลิออลที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน

#### 2.2.4 ลักษณะทั่วไปของพอลิยูรีเทน

พอลิยูรีเทน เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถเตรียมให้มีลักษณะตั้งแต่แข็งเหนียวจนกระทั่งมีความนุ่มฟูคล้ายฟองน้ำ นอกจากนี้พอลิยูรีเทนยังมีสมบัติเด่นในหลากหลายด้าน เช่น มีสมบัติเชิงกลที่ดี ต้านทานต่อสารเคมี และยังมี ความยืดหยุ่น ดังนั้นจึงมีการนำพอลิยูรีเทนมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ เช่น โฟม, เส้นใย, กาว, สารเคลือบ และอีลาสโตเมอร์ เป็นต้น จึงส่งผลให้ปริมาณการใช้งานของพอลิยูรีเทนในปัจจุบันมีแนวโน้มที่สูงขึ้น

ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของพอลิยูรีเทน และความแตกต่างของชนิดพอลิยูรีเทนนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะของหมู่แอลคิล (R และ R') ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โครงสร้างของหมู่แอลคิลสามารถใช้เป็นตัวบ่งบอกแนวโน้มด้านสมบัติของพอลิยูรีเทน นอกจากนี้ชนิดของพอลิยูรีเทนยังขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างทางเคมีของหน่วยซ้ำของพอลิยูรีเทนด้วย โดยจากโครงสร้างพื้นฐานทั่วไปจะแบ่งหน่วยซ้ำ

ของพอลิยูรีเทนออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนนิ่ม (Soft segment) และส่วนแข็ง (Hard segment) ซึ่งส่วนนิ่มมักจะเป็นส่วนในกลุ่มของไดออล และส่วนแข็งเป็นส่วนในกลุ่มของไดไอโซไซยาเนต การที่พอลิยูรีเทนสามารถแสดงลักษณะได้สองส่วนนี้ ส่วนหนึ่งเป็นเพราะ ในส่วนของไดออลมี  $-C-O-C-$  ซึ่งมีมุมพันธะที่มีความยืดหยุ่นสูง ในขณะที่ในส่วนของไดไอโซไซยาเนตมี  $-NH-CO-$  ซึ่งมีความแข็งแรงสูง มีมุมพันธะที่มีความยืดหยุ่นที่ต่ำกว่า และยังมีผลจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนจากหมู่ฟังก์ชันของส่วนนี้ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทั่วไปของพอลิยูรีเทน

ปริมาณสัดส่วนระหว่างไดไอโซไซยาเนตและไดออลในโมเลกุล เป็นตัวกำหนดสมบัติของพอลิยูรีเทน หากมีปริมาณสัดส่วนไดไอโซไซยาเนตสูง จะส่งผลให้พอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ขึ้นมานั้นมีความแข็งแรงสูงตามไปด้วย แม้ว่าพอลิยูรีเทนนั้นจะไม่เกิดโครงสร้างแบบร่างแหก็ตาม [22]

### 2.2.5 สมบัติของพอลิยูรีเทน

- 1) พอลิยูรีเทนมีความทนทานต่อน้ำมัน และตัวทำละลายอินทรีย์ โดยเฉพาะตัวทำละลายอะโรมาติก และคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน
- 2) พอลิยูรีเทนที่ผ่านการบ่มเต็มที่แล้ว จะมีแรงยึดผิวหน้าดี มีความคงทนต่อการขัดสีสูง มีความเหนียว และทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ เนื่องจากในสายโซ่ของพอลิเมอร์มีหมู่ที่มีขั้วอยู่เป็นจำนวนมาก
- 3) พอลิยูรีเทนสามารถเกิดไฮโดรไลซิสได้ยาก จึงทนทานต่อต่าง น้ำ และกรดได้ดี
- 4) พอลิยูรีเทนที่มีอะโรมาติกไอโซไซยาเนตเป็นองค์ประกอบ มักจะเหลืองได้ง่ายเมื่อถูกแสงอัลตราไวโอเล็ต และจะเหลืองได้ง่ายขึ้นถ้าโมเลกุลมีกรดไขมันไม่อิ่มตัว เพราะจะสามารถเกิดเป็นเปอร์ออกไซด์กับออกซิเจนได้ และเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้จะไปออกซิไดส์หมู่อะโรมาติกให้เกิดเป็นสารสีเหลือง [23]

### 2.2.6 การประยุกต์ใช้พอลิยูรีเทน

พอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติที่หลากหลาย เนื่องจากประกอบด้วยองค์ประกอบที่เป็นส่วนนิ่ม และส่วนแข็ง ซึ่งในการสังเคราะห์สามารถปรับปริมาณอัตราส่วนขององค์ประกอบทั้งสองเพื่อให้ได้พอลิยูรีเทนที่มีสมบัติตั้งแต่แข็งมากไปจนถึงอ่อนนุ่มได้

### 2.2.6.1 พอลิยูรีเทนอีลาสโตเมอร์

ส่วนใหญ่นิยมใช้งานในรูปแบบของแข็งที่มีชั้นหนา ๆ มีสมบัติทางกายภาพดีที่สุดเมื่อเทียบกับอีลาสโตเมอร์ชนิดอื่น ๆ เช่น มีค่ามอดุลัสสูง ทนทานต่อการขีดถูสูง มีความสามารถในการกลับสู่สภาพเดิมได้ดี และทนแรงกดได้มากกว่ายาง นอกจากนี้ยังมีความทนทานที่ดีต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ตัวทำละลาย และน้ำมัน อาจมีค่าความแข็งแรงดึงสูงถึง 60 เมกะปาสคาล และมีค่าการดึงยืด ณ จุดขาด สูงถึง 600-900% หรือมากกว่านั้น อีกทั้งยังสามารถใช้เส้นใยแก้วในการเสริมแรงได้อีกด้วย

### 2.2.6.2 พอลิยูรีเทนโฟม

พอลิยูรีเทนนิยมใช้ในการผลิตโฟม ซึ่งมีสัดส่วนประมาณ 80% โดยโฟมที่ผลิตขึ้นสามารถแบ่งออกได้หลากหลายลักษณะ ได้แก่ ยัดหยุ่นหรือนุ่ม, แข็ง และกึ่งแข็ง นอกจากนี้สารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิตโฟมแล้วยังต้องมีสารเติมแต่งอื่น ๆ ร่วมด้วย ได้แก่ สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agent), สารลดแรงตึงผิว (Surfactant), ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) และ สี (Pigment) เป็นต้น

### 2.2.6.3 สารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน

ในปัจจุบันมีการนำพอลิยูรีเทนมาใช้เป็นสารเคลือบผิวอยู่ประมาณ 7% โดยสมบัติเด่นของสารเคลือบผิวพอลิยูรีเทน คือ ทนทานต่อการขีดถู, ทนทานต่อสารเคมี, ทนทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน, มีการยึดติดกับพื้นผิวที่ดี, มีความมันวาว และใช้งานได้ที่อุณหภูมิในช่วงกว้างตั้งแต่ -50 ถึง 130 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีอีกด้วย สารเคลือบผิวพอลิยูรีเทนโดยส่วนใหญ่นิยมนำมาใช้กับงานจำพวกไม้, โลหะ, คอนกรีต, วัสดุก่อสร้าง, ยาง, พลาสติก, เส้นใย, กระดาษ และหนัง

### 2.2.6.4 สารยึดเกาะพอลิยูรีเทน

สารยึดเกาะพอลิยูรีเทน สามารถยึดเกาะกับพื้นผิวที่มีขี้ได้ดี ทนทานต่อสารเคมีและตัวทำละลาย มีสมบัติในการดูดซับเสียงได้ดี นิยมนำมาประยุกต์ใช้งานกับวัสดุที่พื้นผิวมีขี้ เช่น โลหะ, พลาสติก, ไม้, เซรามิก, หนัง และเส้นใย

### 2.2.6.5 เส้นใยพอลิยูรีเทน

เส้นใยพอลิยูรีเทน สามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ ได้แก่ แบบทั่วไป และแบบยัดหยุ่น โดยเส้นใยพอลิยูรีเทนที่นิยมใช้กันมาก คือ spandex ซึ่งมีการใช้งานสูงประมาณ 85% สมบัติเด่นที่ทำให้ spandex ได้รับความนิยมมากกว่าเส้นใยชนิดอื่น ๆ คือ มีการดึงยืดได้มากที่สุดในหมู่เส้นใยด้วยกัน รวมทั้งมีค่ามอดุลัสยัดหยุ่นสูงถึง 2-4 เท่าเมื่อเทียบกับยาง และมีสมบัติการคืนตัวดี (Recovery)

### 2.2.6.6 หน้กเทียม

หน้กเทียมประกอบไปดว้ยชั้นนอกสุดที่มีความนุ่มซึ่งทำมาจากเส้นใยพอลิเมอร์สังเคราะห์ และหน้กเทียมที่มีสมบัติที่ดีที่สุดนั้น ได้แก่อน้กเทียมที่ใช้พอลิยูรีเทนเป็นชั้นนอกสุด เนื่องจากมีความยืดหยุ่นและมีความแข็งแรงสูง, ทนการขัดถูได้ดี, ทนอุณหภูมิต่ำและสูงได้, ทนทานต่อตัวทำละลาย และการขีดข่วน [24]

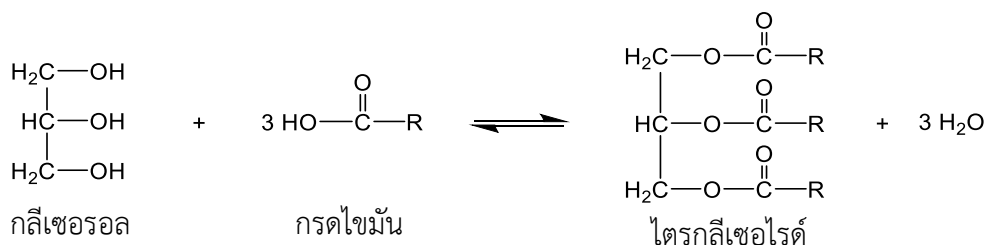
## 2.3 น้ำมันธรรมชาติ (Natural Oils)

น้ำมันธรรมชาติถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบผิวมานานแล้ว แต่ในปัจจุบันการใช้น้ำมันธรรมชาติเป็นสารเคลือบผิวเพียงอย่างเดียวมีอยู่น้อยมาก อย่างไรก็ตามมีการนำน้ำมันมาใช้เป็นส่วนผสมของ วาร์นิชหรือสารเคลือบผิวบางชนิดเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการ เช่น เพื่อเพิ่มความอ่อนตัวของฟิล์ม ทำให้ไม่เปราะ หรือเพื่อปรับปรุงสมบัติการละลาย เป็นต้น

น้ำมันธรรมชาติที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบผิวได้มาจาก 2 แหล่งใหญ่ ๆ คือ น้ำมันพืช และน้ำมันจากทะเลซึ่งส่วนใหญ่ ได้แก่ น้ำมันปลา [25]

### 2.3.1 องค์ประกอบของน้ำมัน

น้ำมันเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) กล่าวคือเป็นไตรเอสเตอร์ (Triester) ของกลีเซอรอล (Glycerol) กับกรดไขมัน (Fatty acid) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การสังเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์

ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ ดังนั้นหากไฮโดรไลซ์ (Hydrolyze) น้ำมันจะได้กลีเซอรอล และกรดไขมัน

ไขมัน (Fat) จัดเป็นสารประกอบไตรกลีเซอไรด์เหมือนกับน้ำมัน แต่มีสถานะที่ต่างกัน ไขมันมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่น้ำมันมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง [26]

### 2.3.2 กรดไขมัน

กรดไขมัน เป็นกรดที่ได้จากน้ำมัน โดยทั่วไปชนิดและโครงสร้างโมเลกุลของกรดไขมันมีผลต่อสมบัติการแห้งตัวของน้ำมัน



ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัวชนิดต่าง ๆ (ต่อ)

กรดไขมัน	ชื่อเคมี	โครงสร้าง
กรดอีลีโอสเตียริก	9,11,13-octadecatrienoic acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{CH}=\text{CHCH}=\text{CHCH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$ แอลฟา (cis-trans-trans) บีตา (trans-trans-trans)
กรดลิคานิก	4-keto-9,11,13-octadecatrienoic acid	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{CH}=\text{CHCH}=\text{CHCH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_4\text{CO}(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$ แอลฟา (cis-trans-trans) บีตา (trans-trans-trans)
กรดพารินาริก	9,11,13,15-octadecatetraenoic acid	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}=\text{CHCH}=\text{CHCH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$

### 2.3.3 ชนิดของน้ำมัน

การแบ่งชนิดของน้ำมันสามารถแบ่งตามสมบัติในการแห้งตัว ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความไม่อิ่มตัวของกรดไขมันที่มีอยู่ในน้ำมันนั้น ๆ โดยแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

1) น้ำมันแห้งเร็ว (Drying oil) สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศแล้วเปลี่ยนสภาพน้ำมันจากของเหลวเป็นฟิล์มที่แห้งแข็ง แห้งตัวได้เร็วที่สุด ไม่ละลายในตัวทำละลายที่สามารถละลายน้ำมันได้ ฟิล์มที่ได้จากน้ำมันชนิดนี้สามารถป้องกันการซึมผ่านของความชื้นได้ดี และมีความทนทานต่อสารเคมี น้ำมันชนิดนี้ส่วนใหญ่ประกอบด้วยกรดไขมันที่มีพันธะคู่ 3 พันธะต่อสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน 1 สายโซ่ เช่น น้ำมันลินสีด และน้ำมันทัง เป็นต้น

2) น้ำมันแห้งช้า (Semi-drying oil) สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศได้น้อย และเกิดเป็นฟิล์มที่แห้งช้ากว่าน้ำมันแห้งเร็ว กรดไขมันที่สำคัญในน้ำมันชนิดนี้มีพันธะคู่ 2 พันธะต่อสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน 1 สายโซ่ น้ำมันชนิดนี้นิยมใช้เป็นสารประกอบในอัลคิเดรซินที่ไม่ขึ้นเหลือง (Non-yellowing alkyd) เช่น น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันดอกคำฝอย เป็นต้น

3) น้ำมันไม่แห้ง (Non-drying oil) เป็นน้ำมันที่ไม่สามารถแห้งตัวได้ น้ำมันชนิดนี้ประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นส่วนใหญ่ หรือมีพันธะคู่ต่อสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนน้อย ส่วนใหญ่นิยมใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์สำหรับเรซินที่ใช้เป็นสารยึดในแลกเกอร์ เช่น น้ำมันละหุ่ง เป็นต้น

### 2.3.4 การวิเคราะห์น้ำมัน

ก่อนนำน้ำมันมาใช้งานต้องทำการตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันก่อน โดยทำตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ เช่น มาตรฐาน B.S. (British Standards) มาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) มาตรฐาน AOCS (American Oil Chemists Society) เป็นต้น เพื่อทำการตรวจสอบค่าต่าง ๆ ดังนี้

1) **ค่าความเป็นกรด (Acid value)** นิยามไว้ว่า เป็นจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ต้องใช้ในการทำให้กรดอิสระเป็นกลางในน้ำมัน 1 กรัม

ค่าความเป็นกรด เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณความเป็นกรดอิสระที่มีในน้ำมัน มีวิธีการหา ดังนี้ ซึ่งน้ำมันให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน ละลายในตัวกลางแล้วไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 N (0.1 N KOH) โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ จากนั้นคำนวณหาค่าความเป็นกรดโดยใช้สูตร

$$\text{ค่าความเป็นกรด} = \frac{56.1 \times \text{ความเข้มข้นของ KOH} \times \text{มิลลิลิตรของ KOH ที่ใช้}}{\text{น้ำหนักเป็นกรัมของน้ำมันที่ใช้}}$$

\*สำหรับรายละเอียดดูได้จาก ASTM D 1639 [31]

2) **ค่าสะพอนิฟิเคชัน (Saponification value)** นิยามไว้ว่า เป็นจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ต้องใช้ในการสะพอนิฟายเอสเทอร์และสารอื่น ๆ ที่สามารถเกิดสะพอนิฟิเคชันได้ในน้ำมันหนัก 1 กรัม

การหาค่าสะพอนิฟิเคชัน มีวิธีดังนี้ ซึ่งน้ำมัน เติมสารละลายแอลกอฮอล์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Alcoholic potassium hydroxide) จากนั้นนำไปกลั่นแบบไหลกลับ (Reflux) จนปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ แล้วนำไปไทเทรตกับสารละลายกรดเกลือมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 0.5 N (0.5 N HCl) โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ พร้อมทำการทดสอบแบลงค์ (Blank titration) ด้วย ซึ่งค่าสะพอนิฟิเคชันสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{ค่าสะพอนิฟิเคชัน} = \frac{(B - V) N \times 56.1}{S}$$

โดยที่ B คือ จำนวนมิลลิลิตรของสารละลาย HCl ที่ใช้ในการไทเทรตสารละลายแบลงค์

V คือ จำนวนมิลลิลิตรของสารละลาย HCl ที่ใช้ในการไทเทรตน้ำมัน

N คือ ความเข้มข้นของ HCl

S คือ น้ำหนักเป็นกรัมของน้ำมัน

\*สำหรับรายละเอียดดูได้จาก ASTM D 1962 [32]

3) **สารที่สะพอนิฟายไม่ได้ (Unsaponifiable matter)** เป็นสารที่ละลายได้ในน้ำมัน แต่จะไม่เกิดเป็นสบู่เมื่อทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารเหล่านี้ละลายในตัวทำละลายน้ำมัน เช่น ปีโตรเลียมอีเทอร์ และไดเอทิลอีเทอร์ เป็นต้น

การหาค่าสารที่สะพอนิฟายไม่ได้ ทำได้โดยนำน้ำมันส่วนที่เหลือจากการทำสะพอนิฟิเคชัน มาสกัดด้วยตัวทำละลายไขมัน เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของสารที่สะพอนิฟายไม่ได้ที่มีอยู่ในน้ำมัน

**4) ค่าไฮดรอกซิล (Hydroxyl value)** เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่มีอยู่ในน้ำมัน นิยามไว้ว่า เป็นจำนวนมิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่สมมูลกับปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่มีในน้ำมันหนัก 1 กรัม

น้ำมันส่วนใหญ่ไม่มีหมู่ไฮดรอกซิล ยกเว้นน้ำมันละหุ่งซึ่งจะพบหมู่ไฮดรอกซิลในส่วนของกรดไขมันที่อยู่ในโครงสร้างของน้ำมัน คือ กรดริซิโนเลอิก ถึง 90%

การหาค่าไฮดรอกซิลทำได้โดยนำน้ำมันมาทำปฏิกิริยากับสารละลายของแอนฮิไดรด์ แอนไฮไดรด์ไพริดีน (Pyridine solution of acetic anhydride) จากปฏิกิริยาแอนฮิไดรด์ที่มากเกินไปจะถูกไฮโดรไลซ์เกิดเป็นกรดแอนฮิไดรด์ ซึ่งสามารถหาปริมาณได้โดยการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

\*สำหรับรายละเอียดดูได้จาก ASTM D 1957 [33]

**5) ค่าไอโอดีน (Iodine value)** เป็นการวัดปริมาณความไม่อิ่มตัวที่มีในน้ำมัน นิยามไว้ว่าเป็นจำนวนเซนติกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดโดยน้ำมัน 1 กรัม เช่น น้ำมันชนิดหนึ่งมีค่าไอโอดีนเท่ากับ 140 หมายความว่า น้ำมัน 100 กรัม จะทำปฏิกิริยาพอดีกับไอโอดีน 140 กรัม

การหาค่าไอโอดีนทำได้โดยชั่งตัวอย่างน้ำมันให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน นำมาละลายในตัวทำละลายเฉื่อย เช่น คลอโรฟอร์ม และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ เป็นต้น แล้วเติมสารละลายที่มีหมู่ฮาโลเจนอิสระที่รู้ปริมาณที่แน่นอนลงไป เก็บไว้ในที่มืด 1 ชั่วโมง เติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) จะเกิดไอโอดีนออกมา นำมาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไทโอซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 0.1 N ( $0.1 \text{ N Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) โดยใช้น้ำแข็งเป็นอินดิเคเตอร์ ทำการทดสอบแบลนด์ และคำนวณค่าโดยใช้สูตร

$$\text{ค่าไอโอดีน} = \frac{(B - V) N \times 12.69}{S}$$

โดยที่ B คือ จำนวนมิลลิลิตรของสารละลาย  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่ใช้ในการไทเทรตสารละลายแบลนด์

V คือ จำนวนมิลลิลิตรของสารละลาย  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ที่ใช้ในการไทเทรตน้ำมัน

N คือ ความเข้มข้นของ  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

S คือ น้ำหนักเป็นกรัมของน้ำมัน

\*สำหรับรายละเอียดดูได้จาก ASTM D 1959

### 2.3.5 น้ำมันละหุ่ง (Castor oil)

น้ำมันละหุ่ง เป็นน้ำมันพืชที่สกัดได้จากเมล็ดละหุ่งของต้นละหุ่ง ซึ่งต้นละหุ่งมีถิ่นกำเนิดอยู่ในแอฟริกาตะวันออก โดยในปัจจุบันประเทศบราซิล อินเดีย และไทยถือเป็นผู้ส่งออกรายใหญ่ของโลก ต้นละหุ่งจัดเป็นไม้พุ่ม หรือไม้ยืนต้นขนาดเล็ก มีความสูงประมาณ 6 เมตร ต้นละหุ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ ต้นละหุ่งขาว และต้นละหุ่งแดง โดยต้นละหุ่งขาวจะมีลำต้นและก้านใบเป็นสีเขียว ส่วนต้นละหุ่งแดงจะมีลำต้นและก้านใบเป็นสีแดง บริเวณยอดอ่อนและช่อดอกเป็นสีนวลขาว วิธีสกัดเอาน้ำมันออกจากเมล็ดละหุ่งนั้น ต้องใช้วิธีบีบออก โดยไม่ผ่านความร้อน หรือใช้วิธีการ “บีบเย็น (Cold pressed)” เพื่อป้องกันไม่ให้โปรตีนที่เป็นพิษติดออกมาด้วย [34-35]

#### 2.3.5.1 ลักษณะภายนอกของเมล็ดละหุ่ง

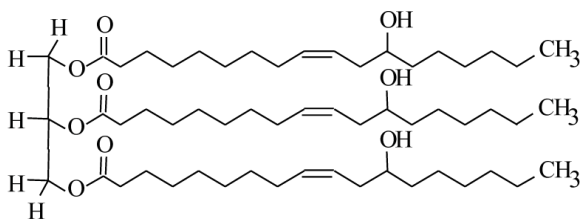
เมล็ดละหุ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงรี เปลือกของเมล็ดมีสีน้ำตาลแดงประขาว หรือมีจุดสีน้ำตาลปนเทาเป็นลายคล้ายตัวเห็บ (รูปที่ 2.11) เนื้อภายในเมล็ดมีสีขาว (มีโปรตีนที่มีพิษ) เป็นแหล่งสะสมของน้ำมัน น้ำมันที่ได้จากเมล็ดละหุ่งมีลักษณะเป็นของเหลวข้น เหนียวใส ไม่มีสี หรือมีสีเหลืองอ่อน และมีกลิ่นเล็กน้อย



รูปที่ 2.11 เมล็ดละหุ่ง

#### 2.3.5.2 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันละหุ่ง

ภายในเมล็ดละหุ่งประกอบด้วยน้ำมันระเหยยาก (Fixed oil) ประมาณ 45-55% ในรูปของไตรกลีเซอไรด์ โครงสร้างของน้ำมันละหุ่งแสดงดังรูปที่ 2.12 น้ำมันละหุ่งเมื่อทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยสมบูรณ์พบว่า มีองค์ประกอบสำคัญ คือ กรดริซิโนเลอิก (Ricinoleic acid) ประมาณ 85-95% ของกรดไขมันทั้งหมด ที่เหลือเป็นกรดลิโนเลอิก, กรดโอเลอิก และกรดสเตียริก เล็กน้อย [35] ดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของน้ำมันละหุ่งเมื่อมีกรดริซิโนเลอิกเป็นส่วนของกรดไขมัน

ตารางที่ 2.2 กรดไขมันที่สำคัญของน้ำมันละหุ่ง [36]

กรดไขมัน	ปริมาณ (%)
กรดริซิโนเลอิก (Ricinoleic acid)	85-95
กรดโอเลอิก (Oleic acid)	2-6
กรดลิโนเลอิก (Linoleic acid)	1-5
กรดแอลฟาไลโนเลนิก ( $\alpha$ -Linolenic acid)	0.5-1
กรดสเตียริก (Stearic acid)	0.5-1
กรดปาล์มิติก (Palmitic acid)	0.5-1
กรดไดไฮดรอกซีสเตียริก (Dihydroxystearic acid)	0.3-0.5
อื่น ๆ	0.2-0.5

### 2.3.5.3 โครงสร้างทางเคมีของกรดไขมันในน้ำมันละหุ่ง

- 1) กรดริซิโนเลอิก (Ricinoleic acid) ประกอบด้วยคาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะคู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 9 และ 10 และมีหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 12
- 2) กรดโอเลอิก (Oleic acid) เป็นกรดไขมันที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติในไขมันสัตว์ ไขมันพืช และน้ำมัน มีพันธะคู่ 1 ตำแหน่ง จัดเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว
- 3) กรดลิโนเลอิก (Linoleic acid) มีพันธะคู่ 2 ตำแหน่ง จัดเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว
- 4) กรดแอลฟาไลโนเลนิก ( $\alpha$ -Linolenic acid) มีพันธะคู่ 3 ตำแหน่ง จัดเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว
- 5) กรดสเตียริก (Stearic acid) ประกอบด้วยคาร์บอน 18 อะตอม ไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้าง จัดเป็นกรดไขมันอิ่มตัว
- 6) กรดปาล์มิติก (Palmitic acid) หรือ Hexadecanoic acid ประกอบด้วยคาร์บอน 16 อะตอม ไม่มีพันธะคู่ในโครงสร้าง จัดเป็นกรดไขมันอิ่มตัว

7) กรดไดไฮดรอกซีสเตียริก (Dihydroxystearic acid) เป็นกรดไขมันที่ได้จากกรดสเตียริก โดยการแทนที่ไฮโดรเจนอะตอมด้วยหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 9 และ 10

#### 2.3.5.4 สมบัติของน้ำมันละหุ่ง

สมบัติทางเคมีและทางกายภาพบางประการของน้ำมันละหุ่งแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของน้ำมันละหุ่ง [36-37]

สูตรโมเลกุล	$C_{57}H_{104}O_9$
น้ำหนักโมเลกุล	928.5 g/mol
ความหนาแน่น	0.945-0.965 g/cm <sup>3</sup> ที่ 25°C
จุดหลอมเหลว	5.0 °C
จุดวาบไฟ	229.4 °C
จุดเดือด	313.0 °C
จุดเยือกแข็ง	-10.0 ถึง -18.0 °C
ดัชนีหักเห	1.473-1.477
ความถ่วงจำเพาะ	0.958-0.969
ความหนืด	935-1,033 เซนติพอยส์ ที่ 20°C
ค่าไอโอดีน	84-88
ค่าสะพอนิฟิเคชัน	176-178
ความสามารถในการละลายได้ในน้ำ	< 0.1 g/100 mL ที่ 20°C
ความสามารถในการละลาย	ละลายได้ในเอทานอล, เบนซีน, คลอโรฟอร์ม และคาร์บอนไดซัลไฟด์
การเก็บรักษา	เก็บที่อุณหภูมิห้อง

#### 2.3.5.5 การจำแนกประเภทน้ำมันละหุ่ง

การจำแนกเกรดของน้ำมันละหุ่ง มี 2 วิธี ได้แก่ จำแนกตามสมบัติของน้ำมัน และจำแนกตามวิธีการสกัดน้ำมัน

การจำแนกประเภทน้ำมันละหุ่งตามสมบัติของน้ำมัน แบ่งออกเป็น 5 เกรด ดังนี้

1) เกรดยา ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยา เช่น ยาระบาย และยารักษาโรคอื่น ๆ เป็นต้น

- 2) เกรด Extra pale ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเครื่องสำอางค์และครีมใส่ผม
  - 3) เกรด Pale press ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตจารบี คริมขัดเงา ยาขัดรองเท้า รวมถึงใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสีและหมึกพิมพ์
  - 4) เกรด No.1 ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตหนังเทียม น้ำยาเคลือบผิว และสิ่งทอ
  - 5) เกรดการค้า ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตกาว ยางแท่ง และพลาสติก
- การจำแนกประเภทน้ำมันละหุ่งตามวิธีสกัด แบ่งออกเป็น 3 เกรด ดังนี้
- 1) น้ำมันเกรด 1 เป็นน้ำมันที่ได้จากการสกัดโดยวิธีการสกัดเย็น (Cold press) ซึ่งเป็นการบีบอัดโดยใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 90-100°F ได้ปริมาณน้ำมัน 25-35% น้ำมันที่สกัดได้มีลักษณะใส ไม่มีสี มีค่าความเป็นกรดน้อย และเป็นน้ำมันที่มีความบริสุทธิ์ จึงเหมาะแก่การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยา
  - 2) น้ำมันเกรด 2 เป็นน้ำมันที่ได้จากการบีบอัดที่อุณหภูมิสูงขึ้น ได้น้ำมันที่มีสีเข้มขึ้น ถ้าเป็นการสกัดโดยนำกากที่เหลือ (Press cake) จากที่สกัดน้ำมันเกรด 1 จะได้น้ำมันเพียง 10-20% น้ำมันที่สกัดได้นำไปผ่านไอน้ำ เพื่อให้เอนไซม์รวมกับสิ่งสกปรกต่าง ๆ แล้วตกตะกอน แต่ถ้าทำการสกัดเป็นครั้งแรกจะสามารถสกัดน้ำมันออกมาได้ประมาณ 90% น้ำมันที่สกัดได้จัดเป็นประเภทน้ำมันดิบเกรดการค้า (Commercial crude oil) มีชื่อเรียกว่า Firsts
  - 3) น้ำมันเกรด 3 เป็นการนำกากที่เหลือจากการสกัดน้ำมันเกรด 2 มาสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) ตัวทำละลายที่ใช้ ได้แก่ คาร์บอนไดซัลไฟด์ และอีเทอร์ น้ำมันที่ได้สามารถนำไปผ่านกรรมวิธีต่าง ๆ เพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป

### 2.3.5.6 การแปรรูปน้ำมันละหุ่ง

การแปรรูปน้ำมันละหุ่งสามารถทำได้โดยผ่านกรรมวิธีต่าง ๆ ดังนี้

- 1) Hydrogenated castor oil เป็นน้ำมันที่ได้จากการนำไฮโดรเจนไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของน้ำมัน สำหรับในกรณีของกรดริซินอเลอิก การแทนที่ดังกล่าวจะส่งผลให้น้ำมันเกิดการแข็งตัวเป็นไข เนื่องจากทำให้มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น
- 2) Dehydrated castor oil เป็นน้ำมันที่ถูกดึงโมเลกุลน้ำ หรือระเหยน้ำออกไป โดยการแยกเอาไฮโดรเจนและหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนที่อยู่ใกล้เคียงกันออกไป ในทางทฤษฎีทำให้เกิดเป็น Unsaturated glyceride มากกว่าเดิม น้ำมันที่ได้มีลักษณะเป็นน้ำมันหอมระเหย (Drying property) เหมาะแก่การนำไปใช้ผลิตน้ำยาซักแห้ง นอกจากนี้ยังเป็นน้ำมันที่มีความหนืดต่ำ สามารถนำไปทำน้ำมันเบรก น้ำมันหล่อลื่น ในระบบกันสะเทือนของรถยนต์ได้
- 3) Sulfonated castor oil เป็นน้ำมันที่ถูกเพิ่มซัลเฟอร์ลงไป โดยผ่านกระบวนการ Sulfonation ซึ่งกระบวนการดังกล่าวทำได้โดยการเติมซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (Sulfur trioxide), กรดกำมะถัน (Sulfuric acid) หรือ Chlorosulfonic acid ที่อุณหภูมิ 25-30°C น้ำมันที่ได้จากกรรมวิธีนี้

เรียกว่า Turkey red oil ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสีย้อมคุณภาพสูง สำหรับย้อม เส้นใยและเครื่องหนัง

4) Saponified castor oil เป็นน้ำมันที่ได้จากการทำไขมันให้ร้อน แล้วผสมกับด่าง เช่น Caustic soda ได้เกลือของกรดไขมันของสบู่ แล้วแยกเอากลีเซอไรด์ออกไป โดยทั่วไปแล้ว สบู่ คือ เกลือโซเดียมหรือเกลือโพแทสเซียมของกรดไขมัน มีสมบัติละลายน้ำได้และเกิดฟอง

5) Oxidized castor oil เป็นน้ำมันที่ได้จากการพ่นน้ำมันในอากาศหรือออกซิเจนที่อุณหภูมิ 80-130°C ซึ่งน้ำมันที่ได้เหมาะแก่การนำไปใช้ทำแลกเกอร์ ฝ้าน้ำมัน และหนังเทียม

6) Alkali fusion น้ำมันที่ได้จากส่วนนี้เหมาะแก่การนำไปทำพลาสติกและไนลอน [38]

### 2.3.5.7 ประโยชน์ของน้ำมันละหุ่ง

เนื่องจากน้ำมันละหุ่งมีสมบัติเฉพาะตัว จึงไม่สามารถนำมาใช้แทนน้ำมันพืชชนิดอื่นได้ โดยทั่วไปนิยมนำน้ำมันละหุ่งมาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเรซิน น้ำมันชักเงา น้ำมันหล่อลื่น น้ำมันผสมสี หมึกพิมพ์ สีทาบ้าน รวมถึงใช้ในอุตสาหกรรมผลิตอาหารสัตว์ นอกจากนี้ น้ำมันละหุ่งที่ผ่านกรรมวิธีทำให้บริสุทธิ์ สามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยาโรค และเครื่องสำอางค์ชนิดต่าง ๆ [36]

## 2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา

### 2.4.1 หน้าที่และหลักการทำงาน

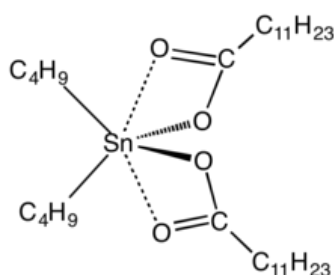
ตัวเร่งปฏิกิริยา คือสารที่เติมลงไปในปฏิกิริยา เพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะไปช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาให้ต่ำลง ทำให้โมเลกุลที่มีพลังงานสูงหรือเท่ากับพลังงานก่อกัมมันต์มีจำนวนมากขึ้น จึงส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น แต่ไม่ทำให้พลังงานของปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาหรือไม่ก็ได้ แต่เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาตัวเร่งที่เติมลงไปต้องมีปริมาณเท่าเดิมและมีสมบัติเหมือนเดิม ซึ่งในการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีข้อควรระวัง คือ ไม่ควรใช้ในปริมาณที่มากเกินไป เนื่องจากหากใช้ในปริมาณที่มากเกินไป ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจกลายเป็นสารตั้งต้นสารหนึ่งที่ทำปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไปได้ [39]

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมนำมาใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน ได้แก่ ไดบิวทิลทิน ไดออกตะโนเอต (Dibutyltin dioctanoate), ไดบิวทิลทินไดลอเรต (Dibutyltin dilaurate) หรือ สแตนนัสออกตะโนเอต (Stannous octanoate) ที่ความเข้มข้น 0.1-1.0% [40] ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ไดบิวทิลทินไดลอเรต (DBTDL)

## 2.4.2 ไตบิวทิลทินไดลอเรต (DBTDL)

### 2.4.2.1 โครงสร้างและสมบัติ

ไตบิวทิลทินไดลอเรต คือตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทสารประกอบออร์กาโนทินมีลักษณะเป็นของเหลวคล้ายน้ำมัน ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลแสดงดังรูปที่ 2.13 และสมบัติทางเคมีและทางกายภาพบางประการแสดงดังตารางที่ 2.4 สมบัติเด่นของไตบิวทิลทินไดลอเรต คือ ช่วยเร่งระยะเวลาการเกิดเจล และการแห้งตัวที่ผิวให้เร็วขึ้น อีกทั้งยังมีส่วนช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานให้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 2.13 โครงสร้างโมเลกุลของไตบิวทิลทินไดลอเรต

### ตารางที่ 2.4 สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไตบิวทิลทินไดลอเรต [41]

สูตรโมเลกุล	$C_{32}H_{64}O_4Sn$
น้ำหนักโมเลกุล	631.56 g/mol
ความหนาแน่น	1.066 g/mL
จุดหลอมเหลว	22 to 24 °C (72 to 75 °F; 295 to 297 K)

## 2.5 การปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์ (Surface modification of polymer)

การปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์ เป็นวิธีที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น หรือเพื่อให้พอลิเมอร์แสดงสมบัติบางประการเพิ่มขึ้น เช่น ความชอบน้ำ, ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ หรือ ความสามารถในการดูดซับและตรวจจับสนาม เป็นต้น

โดยทั่วไปในภาคอุตสาหกรรม มีวิธีที่ใช้สำหรับปรับปรุงพื้นผิวของพอลิเมอร์หลายวิธี ได้แก่

- 1) การขัดผิว (Roughening) เช่น การกัด (Etching) หรือการพ่นทราย (Sand blast) เป็นต้น
- 2) ออกซิเดชัน (Oxidation) เช่น การปรับปรุงพื้นผิวด้วยอัลคาไลน์ (Alkaline treatment), โครเมียม (Chromium treatment) หรือพลาสมา (Plasma treatment) เป็นต้น
- 3) การเคลือบผิว (Coating) เช่น การหล่อขึ้นรูป (Casting) หรือ การขึ้นรูปวัสดุเป็นชั้น ๆ (Lamination) เป็นต้น
- 4) การผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Blending) เช่น การเติมสารลดแรงตึงผิว เป็นต้น

- 5) การฝังไอออนที่ผิววัสดุ (Ion implantation) เช่น การยิงพื้นผิวด้วยไอออนของธาตุอาร์กอนหรือไนโตรเจนที่มีพลังงานสูง เป็นต้น
- 6) การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบต่อกิ่ง (Graft polymerization) [42]

### 2.5.1 การปรับปรุงพื้นผิวของพอลิยูรีเทน

มีงานวิจัยมากมายที่ทำการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิยูรีเทน ตัวอย่างการปรับปรุงพื้นผิวของพอลิยูรีเทน เช่น

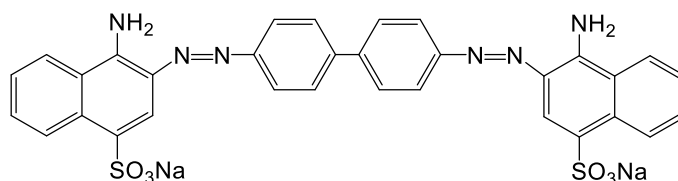
การปรับปรุงพอลิยูรีเทนโดยการผสมพอลิยูรีเทนกับโซเดียมอัลจิเนตให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Polyurethane–alginate blend) จากนั้นทำการเชื่อมโยงแบบ core-shell กับไคโตซาน เพื่อให้พอลิเมอร์ที่ได้มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับร่างกายมนุษย์ และเพื่อให้มีความว่องไวต่อค่าพีเอช เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานขนส่งยาภายในร่างกาย [43]

การปรับปรุงพอลิยูรีเทนโดยการต่อกิ่งฟีนอลฟทาเลินกับหมู่ที่แสดงความแข็ง (Rigid side group) บนสายโซ่พอลิยูรีเทน (Phenolphthalein-grafted PU) เพื่อลดแรงดึงดูดระหว่างพอลิยูรีเทน และเป็นการปรับปรุงสมบัติความยืดหยุ่นของพอลิยูรีเทนภายใต้อุณหภูมิต่ำ และมีการคืนรูป (Shape recovery) ที่ดี เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุกันฉนวนต่าง ๆ [44]

การปรับปรุงพอลิยูรีเทนโดยการผสมเบต้าไซโคลเดกซ์ทรินลงในพรีพอลิเมอร์พอลิยูรีเทน โดยเบต้าไซโคลเดกซ์ทรินจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาที่เหลืออยู่ในพรีพอลิเมอร์พอลิยูรีเทน แล้วนำไปประยุกต์ใช้งานด้านการแพทย์ เช่น ใช้เบต้าไซโคลเดกซ์ทรินคอมเพล็กซ์กับยา Ciprofloxacin ซึ่งเป็นยาปฏิชีวนะที่ช่วยป้องกันการติดเชื้อแบคทีเรีย เพื่อนำไปใช้เคลือบยาชนิดอื่นให้มีสมบัติต้านทานเชื้อแบคทีเรียมากขึ้น [45] หรือใช้เบต้าไซโคลเดกซ์ทรินคอมเพล็กซ์กับสีย้อม เพื่อปรับปรุงความสามารถในการย้อมติดสี (Dyeability) ของพอลิยูรีเทนให้ดีขึ้น [46]

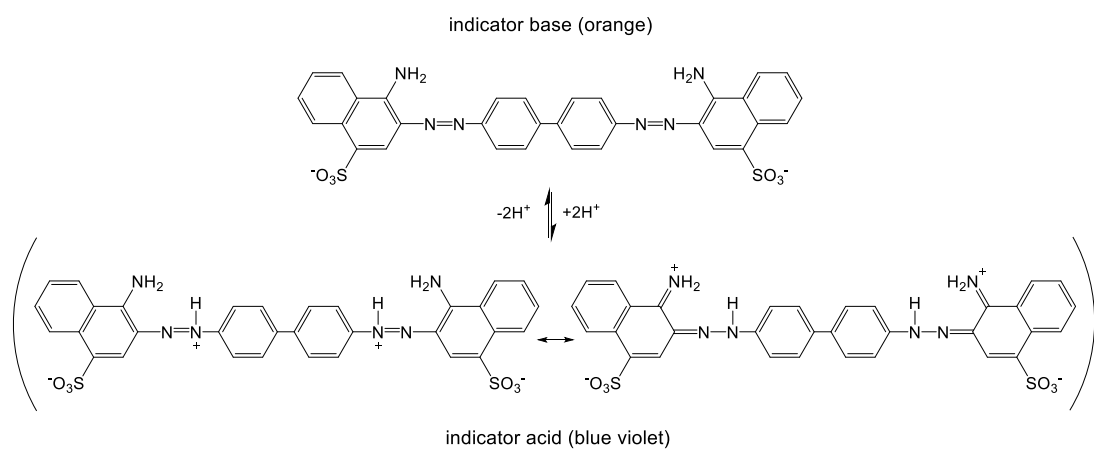
## 2.6 คองโกเรด (Congo red)

คองโกเรด คือสีย้อมที่มีลักษณะเป็นผงสีแดง จัดเป็นสีย้อมประเภทสีอะโซหรือ ไดอะโซ (Diazo dyes) ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์เกลือโซเดียมของ benzidinediazo-bis-1-naphthylamine-4-sulfonic acid มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.14 และมีสูตรทางเคมี คือ  $C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของคองโกเรด

หากจำแนกสีตามลักษณะการนำไปใช้ คอโรเกรตจัดอยู่ในกลุ่มสีไดเรกต์ (Direct dyes) มีสมบัติในการละลายน้ำ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส ใช้เป็นตัวบ่งชี้ความเป็นกรด-เบส (pH indicator) ที่ค่าพีเอชระหว่าง 3.0-5.2 [47] ซึ่งโครงสร้างของสารละลายคอโรเกรตที่มีความเป็นกรด-เบสต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 นอกจากนี้คอโรเกรตยังจัดเป็นสีย้อมที่มีความจำเพาะต่อไอออนที่มีประจุบวก เนื่องจากคอโรเกรตมีหมู่ฟังก์ชันเป็นเกลือของกรดซัลโฟนิก ( $-\text{SO}_3^-\text{Na}^+$ ) อยู่ในโครงสร้าง ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกได้ จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงเมื่อเกิดอันตรกิริยากับไอออนประจุบวก ดังนั้นคอโรเกรตจึงเหมาะแก่การนำมาประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์ตัวตรวจจับทางเคมีหรือหัววัด (Probe) [10,48]



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของคอโรเกรตที่สมดุลกรด-เบส [49]

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Elodie Hablot และคณะ [4] ได้ทดสอบและเปรียบเทียบชนิดของไดไอโซไซยาเนตที่ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งเป็นสารตั้งต้น โดยไดไอโซไซยาเนตที่นำมาสังเคราะห์พอลิยูรีเทนในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ โทลูอิน ไดไอโซไซยาเนต (TDI), ไอโซฟอโรนไดไอโซไซยาเนต (IPDI) และเฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (HDI) และใช้ไดบิวทิลทินไดลอร์เรตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่า TDI มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า IPDI และ HDI เนื่องจากมีหมู่อะโรมาติกซึ่งจัดเป็นหมู่ให้อิเล็กตรอน ในทางตรงกันข้ามหากเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจะพบว่าสารจำพวกอะลิฟาติกไดไอโซไซยาเนต (IPDI และ HDI) ให้ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า และเมื่อทดสอบสมบัติด้านความร้อนพบว่าพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์จากไดไอโซไซยาเนตทั้ง 3 ชนิด มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีเท่าเทียมกัน

M.A. Alaa และคณะ [5] ได้สังเคราะห์และเปรียบเทียบสมบัติของพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของพอลิพรอพิลีนไกลคอลกับพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของพอลิพรอพิลีนไกลคอลร่วมกับน้ำมัน

ละหู่ ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหู่ร่วมด้วยมีเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่าพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของพอลิพรอพิลีนไกลคอลเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้มีสมบัติด้านความแข็งแรงดั่งที่ใกล้เคียงกัน

**Nguyen Dang Luong และคณะ** [6] ได้สังเคราะห์เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติม โดยใช้ น้ำมันละหู่, พอลิเตตระไฮโดรฟูแรน (PTH) และ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (PDMS) เป็นส่วนของพอลิออล ซึ่งจากงานวิจัยนี้พบว่าพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์ขึ้นมานั้นมีสมบัติเชิงกลและความยืดหยุ่นที่แปรผันตามปริมาณน้ำมันละหู่และสัดส่วนของ PDMS/PTH นอกจากนี้พอลิเมอร์ดังกล่าวยังมีความโปร่งใสสูงและมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพดี

**Stefan Oprea และ Violeta Otilia Potolinca** [49] ได้สังเคราะห์ฟิล์มพอลิยูรีเทนโดยใช้พอลิเตตระเมทิลีนไกลคอล (PTMG 1400) และ HDI เป็นสารตั้งต้น จากนั้นใช้น้ำมันละหู่และเบต้าไซโคลเดกซ์ทริน ( $\beta$ -Cyclodextrin) เป็นสารขยายสายโซ่ (Chain extender) ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าเบต้าไซโคลเดกซ์ทรินช่วยปรับปรุงสมบัติความชอบน้ำของพอลิยูรีเทนให้ดีขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม น้ำมันละหู่ทำให้สมบัติความชอบน้ำของพอลิยูรีเทนลดลง

**Susheela Bai และคณะ** [50] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของโครงข่ายพอลิเมอร์พอลิยูรีเทนและพอลิสไตรีนที่มีน้ำมันละหู่เป็นสารตั้งต้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่าน้ำมันละหู่มีโครงสร้างไตรไฮดรอกซิลที่สามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงเป็นพอลิยูรีเทนได้เมื่อผสมร่วมกับเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต โดยใช้ไดบิวทิลทินไดลอเรตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้เครื่องปั่นความเร็วสูงเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 9°C อีกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

**Thangavel Gurunathan และคณะ** [51] ได้ศึกษาโครงสร้างของพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันละหู่และไอโซพอร์นไดไอโซไซยาเนต (IPDI) เมื่อมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนหมู่ไอโซไซยาเนตต่อหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าเมื่อใช้น้ำมันธรรมชาติเป็นสารตั้งต้นและเพิ่มอัตราส่วน  $-NCO/-OH$  ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนบนโครงสร้างพอลิยูรีเทนมากขึ้น และส่งผลให้โครงสร้างพอลิยูรีเทนมีการเชื่อมโยงที่สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย เช่น งานเคลือบผิว, งานก่อสร้าง และใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น

**A.D. Macalino และคณะ** [52] ได้สังเคราะห์ฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีน้ำมันละหู่และ HDI เป็นสารตั้งต้น แล้วศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนสัดส่วนโดยน้ำหนักของน้ำมันละหู่และ HDI ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าความแข็ง (Hardness) และมอดุลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) ของฟิล์มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณ HDI ที่ใส่เข้าไป ในขณะที่สมบัติการดึงยืด (Tensile elongation) แปรผกผันกับปริมาณของ HDI

**Ting Wan และคณะ** [46] ได้เตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยเบต้าไซโคลเดกซ์ทรินและใช้ดูดซับสารละลายสีย้อม ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เตรียมฟิล์มโดยการผสมเบต้าไซโคลเดกซ์ทรินและสารละลายสีย้อม (Disperse Orange 31) ลงในสารละลายพอลิยูรีเทนที่มีความเข้มข้น 15

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วเทสารผสมลงบนแผ่นกระจกแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เมื่อตัวทำละลายระเหยออกจนหมดให้ทำการล้างฟิล์มแล้วนำไปอบอีกรอบหนึ่ง จากนั้นนำฟิล์มที่ได้มาทดสอบสมบัติทางกายภาพและเชิงกล ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่า ฟิล์มที่ได้มีความคงทนของสีย้อม (Dye fastness) อีกทั้งยังมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเชื่อมโยงของพันธะไฮโดรเจนระหว่างเบต้าไซโคลเดกซ์ทรินและพอลิยูรีเทน

**Taek Seung Lee และ Changduk Yang [10]** ได้สังเคราะห์พอลิเอไมด์ชนิดพอลิแอนไอออน โดยใช้คองโกเรดเป็นสารตั้งต้น และศึกษาสมบัติการตรวจจับไอออนโลหะที่มีน้ำเป็นตัวกลาง ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นมานั้นมีความว่องไวทางแสงต่อไอออนโลหะ โดยค่าการดูดกลืนแสงของพอลิเมอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดอันตรกิริยากับไอออนโลหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโลหะแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และเหล็ก ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ซึ่งมีค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงและเกิดการเลื่อนของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงไปยังความยาวคลื่นที่สูงขึ้น ( $\lambda_{\text{max}}$  shifts) เมื่อสารละลายโลหะมีความเข้มข้นสูงขึ้น

**I.S. Yahia และ Sherif Keshk [53]** ได้สังเคราะห์ฟิล์มคอมโพสิตระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และคองโกเรดที่ความเข้มข้นคองโกเรดต่างกัน แล้วศึกษาสมบัติทางแสง (Optical properties) ของฟิล์มที่สังเคราะห์ขึ้นมา ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าเมื่อความเข้มข้นของคองโกเรดสูงขึ้นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับหมู่อะมิโนและหมู่ซัลโฟเนตของคองโกเรดจะสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าการส่องผ่านของแสง (Transmittance) ของฟิล์มคอมโพสิตมีค่าลดลง ซึ่งจากผลดังกล่าวบ่งบอกว่าฟิล์มที่มีความเข้มข้นของคองโกเรดสูงเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์กรองแสงเลเซอร์

**Yulia Galagan และคณะ [3]** ได้ศึกษาพฤติกรรมและการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของเมทิลีนบลูที่อยู่ในฟิล์มพอลิอะครีเลต ซึ่งจากการศึกษาพบว่าสีของฟิล์มที่ได้จะเริ่มเปลี่ยนจากสีไม่มีสีเป็นสีน้ำเงินผ่านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันภายใต้บรรยากาศออกซิเจน โดยสีที่เกิดขึ้นบนฟิล์มจะเข้มมากขึ้นทีละน้อยเมื่อฟิล์มสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศนานขึ้น จึงส่งผลให้เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ที่มีเรื่องของเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งมีการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนจากน้ำมันธรรมชาติแทนการใช้ปิโตรเลียม การศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวพอลิเอไมด์โดยใช้สีย้อมคองโกเรดเพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจจับไอออนโลหะ หรือไอออนที่มีประจุบวก และการศึกษาพฤติกรรมและการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของเมทิลีนบลู ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการเตรียมตัวตรวจจับออกซิเจนชนิดใหม่ โดยใช้เมทิลีนบลูเป็นอินดิเคเตอร์ในการตรวจจับออกซิเจน ใช้ฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งและต่อกิ่งด้วยคองโกเรดเป็นวัสดุรองรับ แล้วศึกษาการเกิดออกซิเดชันของฟิล์มผ่านการวัดสมบัติทางแสงและทางสี เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานตรวจจับออกซิเจน

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

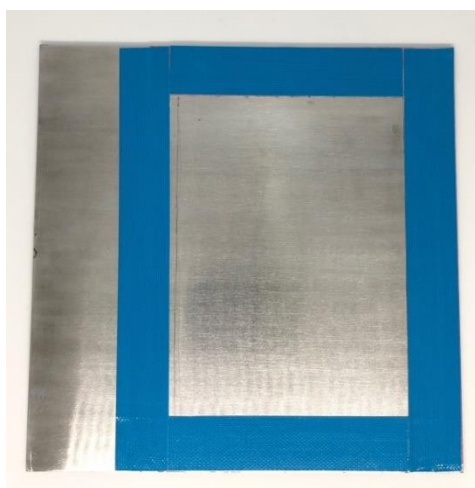
#### 3.1 สารเคมี

1. เฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (Hexamethylene diisocyanate, HDI, NCO% =  $16.5 \pm 0.3$ , Mw = 255 g/mol of NCO group) เกรดการค้า บริษัท Bayer Material Science
2. น้ำมันละหุ่ง (Castor oil, CO) เกรดการค้า บริษัท รวมเคมี 1986 จำกัด
3. ไดบิวทิลทินไดลอเรต (Dibutyltin dilaurate, DBTDL) เกรดการค้า บริษัท DOW SOUTHERN AFRICA (PTY)
4. คองโกเรด (Congo red, CR) เกรดอินดิเคเตอร์ บริษัท Acros Organics
5. เมทิลีนบลู (Methylene Blue) เกรดวิเคราะห์ บริษัท LOBA CHEMIE PVT จำกัด
6. กลูโคสโมโนไฮเดรต (Glucose monohydrate) เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA Reagent
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Laboratory Reagents & Fine Chemicals
8. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric, HCl) 37% เกรดวิเคราะห์ บริษัท CARLO ERBA Reagent
9. น้ำกลั่น
10. ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas)

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว
2. ซ้อนตักสาร
3. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด รุ่น AX224 บริษัท Sartorius จำกัด
4. เครื่องปั่นกวนแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน รุ่น HS-7 บริษัท IKA จำกัด
5. แท่งแม่เหล็กคนสาร
6. ตู้อบ บริษัท Memmert จำกัด รุ่น UN55
7. โต๊ะปรับระดับ
8. กรอบสกรีน (แม่พิมพ์โลหะชุบโครเมียม) ขนาด  $10 \times 15 \text{ cm}^2$  (รูปที่ 3.1)
9. เทปกาว
10. รางปาด
11. โถดูดความชื้น (Desiccator)

12. ไมโครมิเตอร์ บริษัท Mitutoyo Europe GmbH รุ่น PK-0505SUE
13. เครื่อง Fourier transform infrared spectrophotometer (FTIR) บริษัท SHIMADZU รุ่น IRTracer-100
14. เครื่องทดสอบมุมสัมผัส รุ่น Contact Angle System OCA, Dataphysics Co., Ltd.
15. เครื่อง UV-Vis spectrophotometer รุ่น T92+ บริษัท PG Instruments จำกัด
16. เครื่องวัดสี (Colorimeter) รุ่น MiniScan XE Plus บริษัท Hunter Associates Laboratory, Inc.



รูปที่ 3.1 กรอบสกรีน

### 3.3 การเตรียมสารละลาย

#### 3.3.1 สารละลายคองโกเรด 1% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (%w/v)

- 1.) ชั่งคองโกเรด 1 กรัม ใส่ลงในปิกเกอร์ จากนั้นละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
- 2.) ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัดปริมาตร

#### 3.3.2 สารละลายเมทิลีนบลู 5000 ppm

- 1.) ชั่งเมทิลีนบลู 0.5 กรัม ใส่ลงในปิกเกอร์ จากนั้นละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
- 2.) ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัดปริมาตร

### 3.3.3 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M

- 1.) ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.4 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ จากนั้นละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
- 2.) ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัดปริมาตร

### 3.3.4 สารละลายไฮโดรคลอริก 1 M

- 1.) บีเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 12 M 8 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
- 2.) ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดวัดปริมาตร

## 3.4 การเตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทน

- 1.) ชั่งเฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต และน้ำมันละหุ่ง ตามสัดส่วนดังตารางที่ 3.1 ใส่ลงในบีกเกอร์
- 2.) หยดไดบิวทิลทินไดลอเรต 0.1%w/w แล้วทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน
- 3.) เตรียมกรอบสกรีน โดยวางบนขาตั้งปรับระดับ
- 4.) นำสารละลายที่เตรียมไว้มาขึ้นรูปฟิล์มบนกรอบสกรีน โดยใช้รางปาด ปาดฟิล์มจำนวน 1 รอบ
- 5.) ตั้งฟิล์มทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อฟิล์มแห้งจะได้ความหนาของฟิล์มอยู่ที่  $100 \pm 25$  ไมโครเมตร

## 3.5 การเตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนแบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต

- 1.) ทำการทดลองเหมือนหัวข้อ 3.4 ข้อ 1.) – 4.) จากนั้นตั้งฟิล์มทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 2.) เทสารละลายคองโกเรต 1 %w/v ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงด้านบนของฟิล์ม แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นใช้หลอดหยดดูดสารละลายคองโกเรตออก
- 3.) ล้างคองโกเรตที่หลงเหลืออยู่ด้วยน้ำกลั่น แล้วซับให้แห้ง
- 4.) อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของฟิล์มพอลิยูรีเทนแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิวและแบบปรับปรุงพื้นผิวด้วย  
คองโกรีต

สูตรที่	ชื่อสูตร	สัดส่วนโดยโมล		ปรับปรุงพื้นผิวด้วย CR 1 %w/v
		HDI (-NCO)	CO (-OH)	
1	H1C1	1	1	-
2	H2C1	2		
3	H4C1	4		
4	H6C1	6		
5	H8C1	8		
6	H4C1R	4	1	✓
7	H6C1R	6		
8	H8C1R	8		

### 3.6 การตรวจวิเคราะห์

#### 3.6.1 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

นำฟิล์มไปทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR โหมด ATR ที่ช่วง 700-4,000  $\text{cm}^{-1}$  และมีค่า resolution เท่ากับ 4.0  $\text{cm}^{-1}$  เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์ม

#### 3.6.2 การวัดเฉดสีด้วยเครื่องวัดสี

นำชิ้นงานที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูในข้อ 3.5.6 มาวัดเฉดสีด้วยเครื่องวัดสีตามมาตรฐาน ASTM D-1925 โดยแสดงผลเป็นค่า  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  โดยการวัดเฉดสีตามมาตรฐาน ASTM D-1925 มีหลักการดังนี้

$L^*$  : บ่งบอกถึงค่าความสว่าง (lightness)

$L^* = 0$  = สีดำ

$L^* = 100$  = สีขาว

$a^*$  : บ่งบอกถึงเฉดสีของสีแดงหรือสีเขียว (Red-Green)

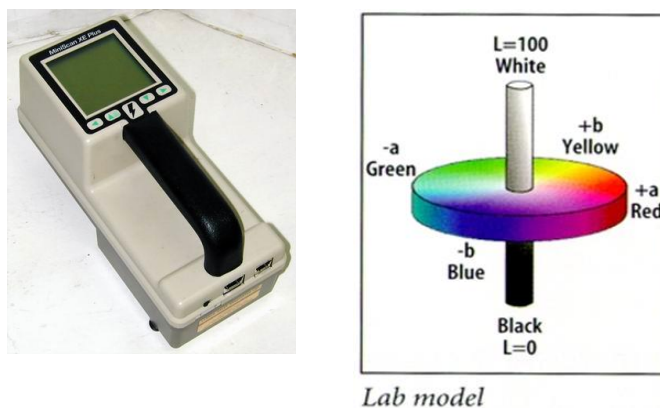
$a^*$  เป็น - ไปในทิศทางของสีเขียว

$a^*$  เป็น + ไปในทิศทางของสีแดง

$b^*$  : บ่งบอกถึงเฉดสีของสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน (Yellow-Blue)

$b^*$  เป็น - ไปในทิศทางของสีน้ำเงิน

$b^*$  เป็น + ไปในทิศทางของสีเหลือง



รูปที่ 3.2 (ก.) เครื่องวัดสี (Colorimeter) และ (ข.) แบบจำลอง Lab

### 3.6.3 การพิสูจน์องค์ประกอบบนฟิล์มพอลิยูรีเทนด้วยเทคนิค UV-Visible Spectrophotometry

ตัดฟิล์มพอลิยูรีเทนและฟิล์มพอลิยูรีเทนที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยองค์ประกอบที่มีความหนา  $100 \pm 25$  ไมโครเมตร เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $2 \times 4$  cm<sup>2</sup> จากนั้นนำฟิล์มที่ได้มาวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มในช่วงความยาวคลื่น 230-800 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

### 3.6.4 การทดสอบมุมสัมผัส (Initial Contact Angle)

นำแผ่นฟิล์มมาทำการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำกลั่นบนพื้นผิวชิ้นงาน โดยหยดน้ำกลั่นปริมาตร 2 ไมโครลิตร วัดมุมสัมผัสที่หยดน้ำกลั่นกระทำกับผิววัสดุด้วยเครื่อง Contact Angle System OCV ตามมาตรฐาน ASTM D 5946

### 3.6.5 การศึกษาพฤติกรรมดูดซับเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของฟิล์ม

#### 3.6.5.1 ศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมล -NCO/-OH และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

- 1.) ตัดฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีความหนา  $100 \pm 25$  ไมโครเมตร เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $2 \times 4$  cm<sup>2</sup>
- 2.) วัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มในช่วงความยาวคลื่น 230-800 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer และวัดเจตสีของฟิล์มด้วยเครื่องวัดสี (รายละเอียดดังข้อ 3.6.2)
- 3.) แช่ฟิล์มลงในสารละลายเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 5 มิลลิิตร ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 5, 15, 30, 60, 1440 นาที
- 4.) นำฟิล์มขึ้นมาล้างในน้ำกลั่น 3 ครั้ง ครั้งละ 1 นาที แล้วซับให้แห้ง
- 5.) วัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์ม แล้วคำนวณหาผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงจากสมการที่ 3.1

ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance difference) =  $A_{A1} - A_{B1}$  ...สมการที่ 3.1

เมื่อ  $A_{A1}$  = ค่าการดูดกลืนแสงหลังทดสอบ ณ ตำแหน่งความยาวคลื่นที่เมทิลีนบลูสามารถดูดกลืนแสงได้สูงสุด ( $\lambda_{max}$ )

$A_{B1}$  = ค่าการดูดกลืนแสงก่อนทดสอบ ณ ตำแหน่งความยาวคลื่นที่เมทิลีนบลูสามารถดูดกลืนแสงได้สูงสุด ( $\lambda_{max}$ )

6.) วัดเฉดสีของฟิล์มด้วยเครื่องวัดสี แล้วคำนวณหาผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), ผลต่างของเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) และผลต่างของเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) จากสมการที่ 3.2, 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ) =  $L^*_A - L^*_B$  ...สมการที่ 3.2

เมื่อ  $L^*_A$  = ค่าความสว่างของฟิล์มหลังการทดสอบ

$L^*_B$  = ค่าความสว่างของฟิล์มก่อนการทดสอบ

ผลต่างของเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) =  $a^*_A - a^*_B$  ...สมการที่ 3.3

เมื่อ  $a^*_A$  = ค่าเฉดสีเขียว-แดงของฟิล์มหลังการทดสอบ

$a^*_B$  = ค่าเฉดสีเขียว-แดงของฟิล์มก่อนการทดสอบ

ผลต่างของเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) =  $b^*_A - b^*_B$  ...สมการที่ 3.4

เมื่อ  $b^*_A$  = ค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลืองของฟิล์มหลังการทดสอบ

$b^*_B$  = ค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลืองของฟิล์มก่อนการทดสอบ

### 3.6.5.2 ศึกษาผลของสถานะของฟิล์มและสถานะของสารละลายเมทิลีนบลู

1.) เลือกฟิล์มพอลิยูรีเทนสูตรที่ให้ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดจากข้อ 3.6.5.1 มาศึกษาปัจจัยสถานะของฟิล์มและสถานะของสารละลายเมทิลีนบลู โดยตัดฟิล์มที่มีความหนา  $100 \pm 25$  ไมโครเมตร เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $2 \times 4$  cm<sup>2</sup>

2.) วัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มในช่วงความยาวคลื่น 230-800 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer และวัดเฉดสีของฟิล์มด้วยเครื่องวัดสี (รายละเอียดตั้งข้อ 3.6.2)

3.) ปรับสภาวะของฟิล์มเป็น 3 สภาวะ ดังนี้

- สภาวะกรด : แช่ฟิล์มในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 M ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วซับให้แห้ง
- สภาวะปกติ
- สภาวะเบส : แช่ฟิล์มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วซับให้แห้ง

4.) ปิเปตสารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้น 100 ppm ปริมาตร 7 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแก้วเล็ก (Vial)

5.) ปรับสภาวะของสารละลายเมทิลีนบลูเป็น 3 สภาวะ ดังนี้

- สภาวะกรด (pH = 3) : หยดสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 M ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ปิดฝาขวดแล้วเขย่าให้สารเข้ากัน
- สภาวะปกติ (pH = 5)
- สภาวะเบส (pH = 11) : หยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M ปริมาตร 500 ไมโครลิตร ปิดฝาขวดแล้วเขย่าให้สารเข้ากัน

6.) นำฟิล์มที่เตรียมไว้แช่ลงในสารละลายเมทิลีนบลู เป็นเวลา 30 นาที

7.) นำฟิล์มมาล้างในน้ำกลั่น 4 ครั้ง ครั้งละ 1 นาที แล้วซับให้แห้ง

8.) วัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์ม แล้วคำนวณหาผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงจากสมการที่ 3.1

9.) วัดเฉดสีของฟิล์มด้วยเครื่องวัดสี แล้วคำนวณหาผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), ผลต่างของเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) และ ผลต่างของเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) จากสมการที่ 3.2, 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

10.) ทำการทดลองซ้ำในข้อ 1.) – 9.) โดยเลือกสภาวะของฟิล์มและสภาวะของสารละลายเมทิลีนบลูที่ให้ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด แล้วปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูเป็น 10, 50, 500 และ 1000 ppm

### 3.6.6 การศึกษาความว่องไวต่อออกซิเจนของลูโคเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของฟิล์ม

1.) เลือกฟิล์มพอลิยูรีเทนสูตรที่ให้ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด มาศึกษาพฤติกรรมการเกิดสีของเมทิลีนบลู โดยตัดฟิล์มที่มีความหนา  $100 \pm 25$  ไมโครเมตร เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $2 \times 4 \text{ cm}^2$  จากนั้นปรับสภาวะของฟิล์มให้เหมาะสม

2.) วัดเฉดสีของฟิล์มด้วยเครื่องวัดสี (รายละเอียดตั้งข้อ 3.6.2)

3.) ปิเปตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M ปริมาตร 7 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแก้วเล็ก

4.) เติมน้ำกลูโคส 50 มิลลิกรัม ปิดฝาขวด จากนั้นเขย่าให้ของแข็งละลายจนหมด

5.) เติมสารละลายเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 1000 ppm ปริมาตร 50 ไมโครลิตร ปิดฝาขวดให้แน่น เขย่าให้สารละลายเข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้จนกระทั่งเมทิลีนบลูเปลี่ยนจากสีน้ำเงินมาอยู่ในรูปของลูโคเมทิลีนบลูซึ่งใสไม่มีสีดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะของสารละลายเมทิลีนบลูเมื่อเกิดปฏิกิริยารีดักชันและออกซิเดชัน

6.) นำฟิล์มที่เตรียมไว้ในข้อ 1 แผลงในลูโคเมทิลีนบลู ปิดฝาขวดให้แน่น แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที (\*ห้ามเขย่าขวดเพราะจะทำให้ออกซิเจนที่ลอยอยู่ด้านบนของขวดตกกลับลงไปอยู่ในส่วนของสารละลาย ซึ่งส่งผลให้ลูโคเมทิลีนบลูเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปเมทิลีนบลูและทำให้ผลการทดลองเกิดความคลาดเคลื่อนได้)

7.) นำฟิล์มมาล้างในน้ำกลั่น 3 ครั้ง ครั้งละ 1 นาที แล้วซับให้แห้ง

8.) ตั้งฟิล์มทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ให้สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ แล้ววัดเฉดสีของฟิล์มด้วยเครื่องวัดสีที่ 0, 30, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480 และ 1440 นาที แล้วคำนวณหาผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), ผลต่างของเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) และ ผลต่างของเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) จากสมการที่ 3.2, 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

9.) ทำการทดลองซ้ำในข้อ 1.) - 7.) โดยปรับเปลี่ยนปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลู เป็น 100 และ 150 ไมโครลิตร

## บทที่ 4

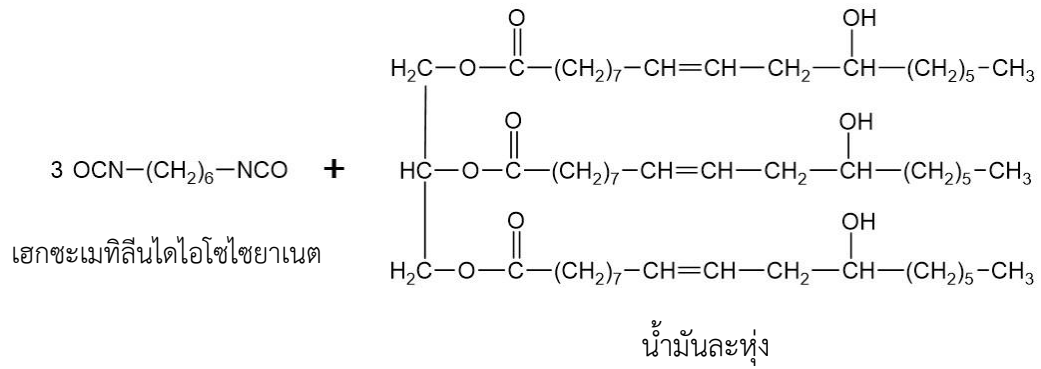
### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่ง โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของไอโซไซยาเนตต่อโมลของไฮดรอกซิล เป็น 1:1, 2:1, 4:1, 6:1 และ 8:1 แล้วปรับปรุงพื้นผิวของฟิล์มด้วยคองโกเรตความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นนำฟิล์มพอลิยูรีเทนที่เตรียมได้มาพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR โหมด ATR และพิสูจน์การเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟิล์มพอลิยูรีเทนกับคองโกเรตด้วยเทคนิค UV-Visible spectrophotometry และการวัดสีศึกษาสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ค่ามัมสัมผัส, เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ, เปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งคงเหลือ, สมบัติเชิงกล และการดูดซับเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของฟิล์มที่สภาวะต่างๆ จากนั้นศึกษาความว่องไวต่อออกซิเจนของเมทิลีนบลูที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวของฟิล์มพอลิยูรีเทน ผลการวิจัยแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

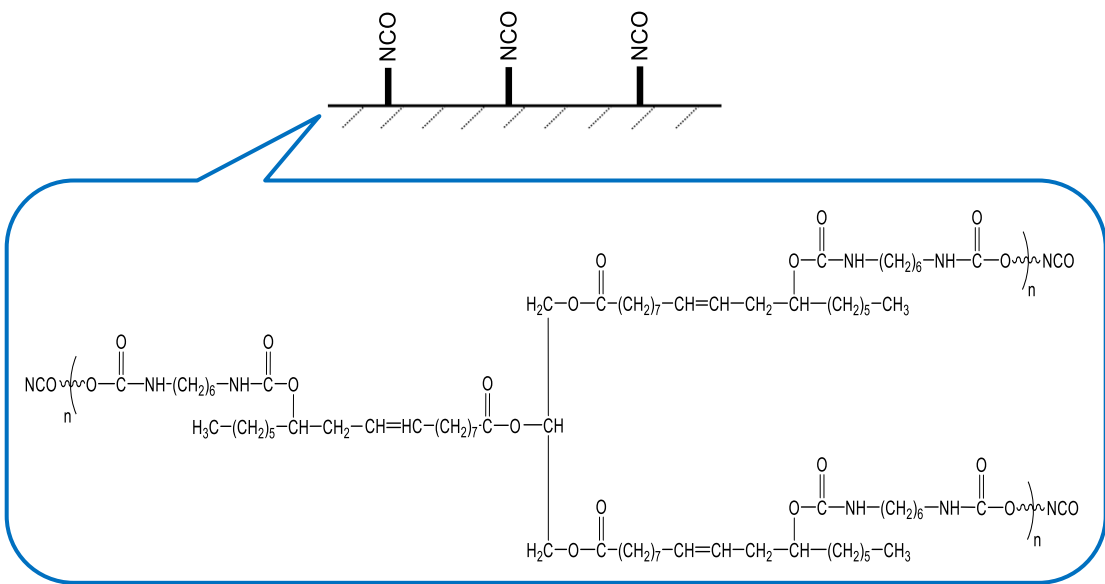
#### 4.1 การเตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต

ฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่ง สามารถเตรียมได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไอโซไซยาเนตของเฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนตกับหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำมันละหุ่ง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นพอลิยูรีเทนแสดงดังรูปที่ 4.1 (ก.) เป็นพอลิยูรีเทนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไอโซไซยาเนตที่มากเกินไปกับหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งจากโครงสร้างจะพบว่าพอลิยูรีเทนที่ได้มีหมู่ไอโซไซยาเนตที่ยังไม่ถูกทำปฏิกิริยาเหลืออยู่ที่ปลายสายโซ่ ซึ่งหมู่ไอโซไซยาเนตนี้มีความว่องไวสูงในการทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้น เกิดเป็นกรดคาร์บามิก แต่เนื่องจากกรดดังกล่าวไม่เสถียรจึงถูกเปลี่ยนเป็นเอมีนดังรูปที่ 4.1 (ข.) และคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม

ฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งและปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต สามารถเตรียมได้จากการการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไอโซไซยาเนตที่มากเกินไปของพอลิยูรีเทนในรูปที่ 4.1 (ก.) กับหมู่อะมิโนของคองโกเรตผ่านการเชื่อมโยงด้วยพันธะยูเรีย (Urea linkage,  $-NHCONH-$ ) ซึ่งโครงสร้างที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.2

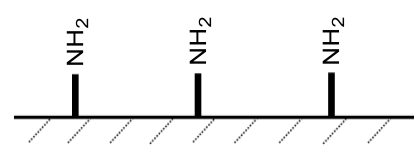


↓  
 ↓  
 ↓  
 บรยากาศไนโตรเจน



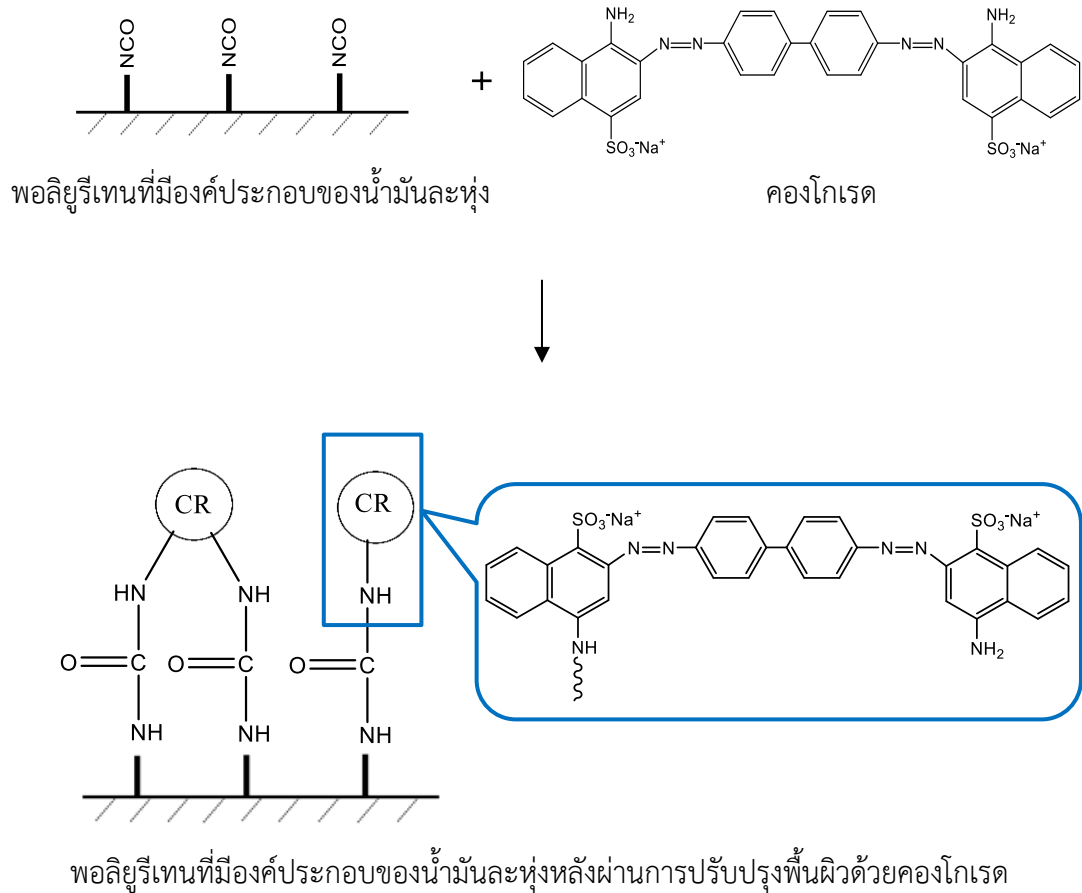
พอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่ง (ก.)

น้ำ, ความชื้น, H<sub>2</sub>O ↓



พอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งหลังเกิดปฏิกิริยากับน้ำ (ข.)

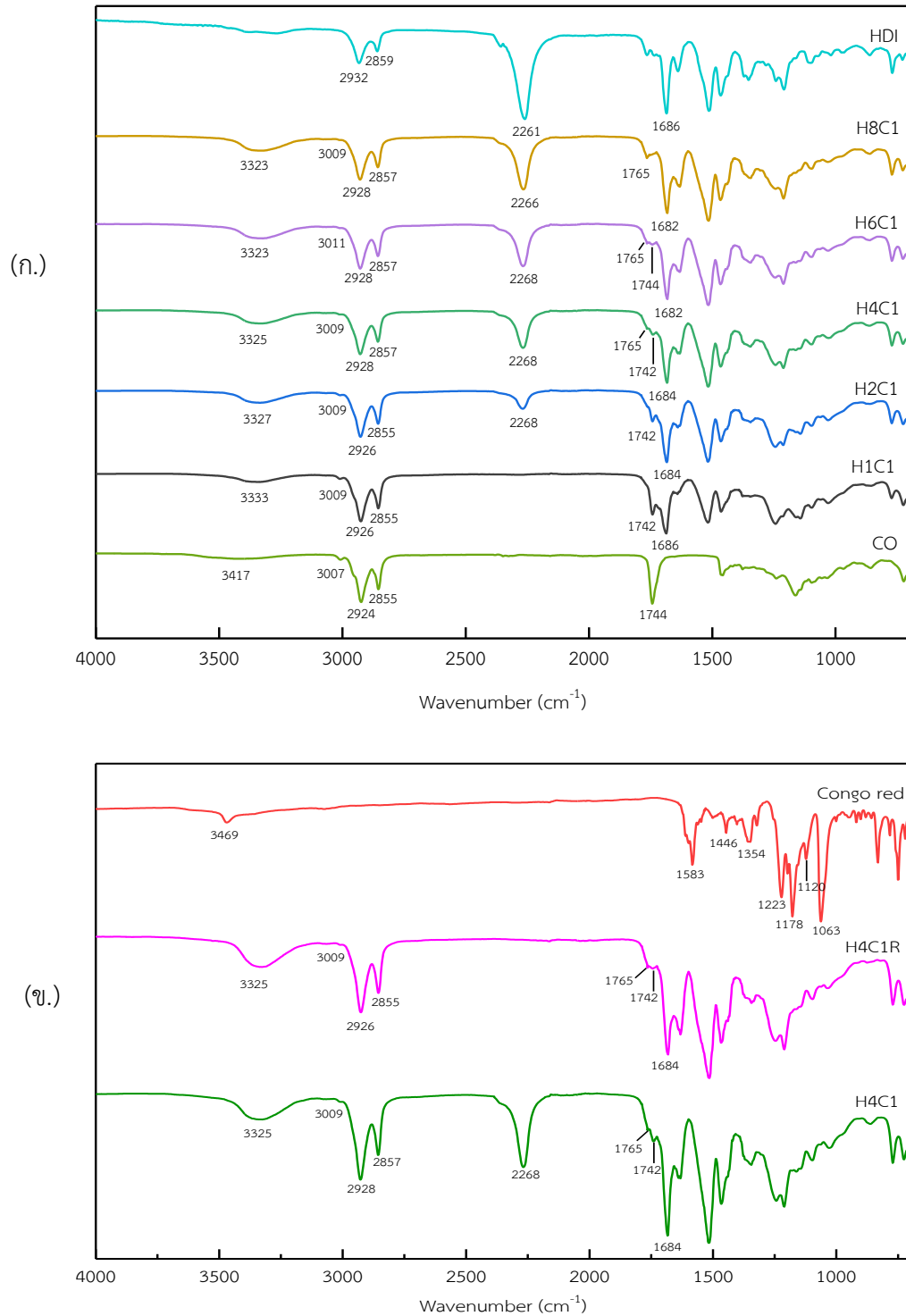
รูปที่ 4.1 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่ง



รูปที่ 4.2 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรด

#### 4.2 การตรวจสอบพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์ม

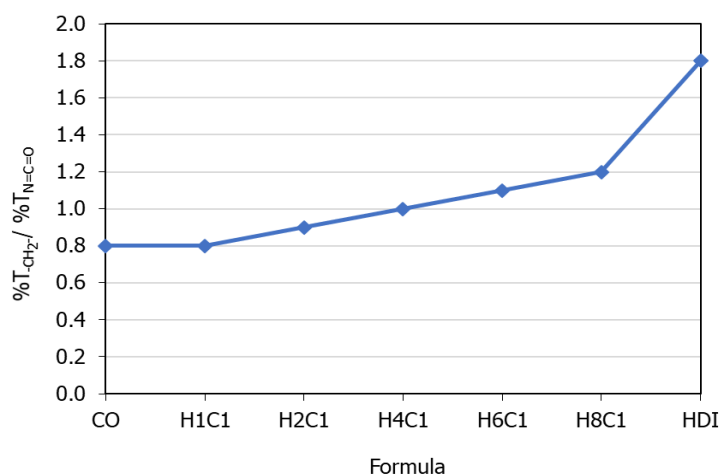
การพิสูจน์เอกลักษณ์ของการเกิดพันธะยูรีเทนระหว่างน้ำมันละหุ่งและเฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยานาตในฟิล์มพอลิยูรีเทน สามารถพิสูจน์ได้โดยใช้เทคนิค FTIR โหมด ATR ซึ่งอินฟราเรดสเปกตราก็ได้แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตราของฟิล์มพอลิยูรีเทน (ก.) แบบไม่ปรับปรุงพื้นผิว และ (ข.) แบบไม่ปรับปรุงพื้นผิว (H4C1) เปรียบเทียบกับแบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรด (H4C1R)

จากรูปที่ 4.3 (ก.) อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มพอลิยูรีเทนทุกสูตร พบพิกัดขึ้นในช่วงเลขคลื่น 3300-3350 cm<sup>-1</sup> ซึ่งเป็นพิกัดแสดงการสั่นแบบดึงยืดของ N-H (N-H stretching) ที่บ่งบอกถึงการเกิดพันธะยูรีเทนในโครงสร้างของพอลิยูรีเทน เมื่อพิจารณาในช่วงเลขคลื่น 2800-3000 cm<sup>-1</sup>

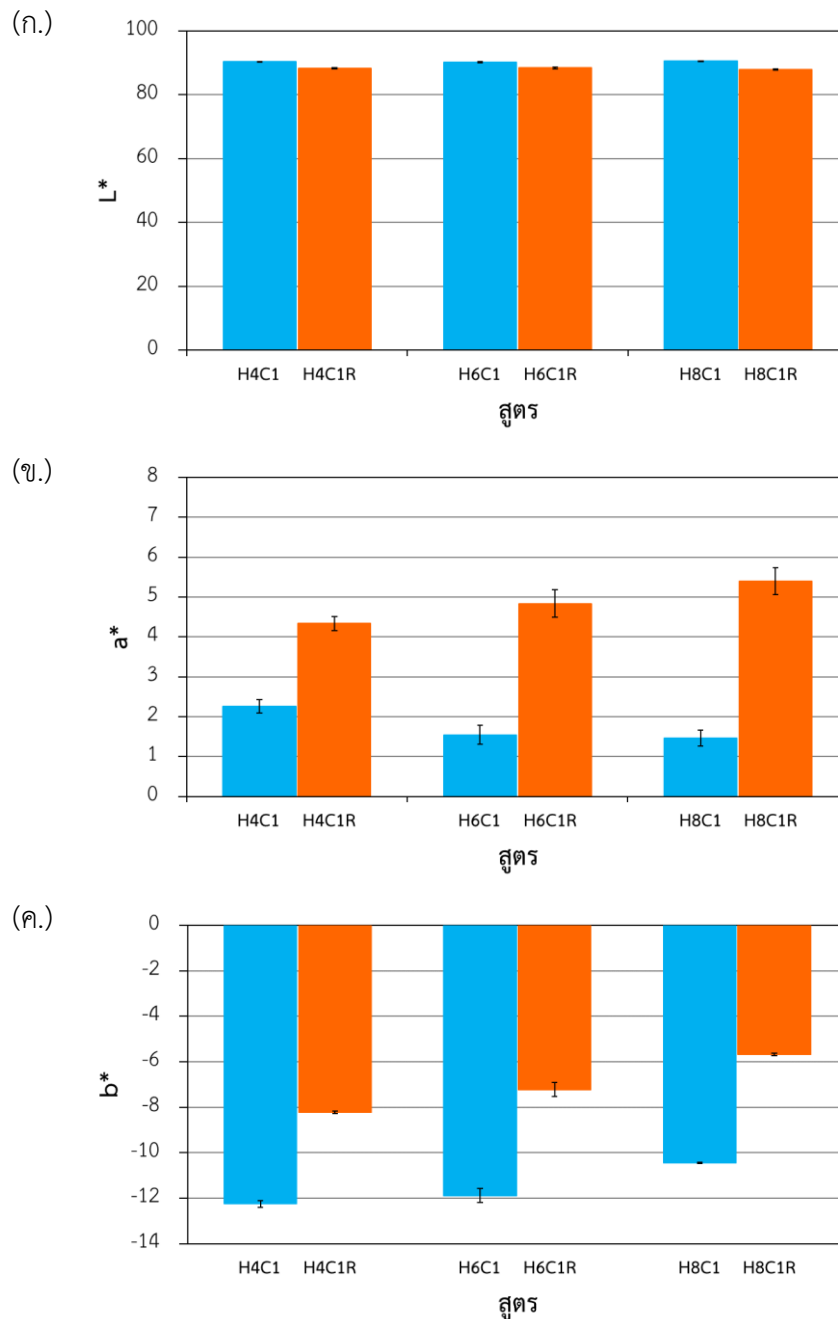
ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงการสั่นแบบดัดงอของ C-H พบว่าฟิล์มพอลิยูรีเทนทุกสูตรมีพีคเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 3010, 2930 และ 2850  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งแสดงการสั่นแบบดัดงอของ C-H แบบไม่อิ่มตัว (=C-H) จากส่วนของน้ำมันละหุ่ง, หมู่เมทิล (-CH<sub>3</sub>) จากส่วนของน้ำมันละหุ่งและจากส่วนของตัวทำละลายในเฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต และ หมู่เมทิลีน (-CH<sub>2</sub>-) จากทั้งส่วนของน้ำมันละหุ่งและเฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต ตามลำดับ และพบพีคที่ตำแหน่ง 1765, 1744 และ 1686  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคแสดงการสั่นแบบดัดงอของ C=O จากพันธะยูรีเทน, จากน้ำมันละหุ่ง และจากเฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต ตามลำดับ นอกจากนี้ในสเปกตรัมของฟิล์มพอลิยูรีเทนสูตร H2C1, H4C1, H6C1 และ H8C1 ซึ่งเป็นสูตรที่ใช้อัตราส่วนโดยโมลของไอโซไซยาเนตมากกว่าโมลของไฮดรอกซิลพบพีคขึ้นที่ 2270  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์แสดงการสั่นแบบดัดงอของ N=C=O ที่บ่งบอกให้ทราบว่าไม่มีหมู่ไอโซไซยาเนตที่ยังไม่ถูกทำปฏิกิริยากงเหลืออยู่บนโครงสร้างของพอลิยูรีเทน และเมื่อคำนวณหาอัตราส่วนความเข้มของพีค -CH<sub>2</sub>-/N=C=O ยังพบว่าอัตราส่วนดังกล่าวเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อัตราส่วนของเฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนตสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นการบ่งบอกให้ทราบว่าความเข้มของพีค N=C=O เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโดยโมลของไอโซไซยาเนตที่สูงขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามไม่พบพีคที่แสดงการสั่นแบบดัดงอของ N=C=O เกิดขึ้นในฟิล์มสูตร H1C1 ซึ่งเป็นการยืนยันว่าฟิล์มสูตร H1C1 ที่ใช้จำนวนโมลของไอโซไซยาเนตต่อโมลไฮดรอกซิลในอัตราส่วนที่เท่ากัน เป็นสูตรที่สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาเป็นพอลิยูรีเทนอย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ไม่พบพีคดังกล่าวเช่นเดียวกันในฟิล์มพอลิยูรีเทนปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรตดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ข.) เนื่องจากหมู่ไอโซไซยาเนตที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเป็นพอลิยูรีเทนได้ทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนของคองโกเรตเกิดเป็นพันธะยูเรีย แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นเนื่องจากการเชื่อมโยงด้วยคองโกเรตเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวเท่านั้น แต่การตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ตรวจวัดลงไปเนื้อฟิล์มด้วย จึงส่งผลให้การตรวจวัดโครงสร้างของคองโกเรตบนพื้นผิวของฟิล์มพอลิยูรีเทนแสดงพีคไม่ชัดเจน



รูปที่ 4.4 อัตราส่วนความเข้มของพีค -CH<sub>2</sub>-/N=C=O จากผล FTIR ในฟิล์มพอลิยูรีเทนอัตราส่วนต่าง ๆ

### 4.3 การวัดสีของฟิล์ม

จากการวัดสีของฟิล์มพอลิยูรีเทนแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิวและแบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต โดยใช้เครื่องวัดสี ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ค่าเฉดสีของฟิล์มพอลิยูรีเทนแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิวและแบบปรับปรุงพื้นผิว (ก.) ค่าความสว่าง ( $L^*$ ), (ข.) เฉดสีเขียว-แดง ( $a^*$ ) และ (ค.) เฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $b^*$ )

จากรูปที่ 4.5 (ก.) แสดงความสว่างของฟิล์มพอลิยูรีเทนแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิวเปรียบเทียบกับแบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต โดยจากรูปพบว่าฟิล์มแบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรตทุกสูตรมี

ค่า  $L^*$  ต่ำกว่าฟิล์มแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิวเล็กน้อย ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่าหลังผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต ฟิล์มมีความสว่างลดลง มีความทึบมากขึ้น เนื่องจากฟิล์มพอลิยูรีเทนโดยปกติมีลักษณะโปร่งใส แต่เมื่อผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต สีที่เกิดจากคองโกเรตทำให้ฟิล์มมีความโปร่งใสน้อยลง หรือมีความทึบมากขึ้น และเนื่องจากการปรับปรุงโครงสร้างของพอลิยูรีเทนด้วยคองโกเรตเกิดขึ้นแค่บริเวณพื้นผิวของฟิล์ม และเกิดการปรับปรุงพื้นผิวเพียงด้านเดียวเท่านั้น ดังนั้นความสว่างที่อ่านค่าได้จึงไม่แตกต่างกันมากนัก

จากรูปที่ 4.5 (ข.) แสดงลักษณะเฉดสีเขียว (-) ถึงสีแดง (+) ของฟิล์มพอลิยูรีเทนแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิวเปรียบเทียบกับแบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต โดยจากรูปพบว่าฟิล์มแบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรตทุกสูตรมีค่า  $a^*$  ที่สูงกว่าฟิล์มแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่าหลังผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต ฟิล์มมีเฉดสีแดงเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นเฉดสีที่มาจากคองโกเรตที่ถูกทำปฏิกิริยาอยู่บนพื้นผิวของฟิล์ม นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนโดยโมลของไอโซไซยานเนตที่สูงขึ้น มีผลทำให้การทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของฟิล์มพอลิยูรีเทนกับคองโกเรตสูงขึ้น และส่งผลให้ค่า  $a^*$  ที่อ่านได้มีค่าสูงขึ้น หรือมีเฉดสีแดงเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

จากรูปที่ 4.5 (ค.) แสดงลักษณะเฉดสีน้ำเงิน (-) ถึงสีเหลือง (+) ของฟิล์มพอลิยูรีเทนแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิวเปรียบเทียบกับแบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต โดยจากรูปพบว่าฟิล์มแบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรตทุกสูตรมีค่า  $b^*$  ที่สูงกว่าฟิล์มแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่าหลังผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต ฟิล์มมีเฉดสีเหลืองเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากคองโกเรตที่ถูกทำปฏิกิริยาอยู่บนพื้นผิวของฟิล์มแสดงสีส้มออกมา นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนโดยโมลของไอโซไซยานเนตที่สูงขึ้น มีผลทำให้การทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของฟิล์มพอลิยูรีเทนกับคองโกเรตสูงขึ้น และส่งผลให้ค่า  $b^*$  ที่อ่านได้มีค่าสูงขึ้น หรือมีเฉดสีเหลืองเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

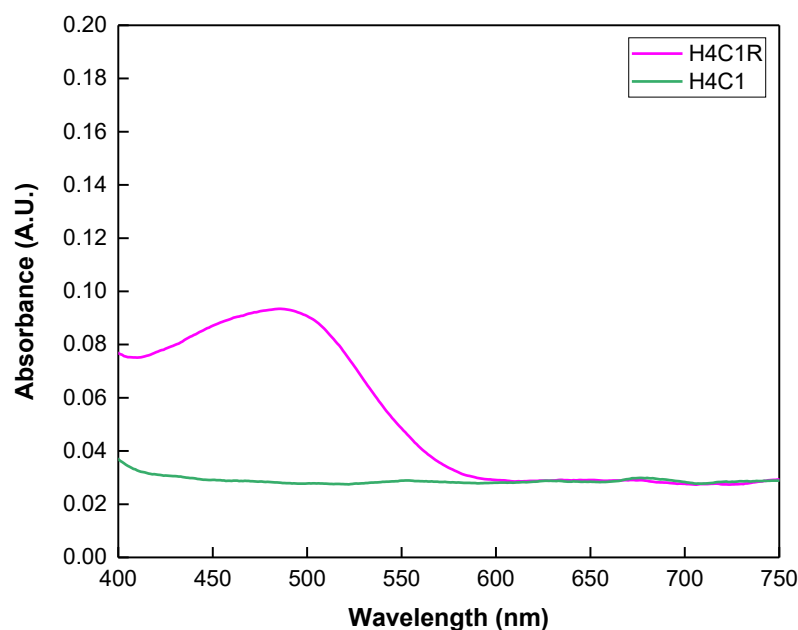
จากผลการวัดสีผ่านการวิเคราะห์ค่า  $L^*$ ,  $a^*$  และ  $b^*$  พบว่าฟิล์มที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรตมีเฉดสีแดงและเฉดสีเหลืองเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ตามทฤษฎีสีพบว่าสีที่ได้จากการผสมสีแดงและสีเหลืองคือสีส้ม ในทำนองเดียวกันเฉดสีของฟิล์มแบบปรับปรุงพื้นผิวที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่ามีเฉดสีส้มดังรูปที่ 4.6 ซึ่งสอดคล้องกับค่าการวัดสีที่อ่านได้จากเครื่องวัดสี



รูปที่ 4.6 ลักษณะของฟิล์มสูตร H4C1 (แบบไม่ปรับปรุงพื้นผิว) และสูตร H4C1R (แบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต)

#### 4.4 การพิสูจน์องค์ประกอบโพลีเมอร์บนฟิล์มพอลิยูรีเทนด้วยเทคนิค UV-Visible Spectrophotometry

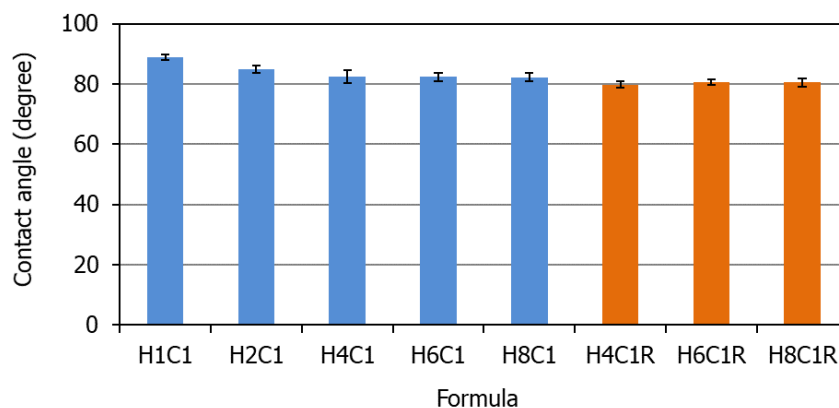
จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มพอลิยูรีเทนและฟิล์มพอลิยูรีเทนปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกรีตผ่านเทคนิค UV-Visible Spectrophotometry ได้สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มแสดงดังรูปที่ 4.7 โดยเป็นตัวอย่างสเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มสูตร H4C1 (แบบไม่ปรับปรุงพื้นผิว) เปรียบเทียบกับสูตร H4C1R (แบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกรีต) ซึ่งจากรูปพบว่าสเปกตรัมของฟิล์มพอลิยูรีเทนแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิวไม่พบพีคการดูดกลืนแสงใด ๆ ในช่วงความยาวคลื่น 400 -750 แต่ในทางตรงกันข้ามพบว่าในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มพอลิยูรีเทนแบบปรับปรุงพื้นผิวมีพีคการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นประมาณ 490 นาโนเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับความยาวคลื่นที่สามารถดูดกลืนแสงได้สูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) ของคองโกรีต [67] ดังนั้นจึงเป็นการพิสูจน์ให้เห็นได้ชัดว่าสีที่ปรากฏบนฟิล์มพอลิยูรีเทนที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกรีตดังที่วิเคราะห์ได้จากการวัดสีนั้น เป็นสีของคองโกรีตที่ทำปฏิกิริยาอยู่บนพื้นผิวของฟิล์มพอลิยูรีเทน แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นเนื่องจากปริมาณคองโกรีตที่ยึดติดอยู่บนพื้นผิวของฟิล์มเป็นปริมาณที่น้อยมาก จึงส่งผลให้พีคแสดงการดูดกลืนแสงที่พบนั้นมีค่าการดูดกลืนแสงที่ต่ำ



รูปที่ 4.7 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของฟิล์มพอลิยูรีเทนสูตร H4C1 (แบบไม่ปรับปรุงพื้นผิว) และสูตร H4C1R (แบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกรีต)

## 4.5 มุมสัมผัส (Initial Contact Angle)

จากการทดสอบมุมสัมผัสของฟิล์มพอลิยูรีเทนและฟิล์มพอลิยูรีเทนปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ค่ามุมสัมผัสที่ผ่านการทดสอบด้วยน้ำกลั่นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.8 ค่ามุมสัมผัสที่ผ่านการทดสอบด้วยน้ำกลั่นของฟิล์มสูตรต่าง ๆ พบว่าฟิล์มทุกสูตรมีค่ามุมสัมผัสต่ำกว่า 90 องศา ซึ่งหมายถึงฟิล์มทุกสูตรมีความชอบน้ำ (Hydrophilic) และเมื่อเปรียบเทียบมุมสัมผัสของฟิล์มพอลิยูรีเทนแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิวที่มีอัตราส่วนโดยโมลต่างกัน พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของหมู่ไอโซไซยาเนตสูงขึ้น ค่ามุมสัมผัสของฟิล์มที่ลดลง เนื่องจากความมีขั้วของหมู่เอมีนที่เปลี่ยนมาจากการเกิดปฏิกิริยาของหมู่ไอโซไซยาเนตกับน้ำ ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่าฟิล์มพอลิยูรีเทนมีความชอบน้ำเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณการใช้หมู่ไอโซไซยาเนตที่มากขึ้น ในทำนองเดียวกันพบว่าการปรับปรุงพื้นผิวของฟิล์มพอลิยูรีเทนด้วยคองโกเรต ฟิล์มที่ได้มีค่ามุมสัมผัสต่ำกว่าฟิล์มพอลิยูรีเทนแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิวเล็กน้อย เนื่องจากความมีขั้วของหมู่ซัลโฟเนต ( $\text{SO}_3^- \text{Na}^+$ ) บนโครงสร้างของคองโกเรต อย่างไรก็ตามการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคองโกเรตกับหมู่ไอโซไซยาเนตที่คงเหลือของฟิล์มเกิดขึ้นบนพื้นผิวของฟิล์มในปริมาณที่ไม่มาก จึงส่งผลให้ฟิล์มพอลิยูรีเทนแบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรตแต่ละสูตรมีค่ามุมสัมผัสที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

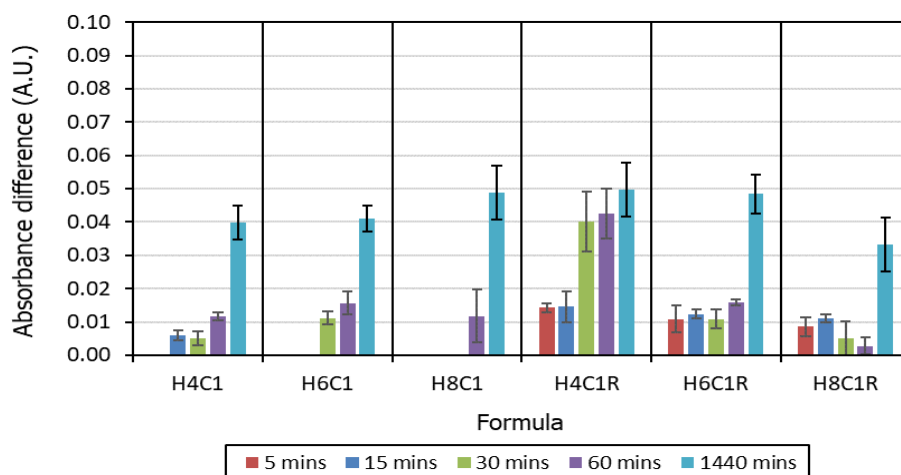
## 4.6 การดูดซับเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของฟิล์ม

### 4.6.1 ผลของอัตราส่วนโดยโมล -NCO/-OH และเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมล -NCO/-OH และเวลาที่ใช้ในการดูดซับเมทิลีนบลูทำได้โดยนำฟิล์มพอลิยูรีเทนสูตรต่าง ๆ มาทดสอบการดูดซับเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 100 ppm เป็นเวลา 5, 15, 30, 60 และ 1440 นาที แล้วคำนวณหาผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงที่วัดผ่านเทคนิค UV-Visible โดยใช้สมการที่ 3.1 ในการคำนวณ และวัดเฉดสีที่เปลี่ยนแปลงไปของฟิล์ม

#### 4.6.1.1 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง

ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิว (H4C1, H6C1 และ H8C1) และสูตรปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต (H4C1R, H6C1R และ H8C1R) ที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูที่ เวลาต่าง ๆ กัน แสดงได้ดังรูปที่ 4.9

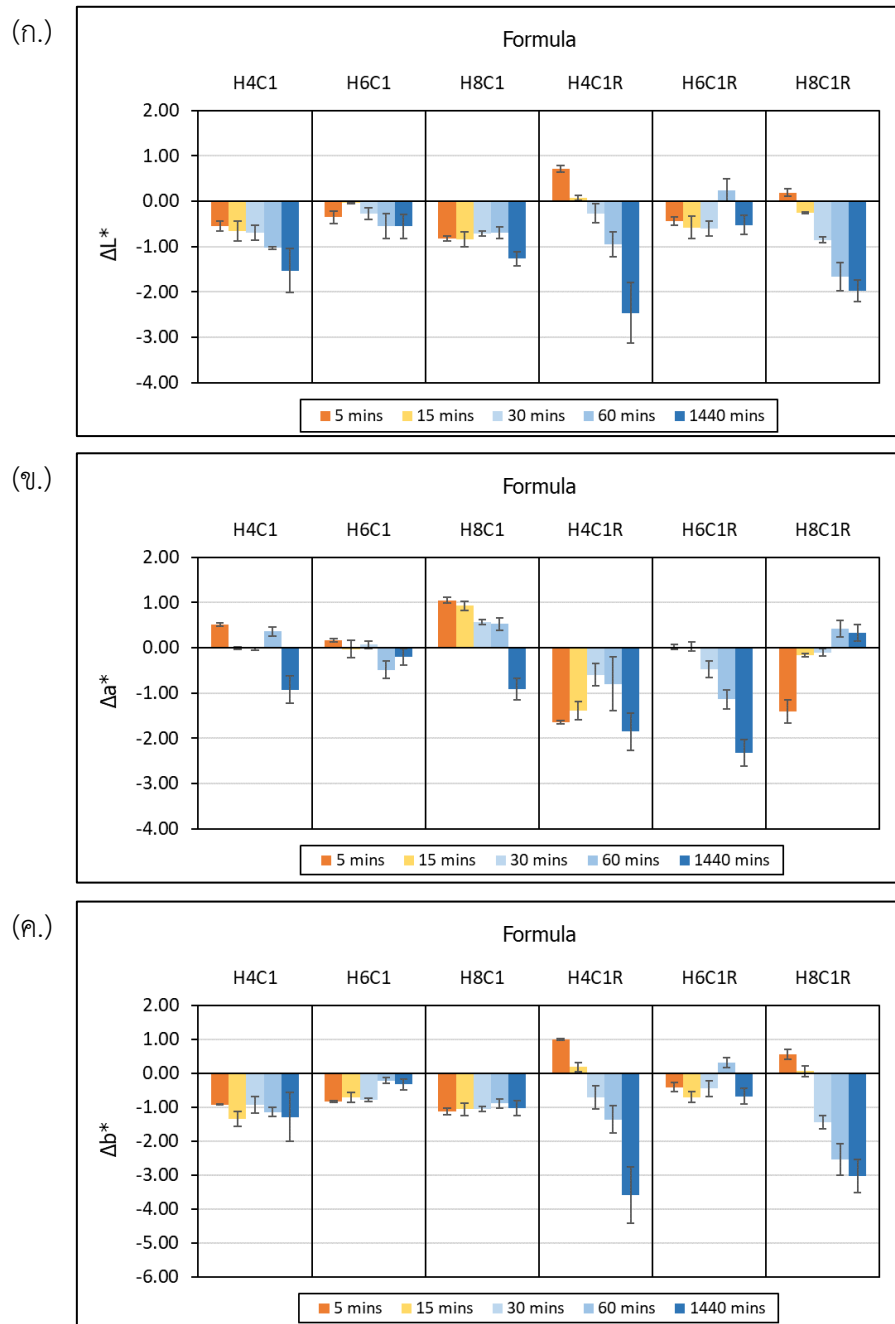


รูปที่ 4.9 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงจากการดูดซับเมทิลีนบลูบนฟิล์มสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิว (H4C1, H6C1 และ H8C1) และสูตรปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต (H4C1R, H6C1R และ H8C1R) ที่เวลาต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อใช้เวลาในการดูดซับเมทิลีนบลูนานขึ้น ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิว (H4C1, H6C1 และ H8C1) สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างพันธะยูรีเทนและอะตอมไฮโดรเจนจากหมู่เอมีนกับหมู่เอมีนของเมทิลีนบลูได้ จึงทำให้ฟิล์มสามารถดูดซับเมทิลีนบลูไว้บนพื้นผิวได้ ซึ่งสามารถคำนวณหาผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงได้ที่เวลาการดูดซับที่นานขึ้น ในขณะที่ฟิล์มสูตรปรับปรุงพื้นผิว (H4C1R, H6C1R และ H8C1R) สามารถเกิดอันตรกิริยากับเมทิลีนบลูได้ 2 แบบ ได้แก่ เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างพันธะยูรีเทนกับหมู่เอมีนของเมทิลีนบลู และเกิดอันตรกิริยาแบบไอออน-ไอออนระหว่างหมู่ซัลโฟเนตของคองโกเรตกับอะตอมซัลเฟอร์ประจุบวกของเมทิลีนบลู ส่งผลให้ฟิล์มสูตรปรับปรุงพื้นผิว มีประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูได้ไวกว่าสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งใช้เวลาในการดูดซับเพียง 5 นาทีสามารถเห็นผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง นอกจากนี้พบว่าที่เวลา 30 นาที ฟิล์มสูตร H4C1R มีผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุดและเริ่มคงที่จนถึง 24 ชั่วโมง ซึ่งหมายความว่าฟิล์มสูตร H4C1R มีประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูไว้บนพื้นผิวดีที่สุด โดยเวลาในการดูดซับที่ 30 นาทีที่ได้ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงเทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับที่เวลา 24 ชั่วโมง

#### 4.6.1.2 การเปลี่ยนแปลงเฉดสีของฟิล์มพอลิยูรีเทน

จากการวัดเฉดสีของฟิล์มก่อนและหลังทดสอบการดูดซับเมทิลีนบลู แล้วนำมาคำนวณหาผลต่างของค่าเฉดสีของฟิล์มที่เกิดขึ้น ผลต่างของค่าเฉดสีต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.10 ประกอบด้วยค่า  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  และ  $\Delta b^*$



รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงค่าเฉดสีของฟิล์มพอลิยูรีเทนสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิว (H4C1, H6C1 และ H8C1) และสูตรปรับปรุงพื้นผิว (H4C1R, H6C1R และ H8C1R) หลังผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูที่เวลาต่าง ๆ (ก.) ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), (ข.) ผลต่างของเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) และ (ค.) เฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ )

จากรูปที่ 4.10 (ก.) พบว่าผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ) ในทุกสูตรมีค่าติดลบมากขึ้น เมื่อใช้เวลาในการดูดซับเมทิลีนบลูมากขึ้น หมายความว่าหลังการดูดซับเมทิลีนบลู ฟิล์มที่ได้มีความสว่างน้อยลงหรือมีความใสลดลง และมีความทึบมากขึ้น

จากรูปที่ 4.10 (ข.) แสดงผลต่างของเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) พบว่าฟิล์มสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิวทุกสูตรมีค่า  $\Delta a^*$  ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงเฉดสีเขียว-แดงที่เกิดขึ้นน้อย ในกรณีของฟิล์มสูตรปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรตทุกสูตรพบว่ามีค่า  $\Delta a^*$  ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกับในกรณีของฟิล์มสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิว และนอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มสูตรปรับปรุงพื้นผิวโดยส่วนใหญ่มีค่า  $\Delta a^*$  ติดลบมากขึ้น ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่าหลังการดูดซับเมทิลีนบลู ฟิล์มมีเฉดสีแดงจางลงหรือมีเฉดสีเขียวเข้มขึ้นนั่นเอง

จากรูปที่ 4.10 (ค.) ผลต่างของเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) โดยส่วนใหญ่ของฟิล์มทั้งแบบปรับปรุงพื้นผิวและแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิวมีค่าติดลบ หมายความว่าหลังผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูฟิล์มมีเฉดสีน้ำเงินเข้มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากสีน้ำเงินของเมทิลีนบลูที่เกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวของฟิล์มนั่นเอง

#### 4.6.2 ผลของสภาวะของฟิล์มและสภาวะของสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้ในการดูดซับ

จากการทดสอบผลของอัตราส่วนโดยโมล  $-NCO/-OH$  พบว่าฟิล์มสูตร H4C1R มีประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูไว้บนพื้นผิวดีที่สุด จึงเลือกฟิล์มสูตร H4C1R มาทดสอบผลของสภาวะของฟิล์ม โดยการปรับสภาวะฟิล์มเป็นกรด เบส และไม่ปรับสภาวะ แล้วนำไปดูดซับเมทิลีนบลูที่มีการปรับสภาวะของสารละลายเป็นกรด เบส และไม่ปรับสภาวะ เป็นเวลา 30 นาที เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับที่เกิดขึ้น แล้วคำนวณหาผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงที่วัดผ่านเทคนิค UV-Visible โดยใช้สมการที่ 3.1 และวัดเฉดสีที่เปลี่ยนแปลงไปของฟิล์ม

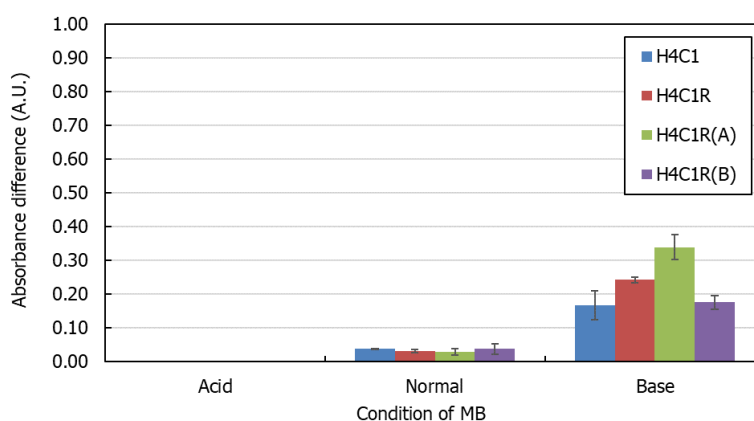
##### 4.6.2.1 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง

จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มก่อนปรับสภาวะและหลังทดสอบการดูดซับเมทิลีนบลูที่สภาวะต่างกัน แล้วนำมาคำนวณหาผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงในสมการที่ 3.1 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงที่คำนวณได้แสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งจากรูปพบว่าเมื่อนำฟิล์มทุกสภาวะมาดูดซับเมทิลีนบลูในสภาวะกรด ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับศูนย์ เป็นผลมาจากการไม่พบพีคของเมทิลีนบลูบนสเปกตรัมของฟิล์มหลังผ่านการทดสอบ ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่าฟิล์มในทุกสภาวะไม่สามารถดูดซับเมทิลีนบลูในสภาวะกรดได้ เนื่องจากในสภาวะกรดมีโปรตอน ( $H^+$ ) หรือไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) ล้อมรอบโมเลกุลของเมทิลีนบลูอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งโปรตอนหรือไฮโดรเนียมไอออนที่เกิดขึ้นมีประจุเดียวกันกับเมทิลีนบลู จึงก่อให้เกิดการแข่งขันระหว่างโปรตอนหรือไฮโดรเนียมไอออนกับประจุบวกบนโครงสร้างของเมทิลีนบลูในการเข้าทำอันตรกิริยาไอออน-ไอออนกับประจุลบ

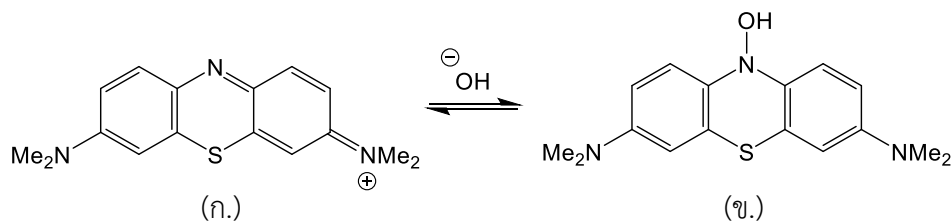
ของหมู่ซัลโฟเนตจากคองโกเรดที่อยู่บนพื้นผิวของฟิล์มพอลิยูรีเทน จึงส่งผลให้ฟิล์มไม่สามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้หรือดูดซับได้น้อยมาก

เมื่อนำฟิล์มทุกสภาวะมาดูดซับเมทิลีนบลูในสภาวะกลาง ไม่เกิดการแข่งขันในการเข้าทำอันตรกิริยากับหมู่ซัลโฟเนตของคองโกเรด จึงทำให้การดูดซับเมทิลีนบลูในสภาวะกลางให้ประสิทธิภาพดีกว่าในสภาวะกรด และผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงที่คำนวณได้มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย โดยผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงมีค่าน้อยกว่า 0.1 นอกจากนี้ยังพบว่าผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงในทุกสภาวะของฟิล์มมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อนำฟิล์มทุกสภาวะมาดูดซับเมทิลีนบลูในสภาวะเบส ไฮดรอกไซด์ไอออนเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีนของเมทิลีนบลู ทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มเข้ามาในโครงสร้างของเมทิลีนบลู แล้วเมทิลีนบลูถูกปรับให้มาอยู่ในโครงสร้างที่เป็นกลาง (รูปที่ 4.12) โดยหมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นนี้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่คาร์บอกซิล ณ ตำแหน่งพันธะยูรีเทน และหมู่เอโซของคองโกเรดได้ จึงส่งผลให้ฟิล์มสามารถดูดซับเมทิลีนบลูไว้ที่พื้นผิวได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับสภาวะฟิล์มให้อยู่ในสภาวะกรดก่อนนำไปทดสอบ ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูสูงที่สุด



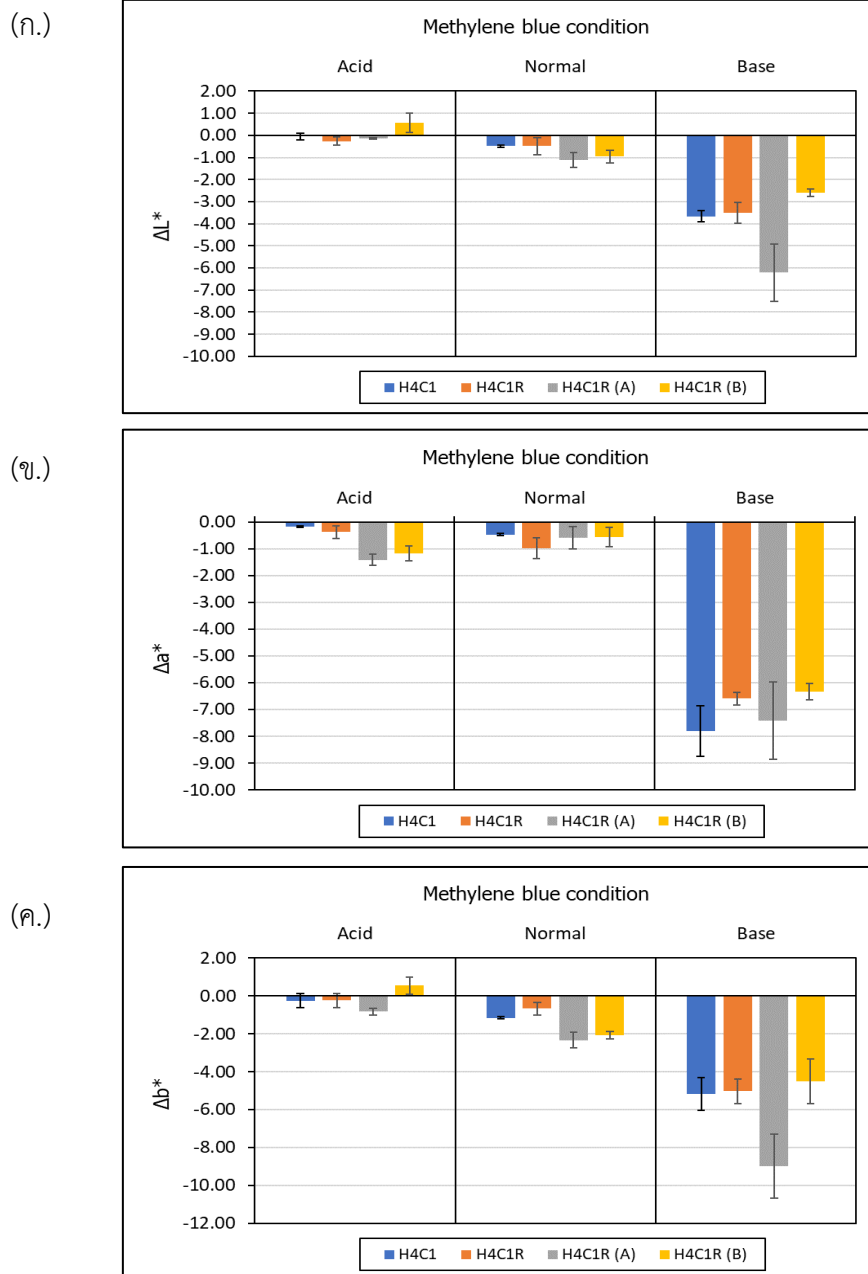
รูปที่ 4.11 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด (H4C1R(A)) ปกติ (H4C1R) และเบส (H4C1R(B)) ที่ผ่านการดูดซับเมทิลีน 100 ppm ในสภาวะกรด ปกติ เบส



รูปที่ 4.12 โครงสร้างของเมทิลีนบลู (ก.) สภาวะกรด และ (ข.) สภาวะเบส [54]

#### 4.6.2.2 การเปลี่ยนแปลงเฉดสีของฟิล์มพอลิยูรีเทน

จากการวัดเฉดสีของฟิล์มก่อนและหลังทดสอบเมื่อปรับสภาวะของฟิล์มเป็นกรด เบส และไม่ปรับสภาวะ แล้วนำไปดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูที่ปรับสภาวะเป็นกรด เบส และไม่ปรับสภาวะ แล้วคำนวณหาผลต่างของค่าเฉดสี ซึ่งผลต่างของค่าเฉดสี  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  และ  $\Delta b^*$  ที่คำนวณได้ แสดงได้ดังรูปที่ 4.13



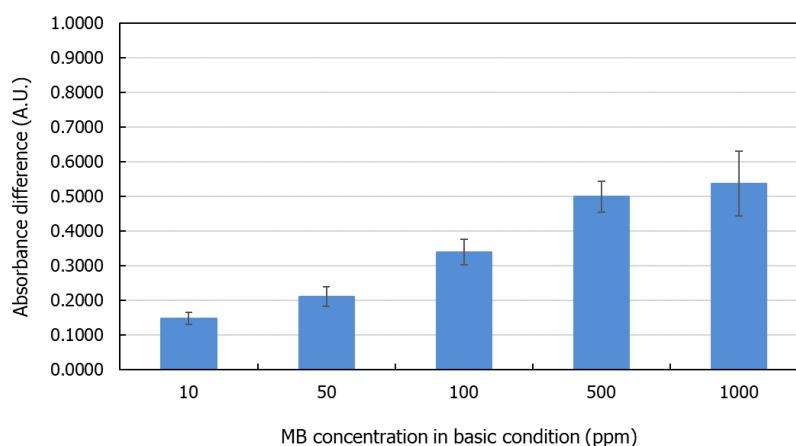
รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงค่าเฉดสีหลังผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูของฟิล์มสูตร H4C1R เมื่อปรับสภาวะฟิล์มเป็นกรด (H4C1R(A)), ปกติ (H4C1R), เบส (H4C1R(B)) และปรับสภาวะเมทิลีนบลู 100 ppm เป็นกรด ปกติ เบส (ก.) ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), (ข.) ผลต่างของเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) และ (ค.) เฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ )

จากรูปที่ 4.13 (ก.) พบว่า  $\Delta L^*$  ของฟิล์มทุกสภาวะ เมื่อนำมาดูดซับเมทิลีนบลูในสภาวะกรด และไม่ปรับสภาวะ มีค่าใกล้เคียงศูนย์ ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่า การดูดซับเมทิลีนบลูที่ 2 สภาวะนี้ไม่ส่งผลต่อความสว่างของฟิล์ม แต่เมื่อนำฟิล์มทุกสภาวะมาดูดซับเมทิลีนบลูในสภาวะเบส พบว่า  $\Delta L^*$  มีค่าติดลบ ฟิล์มมีความทึบมากขึ้นเมื่อผ่านการดูดซับเมทิลีนบลู จากรูปที่ 4.13 (ข.) พบว่า  $\Delta a^*$  จากการดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูในสภาวะเบส มีค่าติดลบมากกว่าในสภาวะกรดและไม่ปรับสภาวะ ซึ่งหมายความว่าฟิล์มที่ได้หลังจากการดูดซับเมทิลีนบลูในสภาวะเบสเฉดสีเขียวเข้มขึ้น และจากรูปที่ 4.13 (ค.) พบว่าการดูดซับเมทิลีนบลูในสภาวะเบส ได้ค่า  $\Delta b^*$  ติดลบ แต่การดูดซับเมทิลีนบลูในสภาวะอื่น ๆ ได้ค่า  $\Delta b^*$  ใกล้เคียงศูนย์ ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่า การดูดซับเมทิลีนบลูที่สภาวะเบสมีประสิทธิภาพที่สุด เนื่องจากฟิล์มมีเฉดสีน้ำเงินเข้มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากเมทิลีนบลูที่เกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวของฟิล์มได้มากนั่นเอง ในขณะที่การดูดซับในสภาวะอื่น ๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉดสีของฟิล์มไปในทางสีน้ำเงินน้อยมากหรือไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเลย นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับสภาวะฟิล์มให้อยู่ในสภาวะกรดก่อนนำมาดูดซับสารละลายเมทิลีนบลูในสภาวะเบส ให้ค่าผลต่างทั้งค่า  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  และ  $\Delta b^*$  สูงสุด แสดงถึงประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูที่ดี ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง

### 4.6.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้ในการดูดซับ

#### 4.6.3.1 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้ในการดูดซับ ในที่นี้ได้เลือกฟิล์มสูตร H4C1R ในสภาวะกรด มาทดสอบการดูดซับเมทิลีนบลูในสภาวะเบส เนื่องจากสภาวะของฟิล์มและสภาวะของสารละลายเมทิลีนบลูดังกล่าวนั้นเป็นสภาวะที่ให้ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด โดยผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มเมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้ในการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.14



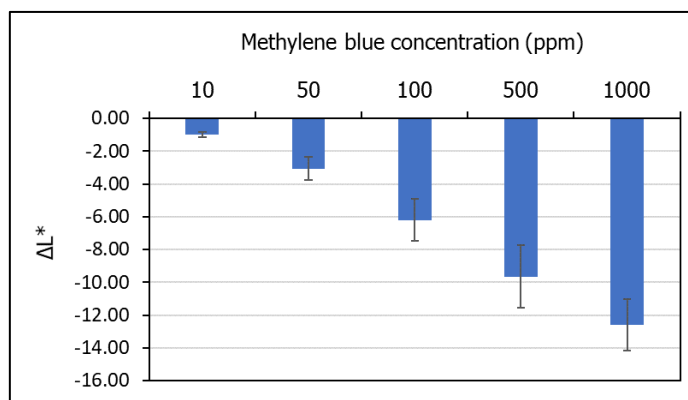
รูปที่ 4.14 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด ที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้น 10, 50, 100, 500 และ 1000 ppm สภาวะเบส

จากรูปที่ 4.14 พบว่าผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งพีคเมทิลีนบลูมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูสูงขึ้น อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นเมทิลีนบลู 500 ppm และ 1000 ppm พบว่าผลต่างของค่าการดูดกลืนแสง ณ ตำแหน่งพีคเมทิลีนบลูมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่าฟิล์มสามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงสุดเมื่อเมทิลีนบลูมีความเข้มข้นอย่างน้อย 500 ppm

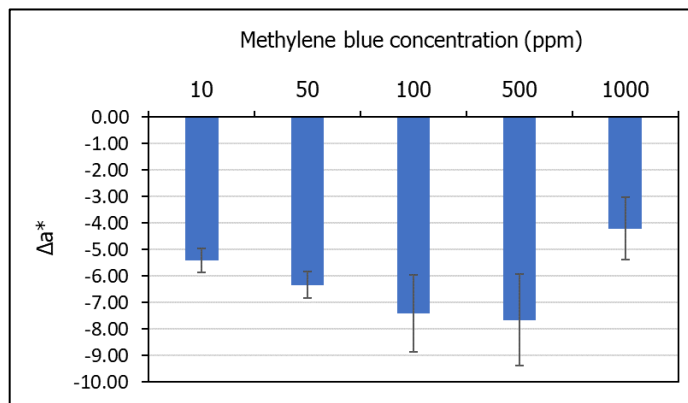
#### 4.6.3.2 การเปลี่ยนแปลงเฉดสีของฟิล์มพอลิยูรีเทน

จากการหาผลต่างของค่าเฉดสีของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรดหลังผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูสภาวะเบสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.15 ซึ่งจากรูปพบว่า  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  และ  $\Delta b^*$  มีค่าติดลบมากขึ้น เมื่อใช้สารละลายเมทิลีนบลูความเข้มข้นสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีความทึบมากขึ้น, มีเฉดสีเขียว และเฉดสีน้ำเงินเข้มขึ้นตามความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สูงขึ้นตามลำดับ

(ก.)

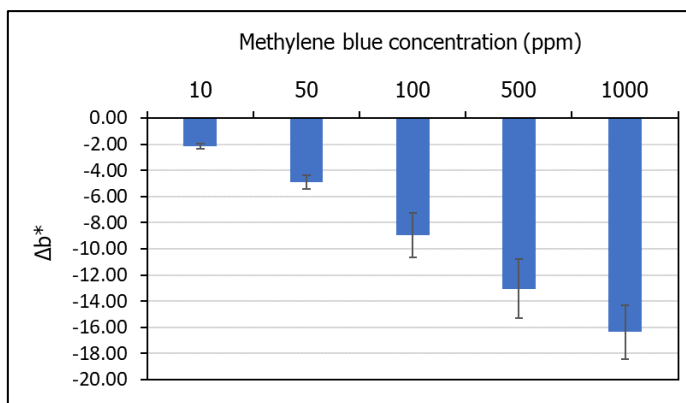


(ข.)



รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงค่าเฉดสีของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด หลังผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูที่ความเข้มข้น 10, 50, 100, 500, 1000 ppm สภาวะเบส (ก.) ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), (ข.) ผลต่างของเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) และ (ค.) เฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ )

(ค.)

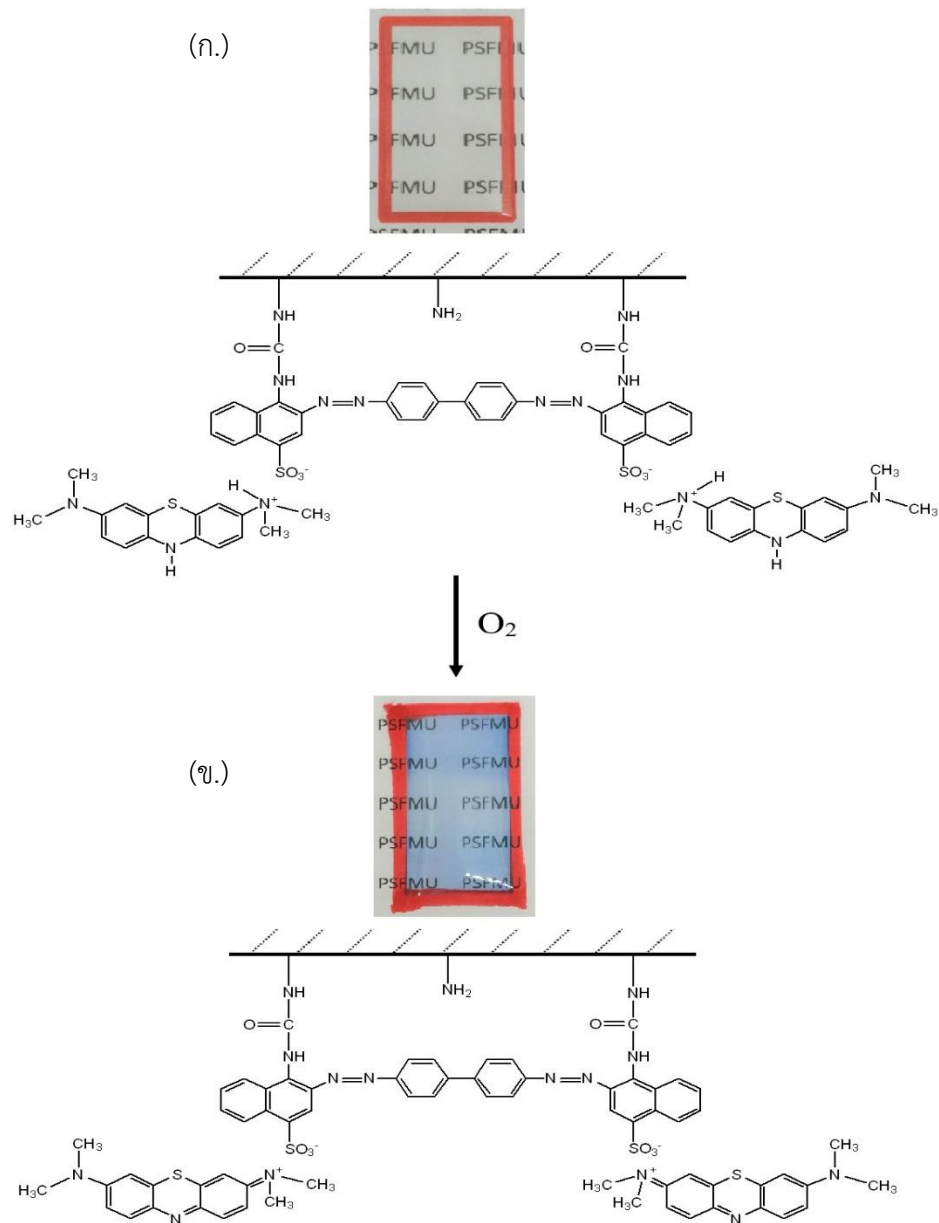


**รูปที่ 4.15** การเปลี่ยนแปลงค่าเฉดสีของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด หลังผ่านการดูดซับเมทิลีนบลู ที่ความเข้มข้น 10, 50, 100, 500, 1000 ppm สภาวะเบส (ก.) ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), (ข.) ผลต่างของเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) และ (ค.) เฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) (ต่อ)

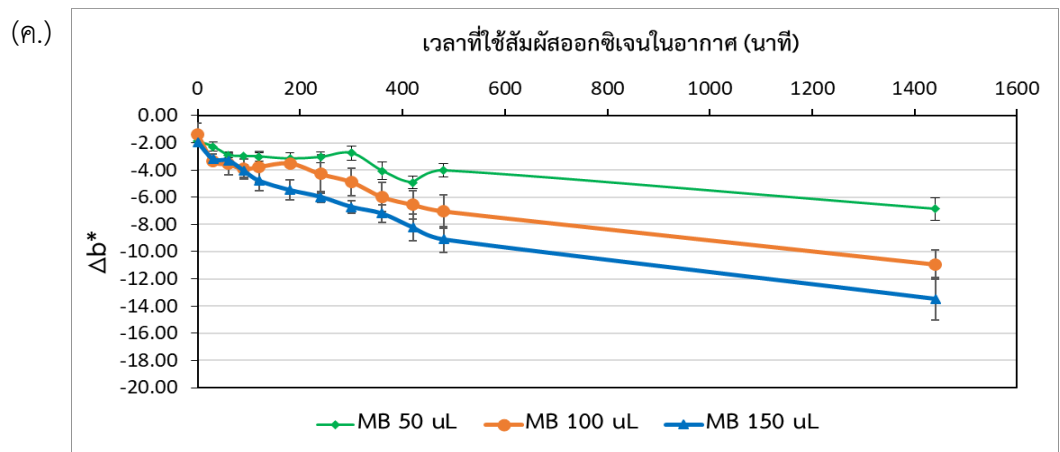
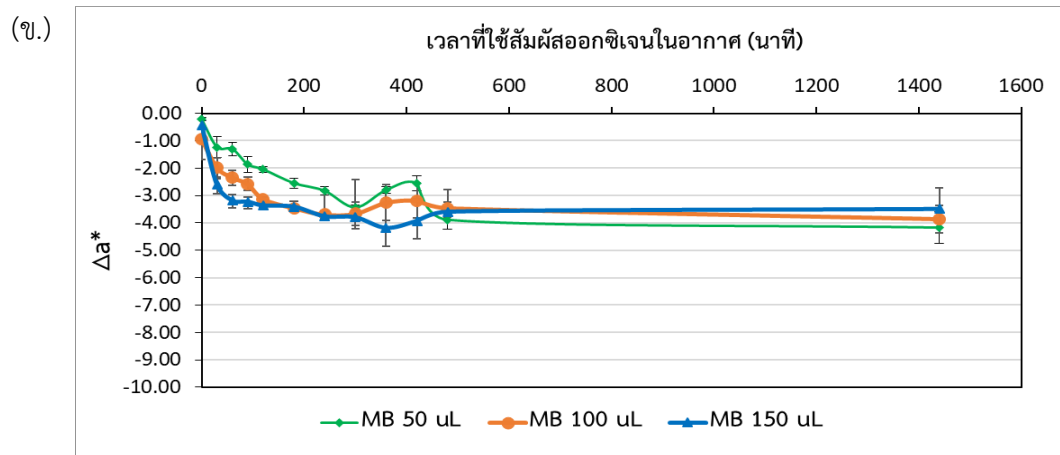
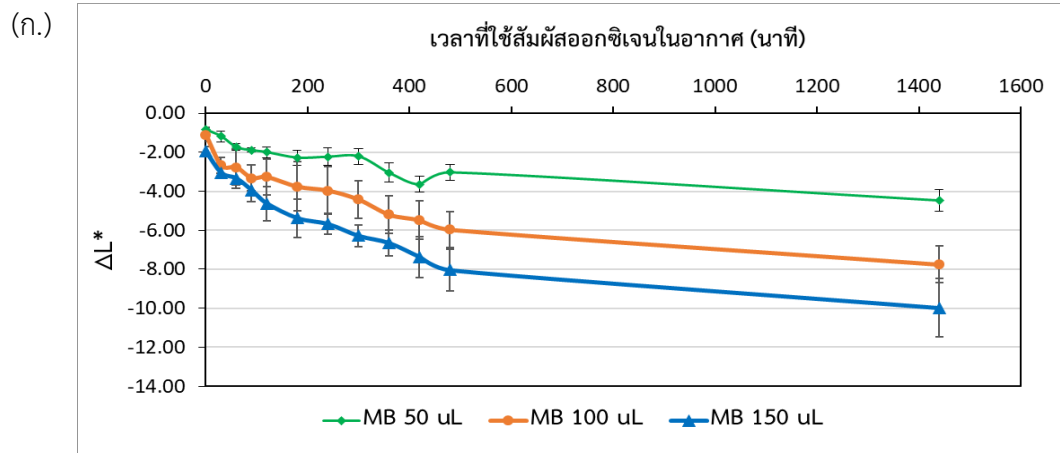
#### 4.7 ทดสอบความว่องไวต่อออกซิเจนของลูโคเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของฟิล์ม

การทดสอบความว่องไวต่อออกซิเจนของฟิล์ม สามารถทำได้โดยการดูดซับลูโคเมทิลีนบลู (รูปรีดิวซ์ของเมทิลีนบลู) (ดูรูปที่ 3.3) ไว้บนพื้นผิวของฟิล์มพอลิยูรีเทนที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต เนื่องจากลูโคเมทิลีนบลูมีประจุบวกอยู่บนโครงสร้างจึงสามารถเข้าทำอันตรกิริยาไอออน-ไอออนกับประจุลบของคองโกเรตที่อยู่บนพื้นผิวของฟิล์มได้และส่งผลให้ฟิล์มมีลักษณะใสไม่มีสี ซึ่งลักษณะและโครงสร้างของฟิล์มที่ดูดซับลูโคเมทิลีนบลูไว้บนพื้นผิวก่อนสัมผัสออกซิเจนในอากาศแสดงดังรูปที่ 4.16 (ก.) แต่เมื่อนำฟิล์มมาสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ฟิล์มจะเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีฟ้า เนื่องจากลูโคเมทิลีนบลูสามารถถูกออกซิไดซ์แล้วเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปเมทิลีนบลูที่มีสีฟ้าดังเดิมได้ ซึ่งลักษณะและโครงสร้างของฟิล์มหลังสัมผัสออกซิเจนในอากาศแสดงดังรูปที่ 4.16 (ข.) ลักษณะฟิล์มหลังสัมผัสออกซิเจนที่เวลาต่าง ๆ แสดงดังภาคผนวกตารางที่ จ-1

ในขั้นตอนนี้ได้เลือกฟิล์มสูตร H4C1R ในสภาวะกรด ซึ่งเป็นสูตรฟิล์มที่มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมทิลีนบลูสูงที่สุด และเลือกสารละลายเมทิลีนบลูในสภาวะเบส ซึ่งเป็นสภาวะที่เอื้อต่อการดูดซับเมทิลีนบลูสูงที่สุดมาทดสอบความว่องไวต่อออกซิเจนของลูโคเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของฟิล์ม แล้ววิเคราะห์ผลการทดสอบผ่านการวิเคราะห์เฉดสีที่เปลี่ยนแปลงไปของฟิล์ม ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงเฉดสีของฟิล์มหลังสัมผัสออกซิเจนที่เวลาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.17



**รูปที่ 4.16** ลักษณะและโครงสร้างของฟิล์มพอลิยูรีเทนสูตรปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรตที่ผ่านการดูดซับโคลิเมทิลีนบลูปริมาณ 150 ไมโครลิตร ไวบนพื้นผิว (ก.) ก่อนสัมผัสออกซิเจน และ (ข.) หลังสัมผัสออกซิเจน 1440 นาที



รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงค่าเฉดสีของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด หลังผ่านการดูดซับลูโคเมทิลีนบลู ปริมาณ 50, 100, 150 ไมโครลิตร แล้วตั้งให้สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศที่เวลาต่าง ๆ (ก.) ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), (ข.) ผลต่างของเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) และ (ค.) เฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ )

จากรูปที่ 4.17 (ก.) พบว่าค่า  $\Delta L^*$  ของฟิล์มหลังผ่านการทดสอบด้วยลูโคเมทิลีนบลูปริมาณ 50-150 ไมโครลิตร มีค่าติดลบ หมายความว่าหลังจุ่มฟิล์มในสารละลายลูโคเมทิลีนบลู ฟิล์มที่ได้เริ่มมีความสว่างน้อยลงหรือมีความทึบมากขึ้น และเมื่อตั้งฟิล์มทิ้งไว้ให้สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ฟิล์มที่ได้มีความทึบมากขึ้นตามเวลาที่ตั้งทิ้งไว้ที่นานขึ้น และเมื่อปรับปริมาณเมทิลีนบลูสูงขึ้น ค่า  $\Delta L^*$  ของฟิล์มหลังการทดสอบมีค่าติดลบมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่าความเข้มข้นของเมทิลีนบลูและเวลาที่ใช้สัมผัสออกซิเจนในอากาศส่งผลต่อค่าความสว่างของฟิล์มโดยตรง จากรูปที่ 4.17 (ข.) และ (ค.) ค่า  $\Delta a^*$  และ  $\Delta b^*$  มีค่าติดลบ แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีเฉดสีแดงจางลง และมีเฉดสีน้ำเงินเข้มขึ้น ตามลำดับ เนื่องจากฟิล์มตั้งต้นมีเฉดสีแดงซึ่งเป็นผลมาจากการต่อกิ่งคองโกเรตบนพื้นผิวของฟิล์ม แต่เมื่อคองโกเรตเกิดอันตรกิริยาไอออน-ไอออนกับลูโคเมทิลีนบลู และลูโคเมทิลีนบลูถูกออกซิไดซ์มาอยู่ในรูปเมทิลีนบลู ซึ่งเป็นรูปที่มีสีน้ำเงิน จึงส่งผลให้ฟิล์มมีเฉดสีแดงจางลง และมีเฉดสีน้ำเงินเข้มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า  $\Delta b^*$  มีค่าติดลบมากขึ้น ตามปริมาณเมทิลีนบลูที่สูงขึ้นและเวลาที่สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศที่นานขึ้น จากผลการทดสอบเบื้องต้นทำให้ทราบว่าฟิล์มที่เตรียมขึ้นมีความว่องไวต่อออกซิเจน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุตรวจจับออกซิเจนได้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมตัวตรวจจับออกซิเจนจากเมทิลีนบลูโดยใช้ฟิล์มพอลิยูรีเทนที่มีองค์ประกอบของน้ำมันละหุ่งและตอกิ่งบนพื้นผิวด้วยคองโกเรตเป็นวัสดุรองรับ จากนั้นนำฟิล์มที่เตรียมได้มาพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR ในโหมด ATR วัดเฉดสีของฟิล์มด้วยเครื่องวัดสี, พิสูจน์คองโกเรตบนฟิล์มด้วยเทคนิค UV-Visible, วัดค่ามุมสัมผัสระหว่างฟิล์มกับน้ำกลั่น, ศึกษาการดูดซับเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของฟิล์ม และทดสอบความว่องไวต่อออกซิเจนของลูโคเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของฟิล์ม ซึ่งจากการทดสอบต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังนี้

#### - การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์ม

จากการนำฟิล์มพอลิยูรีเทนที่อัตราส่วนโดยโมล -NCO/-OH เป็น 1:1, 2:1, 4:1, 6:1 และ 8:1 มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนตสูงขึ้น ทำให้มีหมู่ไอโซไซยาเนตที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยาเหลืออยู่บนฟิล์ม และจากการวิเคราะห์ฟิล์มที่ผ่านการตอกิ่งด้วยคองโกเรต ไม่พบพีคการสั่นแบบดิงยัดของ  $N=C=O$

#### - การวัดสีของฟิล์ม

ผลการวัดเฉดสีของฟิล์ม พบว่าการตอกิ่งบนพื้นผิวของฟิล์มด้วยคองโกเรตทำให้ฟิล์มที่ได้มีความทึบมากขึ้น และในขณะเดียวกันยังพบว่าฟิล์มมีเฉดสีแดงและเฉดสีเหลืองเพิ่มขึ้น

#### - การพิสูจน์คองโกเรตบนฟิล์ม

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Visible พบพีคการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 490 นาโนเมตร บนสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มที่ผ่านการตอกิ่งด้วยคองโกเรต ซึ่งใกล้เคียงกับความยาวคลื่นที่สามารถดูดกลืนแสงได้สูงสุดของคองโกเรต

#### - การวัดค่ามุมสัมผัส

จากผลการทดสอบพบว่า การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลของไอโซไซยาเนตให้สูงขึ้นและการตอกิ่งคองโกเรตบนพื้นผิวของฟิล์ม ส่งผลให้ฟิล์มมีค่ามุมสัมผัสลดลงเล็กน้อย หรือมีความชอบน้ำมากขึ้น

- การดูดซับเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของฟิล์ม

ผลการวิเคราะห์พบว่าฟิล์มสูตร H4C1R ในสภาวะกรด มีประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูในสภาวะเบสดีที่สุด โดยการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายเมทิลีนบลูที่สูงขึ้น

- การทดสอบความว่องไวต่อออกซิเจนของลูโคเมทิลีนบลูบนพื้นผิวของฟิล์ม

จากการทดสอบพบว่า การดูดซับลูโคเมทิลีนบลูไว้บนพื้นผิวของฟิล์มพอลิยูรีเทนแล้วตั้งทิ้งไว้ให้สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ ส่งผลให้ฟิล์มมีความทึบมากขึ้น มีเฉดสีแดงจางลง และมีเฉดสีน้ำเงินเข้มขึ้น โดยลักษณะของฟิล์มหลังสัมผัสออกซิเจนที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่าจะเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีน้ำเงิน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) เปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในการรองรับเมทิลีนบลูให้เป็นวัสดุทางชีวภาพ
- 2) นำวัสดุที่เตรียมได้มาพัฒนาเป็นวัสดุตรวจวัดออกซิเจน และนำไปทดลองใช้จริง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Quaranta, M. Borisov, S.M. and Klimant, I. 2012. "Indicators for optical oxygen sensors." *Bioanalytical reviews*. 4 : 115-157.
- [2] Wang, X.D. and Wolfbeis, O.S. 2014. "Optical methods for sensing and imaging oxygen: materials, spectroscopies and applications." *Chemical Society Reviews*. 43 : 3666-3761.
- [3] Galagan, Y. Hsu, S.H. and Su, W.F. 2010. "Monitoring time and temperature by methylene blue containing polyacrylate film." *Sensors and Actuators B: Chemical*. 144 : 49-55.
- [4] Hablot, E. Zheng, D. Bouquey, M. and Averous, L. 2008. "Polyurethanes based on castor oil: kinetics, chemical, mechanical and thermal properties." *Macromolecular Materials and Engineering*. 293 : 922-929.
- [5] Alaa, M.A. Yusoh, K. and Hasany, S.F. 2015. "Pure polyurethane and castor oil based polyurethane: synthesis and characterization." *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 8 : 1507-1515.
- [6] Luong, N.D. Sinh, L.H. Minna, M. Jürgen, W. Torsten, W. Matthias, S. and Jukka, S. 2016. "Synthesis and characterization of castor oil-segmented thermoplastic polyurethane with controlled mechanical properties." *European Polymer Journal*. 81 : 129-137.
- [7] Petrović, Z.S. 2008. "Polyurethanes from vegetable oils." *Polymer Reviews*. 48 : 109-155.
- [8] Gómez Jiménez, M.A. Rivera Armenta, J.L. Mendoza Martínez, A.M. Robledo Muñiz, J.G. Rangel Vazquez, N.A. and Terres Rojas, E. 2009. "Interpenetrating polymer networks based on castor oil polyurethane/cellulose derivatives and polyacrylic acid." *Latin American Applied Research*. 39 : 131-136.
- [9] Ibrahim, S. Ahmad, A. and Mohamed, N.S. 2015. "Characterization of novel castor oil-based polyurethane polymer electrolytes." *Polymers*. 7 : 747-759.
- [10] Lee, T.S. and Yang, C. 1999. "Synthesis of Congo Red linked with alkyl amide polymer and its optical ion-sensing property." *Polymer Bulletin*. 42(6) : 655-660.
- [11] Lobnik, A. Turel, M. and Urek, Š.K. 2014. "Optical Chemical Sensors: Design and Applications." *Advances in Chemical Sensors*. : 3-28.

- [12] Mills, A. 2005. "Oxygen indicators and intelligent inks for packaging food." *Chemical Society Reviews*. 34 : 1003-1011.
- [13] จีรวรรณ พิจารณ์, วาสนา พันชน, มิกิ กัณณะ, สราวุฒิ สมนาม และสัมพันธ์ วงศ์นาวา. 2558. "การฟอกสีสารละลายสีย้อมผสม (เมทิลีนบลูและเมทิลออเรนจ์) ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน." *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*. 20(1) : 174-185
- [14] Siddiquee, S. Rovina, K. Yusof, N.A. Rodrigues, K.F. and Suryani, S. 2014 "Nanoparticle-enhanced electrochemical biosensor with DNA immobilization and hybridization of *Trichoderma harzianum* gene." *Sensing and Bio-Sensing Research*. 2 : 16-22
- [15] ปาณิศา มลิณฑานุช. 2559. "การพัฒนาตัวตรวจวัดคอปเปอร์ไอออนจากอนุพันธ์โรดามีนและพอลิเมอร์ชีวภาพ." *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*.
- [16] Wolfbeis, O.S. 1991. **Fiber Optic Chemical Sensors and Biosensors**. Boca Raton : CRC Press.
- [17] Lobnik, A. Oehme, I. Murkovic, I and Wolfbeis, O.S. 1998. "pH optical sensors based on solgels: Chemical doping versus covalent immobilization." *Analytica Chimica Acta*. 367 : 159-165
- [18] Randall, D. 2002. **The polyurethanes book**. New York : Distributed by John Wiley & Sons.
- [19] Ozaki, S. 1972. "Recent Advances in Isocyanate Chemistry." *Chemical Reviews*. 72 : 457-496.
- [20] Bernardini, J. Licursi, D. Anguillesi, I. Cinelli, P. Coltelli, M.B. Antonetti, C. Raspolli Galletti, A.M. and Lazzeri, A. 2017. "Exploitation of *Arundo donax* L. Hydrolysis Residue for the Green Synthesis of Flexible Polyurethane Foams." *BioResources*. 12 : 3630-3655.
- [21] Reghunadhan, A. and Thomas, S. 2017. "CHAPTER 1 Polyurethanes: Structure, Properties, Synthesis, Characterization, and Applications." *Polyurethane Polymers: Blends and Interpenetrating Polymer*. : 1-16.
- [22] Avar, G. Meier, W.U. Casselmann, H. and Achten, D. 2012. "Polyurethanes." *Polymer Science: A Comprehensive Reference*. 10 : 411-441.
- [23] Hepburn, C. **Polyurethane Elastomers**. London and New York : Applier Science Publishers.

- [24] Wirpasza, Z. 1993. **Polyurethanes: Chemistry, Technology and Applications.** U.S.A. : Ellis Horwood Ltd.
- [25] อรุษา สรวารี. 2542. **สารเคลือบผิว.** กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [26] Guner, F.S. Yağci, Y. and Erciyas, A.T. 2006. “ Polymers from triglyceride oils.” *Progress in polymer science.* 31 : 633-670.
- [27] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนานนท์. 2561. **Fatty acid / กรดไขมัน.** [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0800/fatty-acid>.
- [28] อนุสรณ เชิดทอง. 2561. **บทที่ 4 ลิพิดและกรดไขมัน.** [Online]. Available : <https://ag2.kku.ac.th/eLearning/137748/Doc%5CChapter%204%20Lipid%20and%20fatty%20acid.pdf>
- [29] วิกิพีเดีย. 2561. **กรดไขมันอิ่มตัว.** [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/กรดไขมันอิ่มตัว>
- [30] วิกิพีเดีย. 2561. **กรดไขมัน.** [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/กรดไขมัน>
- [31] American Society for Testing and Materials. 1998. **Standard Test Method for Acid Value of Organic Coating Materials : ASTM D 1639.** Annual Books of ASTM standards. 06.03 : 323-324.
- [32] American Society for Testing and Materials. 1998. **Standard Test Method for Saponification Value of Drying Oils, Fatty Acids, and Polymerized Fatty Acids : ASTM D 1962.** Annual Books of ASTM standards. 06.03 : 396-397.
- [33] American Society for Testing and Materials. 1998. **Standard Test Method for Hydroxyl Value of Fatty Oils and Acids : ASTM D 1957.** Annual Books of ASTM standards. 06.03 : 389-390.
- [34] เดลินิวส์. 2559. **ละหุ่ง – เรื่องน่ารู้.** [Online]. Available : <https://www.dailynews.co.th/agriculture/381099>
- [35] ฐานข้อมูลเครื่องยาสมุนไพร คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2561. **ละหุ่ง.** [Online]. Available : <http://www.thaicrudedrug.com/main.php?action=viewpage&pid=118>
- [36] Wikipedia. 2018. **Castor oil.** [Online]. Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/Castor\\_oil](https://en.wikipedia.org/wiki/Castor_oil)
- [37] Patel, V.R. Dumancas, G.G. Kasi Viswanath, L.C. Maples, R. and Subong, B.J. 2016. “ Castor Oil: Properties, Uses, and Optimization of Processing Parameters in Commercial Production.” *Lipid Insights.* 9 : 1-12.

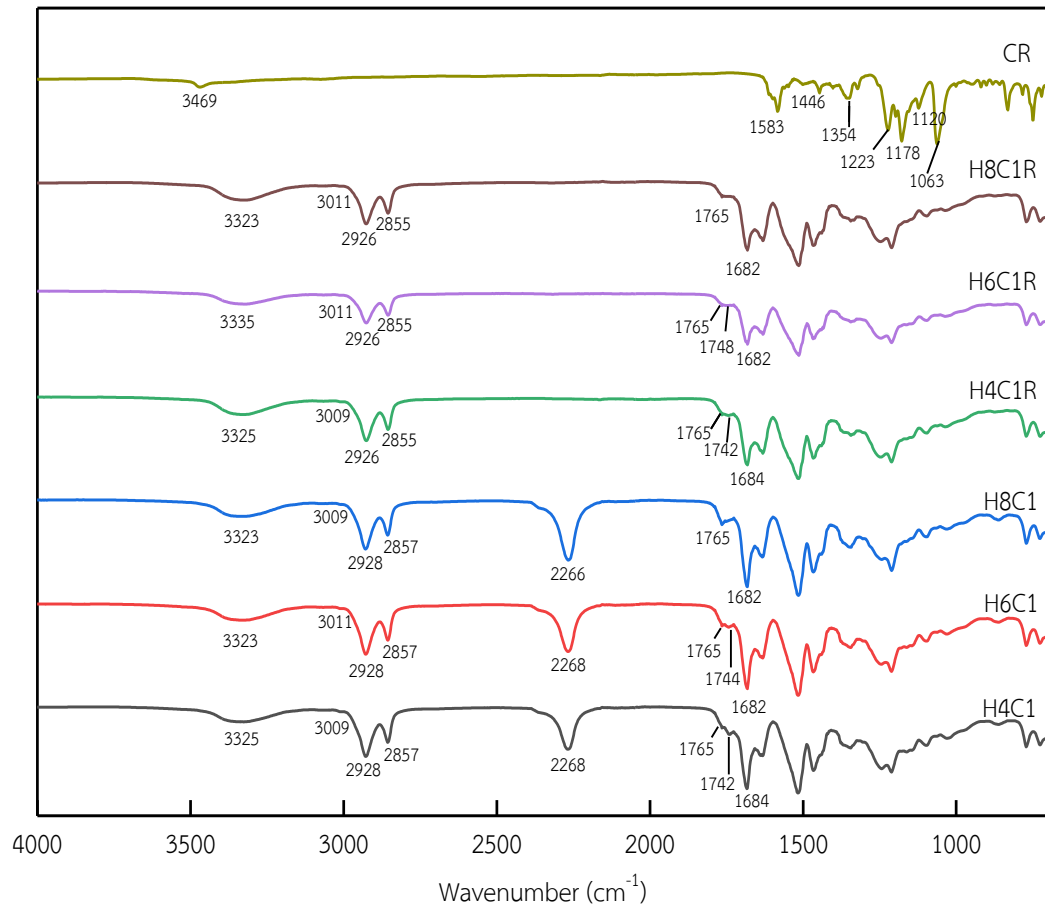
- [38] Ivanova, E. 2018. **Types of Castor Oil How Various Types of Castor Oil Are Made.** [Online]. Available : <https://www.castoroilreview.com/products/castor-oil-types/>
- [39] Bowonsak, O. 2561. **ตัวเร่งปฏิกิริยา.** [Online]. Available : <http://www.thaigoodview.com/library/teachershow/nongkhai/onuma-b/chemical/sec01p16.htm>
- [40] Houghton, R.P. and Mulvaney, A.W. 1996. "The role of  $\mu$ -hydroxy and  $\mu$ -alkoxy binuclear complexes in tin(IV)-catalysed urethane formation." *Journal of Organometallic Chemistry.* 517 : 107-113.
- [41] Wikipedia. 2017. **Dibutyltin dilaurate.** [Online]. Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/Dibutyltin\\_dilaurate](https://en.wikipedia.org/wiki/Dibutyltin_dilaurate)
- [42] Ikada, Y. 1994. "Surface modification of polymers for medical applications." *Biomaterials.* 15 : 725-736.
- [43] Bhattacharyya, A. Mukherjee, D. Mishra, R. and Kundu, P.P. 2017. "Preparation of polyurethane–alginate/chitosan core shell nanoparticles for the purpose of oral insulin delivery." *European Polymer Journal.* 92 : 294–313.
- [44] Chung, Y.C. Bae, J.C. Choi, J.W. and Chun, B.C. 2018. "The Grafting of Phenolphthalein or 4-Tritylaniline onto Polyurethane and the Comparison of Their Effects on Tensile and Shape Recovery Properties and Flexibility at Low Temperature of the Resulting Polymers." *Macromolecular Research.* 26(1) : 66-76.
- [45] Macocinschi, D. Filip, D. Vlad, S. Tuchilus, C.G. Cristian, A.F. and Barboiu, M. 2014. "Polyurethane/ $\beta$ -cyclodextrin/ciprofloxacin composite films for possible medical coatings with antibacterial properties." *Journal of Materials Chemistry B.* 6 : 681-690.
- [46] Wan, T. Chen, D. and Bai, X. 2016. "Preparation and relative properties of doped polyurethane modified by  $\beta$ -cyclodextrin." *Dyes and Pigments.* 129 : 18-23.
- [47] Kahlert, H. Meyer, G. and Albrecht, A. 2016. "Colour maps of acid–base titrations with colour indicators: how to choose the appropriate indicator and how to estimate the systematic titration errors." *ChemTexts.* : 1-28.
- [48] Abd-Elmottaleb, M. Hammad, H.A. Shaaban, S.M. and El-dosoky, M. 1996. "Electrical conductivity and phase transition studies of some selected congo-metal complexes." *Journal of Thermal Analysis.* 46 : 1459-1466.

- [49] Oprea, S. and Potolinca, V.O. 2013. "Synthesis and characterization of linear and cross-Linked cyclodextrin polyurethane elastomers." *Polymer Plastics Technology and Engineering*. 52 : 1550–1556.
- [50] Bai, S. Khakhar, D.V. and Nadkarni, V.M. 1997. " Mechanical properties of simultaneous interpenetrating polymer networks of castor oil based polyurethane and polystyrene." *Polymer*. 38 : 4319-4323.
- [51] Gurunathan, T. Mohanty, S. and Nayak, S.K. 2015. "Isocyanate terminated castor oil-based polyurethane prepolymer : Synthesis and characterization." *Progress in Organic Coatings*. 80 : 39–48.
- [52] Macalino, A.D. Salen, V.A. and Reyes, L.Q. 2017. "Castor Oil Based Polyurethanes: Synthesis and Characterization." **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 229**.
- [53] Yahia, I.S. and Keshk, S. 2017. "Preparation and characterization of PVA/Congo red polymeric composite films for a wide scale laser filters." *Optics & Laser Technology*. 90 : 197–200.
- [54] Plater, M.J. 2003. "A degradation product of methylene blue." *ARKIVOC*. : 37-42

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### การพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มสูตรต่าง ๆ ด้วยเทคนิค FTIR



รูป ก-1 อินฟราเรดสเปกตร้าของฟิล์มพอลิยูรีเทนแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิวเปรียบเทียบกับแบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต

## ภาคผนวก ข

### ค่ามุมสัมผัสของฟิล์ม

ตารางที่ ข-1 ค่ามุมสัมผัสของฟิล์มแบบไม่ปรับปรุงพื้นผิวและแบบปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต

สูตร	Contact angle (degree)																			
	ชั้นที่ 1						ชั้นที่ 2						ชั้นที่ 3						ค่าเฉลี่ย	SD
	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 3			
	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา	ซ้าย	ขวา
H1C1	88.5	88.2	88.3	87.6	89.5	89.7	87.7	88.1	89.5	89.2	90.3	89.7	88.7	87.7	90.2	89.7	88.2	89.2	88.9	0.9
H2C1	84.6	85.3	84.2	85.1	86.4	86.3	87.7	86.4	84.9	82.3	84.6	83.7	84.1	84.7	83.4	83.6	85.2	85.8	84.9	1.3
H4C1	84.7	84.5	83.0	81.7	83.6	83.9	86.4	85.9	82.7	81.3	81.9	81.7	79.5	78.8	80.9	80.0	-	-	82.5	2.2
H6C1	81.9	80.9	83.4	82.8	83.5	84.7	82.2	81.7	82.8	83.0	82.4	82.6	83.9	82.6	79.4	80.2	-	-	82.4	1.4
H8C1	83.0	84.0	82.5	83.1	81.6	82.2	82.1	82.5	79.7	81.3	83.4	82.9	83.3	83.8	81.4	79.8	-	-	82.3	1.3
H4C1R	79.4	79.1	79.7	78.1	79.3	78.9	80.9	79.8	81.4	79.6	79.1	79.8	78.8	79.6	80.9	80.7	80.8	81.2	79.8	0.9
H6C1R	79.8	81.1	81.8	81.3	79.3	79.4	80.5	80.4	82.1	79.3	81.5	80.6	80.5	80.8	81.4	82.2	79.9	78.7	80.6	1.0
H8C1R	79.8	78.4	80.8	79.9	81.6	81.4	79.0	81.1	78.3	78.7	80.5	82.5	81.9	81.7	80.6	81.3	-	-	80.5	1.3

## ภาคผนวก ค

### ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์ม

ตารางที่ ค-1 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงจากการดูดซับเมทิลีนบลูบนฟิล์มสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิว (H4C1, H6C1 และ H8C1) และสูตรปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกรีต (H4C1R, H6C1R และ H8C1R) ที่เวลาต่าง ๆ

สูตร	Absorbance difference (A.U.)				
	5 นาที	15 นาที	30 นาที	60 นาที	1440 นาที
H4C1	0.0	0.0059±0.002	0.0051±0.002	0.0116±0.001	0.0398±0.005
H6C1	0.0	0.0	0.0111±0.002	0.0157±0.003	0.0411±0.004
H8C1	0.0	0.0	0.0	0.0118±0.008	0.0488±0.008
H4C1R	0.0143±0.001	0.0145±0.005	0.0402±0.009	0.0424±0.008	0.0497±0.008
H6C1R	0.0109±0.004	0.0124±0.001	0.0108±0.003	0.0159±0.001	0.0484±0.006
H8C1R	0.0086±0.003	0.0110±0.001	0.0052±0.005	0.0028±0.002	0.0331±0.008

ตารางที่ ค-2 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด (H4C1R(A)) ปกติ (H4C1R) และเบส (H4C1R(B)) ที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลู 100 ppm ในสภาวะกรด ปกติ และเบส

สูตร	Absorbance difference (A.U.)		
	MB (Acid)	MB (Normal)	MB (Base)
H4C1	0.0	0.0387±0.001	0.1670±0.042
H4C1R	0.0	0.0318±0.004	0.2421±0.009
H4C1R(A)	0.0	0.0299±0.010	0.3395±0.038
H4C1R(B)	0.0	0.0377±0.015	0.1757±0.020

ตารางที่ ค-3 ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด ที่ผ่านการดูดซับ เมทิลีนบลูความเข้มข้น 10, 50, 100, 500 และ 1000 ppm สภาวะเบส

Concentration of Methylene blue (ppm)	Absorbance difference (A.U.)
10	0.1479±0.017
50	0.2113±0.028
100	0.3395±0.038
500	0.4995±0.044
1000	0.5372±0.095

## ภาคผนวก ง

### ค่าเฉลี่ยของฟิล์ม

ตารางที่ ง-1 ค่าความสว่าง ( $L^*$ ), เฉดสีเขียว-แดง ( $a^*$ ) และเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $b^*$ ) ของฟิล์มพอลิยูรีเทนสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิว (H4C1, H6C1 และ H8C1) และสูตรปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต (H4C1R, H6C1R และ H8C1R)

สูตร	$L^*$	$a^*$	$b^*$
H4C1	90.32±0.0	2.26±0.2	-12.25±0.2
H6C1	90.22±0.2	1.55±0.2	-11.89±0.3
H8C1	90.59±0.1	1.46±0.2	-10.45±0.0
H4C1R	88.30±0.2	4.34±0.2	-8.23±0.1
H6C1R	88.36±0.3	4.84±0.3	-7.23±0.3
H8C1R	87.87±0.2	5.39±0.3	-5.60±0.4

ตารางที่ ง-2 ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ) ของฟิล์มสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิว (H4C1, H6C1 และ H8C1) และสูตรปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต (H4C1R, H6C1R และ H8C1R) หลังผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูที่เวลาต่าง ๆ

สูตร	$\Delta L^*$				
	5 นาที	15 นาที	30 นาที	60 นาที	1440 นาที
H4C1	-0.55±0.1	-0.66±0.2	-0.69±0.2	-1.03±0.0	-1.53±0.5
H6C1	-0.35±0.1	-0.05±0.0	-0.28±0.1	-0.55±0.3	-0.56±0.3
H8C1	-0.83±0.1	-0.84±0.2	-0.71±0.1	-0.69±0.1	-1.27±0.2
H4C1R	0.71±0.1	0.07±0.0	-0.27±0.2	-0.95±0.3	-2.47±0.7
H6C1R	-0.44±0.1	-0.58±0.2	-0.60±0.2	0.24±0.2	-0.53±0.2
H8C1R	0.19±0.1	-0.26±0.0	-0.86±0.1	-1.67±0.3	-1.98±0.2

ตารางที่ ง-3 ผลต่างของค่าเฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) ของฟิล์มสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิว (H4C1, H6C1 และ H8C1) และสูตรปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต (H4C1R, H6C1R และ H8C1R) หลังผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูที่เวลาต่าง ๆ

สูตร	$\Delta a^*$				
	5 นาที	15 นาที	30 นาที	60 นาที	1440 นาที
H4C1	0.51±0.0	-0.01±0.0	-0.02±0.0	0.36±0.1	-0.93±0.3
H6C1	0.16±0.0	-0.03±0.2	0.06±0.1	-0.49±0.2	-0.20±0.2
H8C1	1.05±0.1	0.93±0.1	0.56±0.1	0.53±0.1	-0.92±0.2
H4C1R	-1.64±0.0	-1.39±0.2	-0.60±0.2	-0.80±0.6	-1.86±0.4
H6C1R	0.01±0.1	0.03±0.1	-0.47±0.2	-1.13±0.2	-2.32±0.3
H8C1R	-1.40±0.3	-0.16±0.0	-0.10±0.1	0.41±0.2	0.33±0.2

ตารางที่ ง-4 ผลต่างของค่าเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) ของฟิล์มสูตรไม่ปรับปรุงพื้นผิว (H4C1, H6C1 และ H8C1) และสูตรปรับปรุงพื้นผิวด้วยคองโกเรต (H4C1R, H6C1R และ H8C1R) หลังผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูที่เวลาต่าง ๆ

สูตร	$\Delta b^*$				
	5 นาที	15 นาที	30 นาที	60 นาที	1440 นาที
H4C1	-0.92±0.0	-1.34±0.2	-0.94±0.3	-1.14±0.1	-1.29±0.7
H6C1	-0.83±0.0	-0.72±0.2	-0.79±0.0	-0.22±0.1	-0.34±0.1
H8C1	-1.12±0.1	-1.06±0.2	-1.06±0.1	-0.89±0.1	-1.03±0.2
H4C1R	0.99±0.0	0.17±0.1	-0.72±0.3	-1.36±0.4	-3.59±0.8
H6C1R	-0.42±0.1	-0.71±0.1	-0.46±0.2	0.30±0.1	-0.69±0.2
H8C1R	0.56±0.1	0.05±0.2	-1.45±0.2	-2.54±0.5	-3.04±0.5

ตารางที่ ง-5 ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), เฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) และเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) ของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด (H4C1R(A)) ปกติ (H4C1R) และเบส (H4C1R(B)) ที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลู 100 ppm ในสภาวะกรด ปกติ และเบส

สูตร	$\Delta L^*$			$\Delta a^*$			$\Delta b^*$		
	MB (Acid)	MB (Normal)	MB (Base)	MB (Acid)	MB (Normal)	MB (Base)	MB (Acid)	MB (Normal)	MB (Base)
H4C1	-0.05±0.1	-0.49±0.0	-3.66±0.2	-0.17±0.0	-0.46±0.0	-7.80±0.9	-0.26±0.4	-1.15±0.1	-5.17±0.9
H4C1R	-0.26±0.2	-0.49±0.4	-3.50±0.5	-0.37±0.2	-0.98±0.4	-6.59±0.2	-0.24±0.4	-0.67±0.3	-5.03±0.6
H4C1R (A)	-0.15±0.0	-1.11±0.3	-6.20±1.3	-1.41±0.2	-0.58±0.4	-7.42±1.4	-0.82±0.2	-2.33±0.4	-8.98±1.7
H4C1R (B)	0.57±0.4	-0.95±0.3	-2.60±0.2	-1.17±0.3	-0.56±0.4	-6.34±0.3	0.56±0.5	-2.07±0.2	-4.51±1.2

ตารางที่ ง-6 ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), เฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) และเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) ของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด ที่ผ่านการดูดซับเมทิลีนบลูความเข้มข้น 10, 50, 100, 500 และ 1000 ppm สภาวะเบส

Concentration of Methylene blue (ppm)	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$
	MB (Acid)	MB (Acid)	MB (Acid)
10	-0.99±0.2	-5.40±0.4	-2.14±0.2
50	-3.07±0.7	-6.33±0.5	-4.89±0.5
100	-6.20±1.3	-7.42±1.4	-8.98±1.7
500	-9.65±1.9	-7.66±1.7	-13.05±2.3
1000	-12.58±1.6	-4.20±1.2	-16.36±2.1

ตารางที่ ง-7 ผลต่างของค่าความสว่าง ( $\Delta L^*$ ), เฉดสีเขียว-แดง ( $\Delta a^*$ ) และเฉดสีน้ำเงิน-เหลือง ( $\Delta b^*$ ) ของฟิล์มสูตร H4C1R สภาวะกรด หลังผ่านการดูดซับลูโค เมทิลีนบลูปริมาณ 50, 100 และ 150 ไมโครลิตร แล้วตั้งให้สัมผัสออกซิเจนในอากาศที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาที)	$\Delta L^*$			$\Delta a^*$			$\Delta b^*$		
	MB 50 uL	MB 100 uL	MB 150 uL	MB 50 uL	MB 100 uL	MB 150 uL	MB 50 uL	MB 100 uL	MB 150 uL
0	-0.85±0.1	-1.10±0.4	-1.96±0.2	-0.21±0.1	-0.94±0.7	-0.43±0.2	-1.90±0.1	-1.37±0.8	-1.97±0.2
30	-1.19±0.3	-2.67±0.4	-3.06±0.2	-1.23±0.4	-1.98±0.3	-2.61±0.2	-2.28±0.3	-3.33±0.2	-3.21±0.4
60	-1.74±0.2	-2.77±0.9	-3.34±0.5	-1.30±0.2	-2.35±0.3	-3.19±0.2	-2.90±0.2	-3.56±0.8	-3.32±0.5
90	-1.90±0.1	-3.32±0.7	-3.95±0.6	-1.87±0.3	-2.58±0.2	-3.23±0.2	-2.99±0.0	-3.92±0.7	-4.07±0.5
120	-2.00±0.3	-3.27±0.9	-4.63±0.9	-2.05±0.1	-3.13±0.1	-3.37±0.1	-3.02±0.3	-3.76±1.1	-4.80±0.7
180	-2.28±0.4	-3.76±1.3	-5.38±1.0	-2.55±0.2	-3.46±0.1	-3.41±0.2	-3.17±0.4	-3.50±0.2	-5.49±0.7
240	-2.23±0.5	-3.96±1.2	-5.68±0.5	-2.84±0.2	-3.70±0.1	-3.76±1.0	-3.06±0.4	-4.29±1.4	-5.99±0.4
300	-2.21±0.4	-4.42±0.9	-6.29±0.6	-3.44±0.1	-3.67±0.4	-3.80±1.4	-2.76±0.5	-4.88±1.0	-6.72±0.4
360	-3.05±0.5	-5.19±1.0	-6.65±0.7	-2.81±0.1	-3.26±0.7	-4.19±1.4	-4.06±0.6	-5.98±1.1	-7.21±0.7
420	-3.64±0.4	-5.48±1.0	-7.37±1.0	-2.56±0.3	-3.19±0.6	-3.94±0.8	-4.91±0.5	-6.56±1.0	-8.23±1.0
480	-3.03±0.4	-5.97±0.9	-8.04±1.1	-3.89±0.3	-3.46±0.2	-3.60±0.8	-4.04±0.5	-7.04±1.2	-9.11±0.9
1440	-4.46±0.5	-7.75±1.0	-9.97±1.5	-4.18±0.6	-3.86±0.5	-3.50±0.8	-6.87±0.8	-10.96±1.1	-13.47±1.6

## ภาคผนวก จ

### ลักษณะฟิล์ม

ตารางที่ จ-1 ลักษณะฟิล์มหลังสัมผัสออกซิเจนในอากาศที่เวลาต่าง ๆ

ปริมาณ MB (uL)	ก่อน ทดสอบ	0 นาที่	15 นาที่	30 นาที่	45 นาที่	60 นาที่	90 นาที่	120 นาที่	180 นาที่	240 นาที่	300 นาที่	360 นาที่	420 นาที่	480 นาที่	1440 นาที่
50															
100															
150															

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวนิตานาด ต้นตระภักดีธारा
วัน เดือน ปีเกิด	8 มีนาคม พ.ศ. 2534
ที่อยู่ปัจจุบัน	836 หมู่ 1 ถนน พนมพัฒนา ตำบล พนมสารคาม อำเภอสอง พนมสารคาม จังหวัด ฉะเชิงเทรา 24120
ประวัติการศึกษา	ปี 2556 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม-เครื่องมือวิเคราะห์ เกรดเฉลี่ย 3.17 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	Nisanat Tantrapakdeetara and Pathavuth Monvisade. "Surface Treatment of Castor oil-based polyurethane grafted Congo red films with Methylene blue for oxygen sensor application." The Proceeding of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-9), During June 13 <sup>th</sup> – 14 <sup>th</sup> , 2019 at Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand. : 38-43.
รางวัลที่ได้รับ	The best poster award, The International Polymer Conference of Thailand (PCT-9), During June 13 <sup>th</sup> – 14 <sup>th</sup> , 2019 at Amari Watergate Hotel, Bangkok, Thailand.