



การเตรียมพอลิยูรีเทนจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปรผสมพอลิเอทีลีนไกลคอลสำหรับการเคลือบผิว

นายธนรัช ยิ่งสถาพรอนันต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การเตรียมพอลิยูรีเทนจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปรผสมพอลิเอทิลีนไกลคอลสำหรับการเคลือบผิว



นายธนัช ยิ่งสถาพรอนันต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองโครงงานวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การเตรียมพอลิยูรีเทนจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปรผสมพอลิเอทีลีนไกลคอลสำหรับการเคลือบผิว

โดย นายธนรัช ยิ่งสถาพรอนันต์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ จันทน์วิวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร ไชยลาด)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพงษ์ สุขวิวัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริอร อิศรางกูร ณ อยุธยา)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธฤติมา ศรีตะปัญญะ)

ชื่อ : นายธนรัช ยิ่งสถาพรอนันต์
 ชื่อวิทยานิพนธ์ : การเตรียมพอลิยูรีเทนจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปรผสม
 พอลิเอทิลีนไกลคอลสำหรับการเคลือบผิว
 สาขาวิชา : เทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพงษ์ สุขวิพัฒน์
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริอร อิศรางกูร ณ อยุธยา
 ปีการศึกษา : 2568

บทคัดย่อ

พอลิยูรีเทนถูกสังเคราะห์จากพอลิโออลิโอฟอสเฟอระหว่างพอลิเอทิลีนไกลคอล 3,000 กรัม/โมล และน้ำมันปาล์มใช้แล้วดัดแปรในอัตราส่วน 50/50 ร่วมกับโพลีอินไดไฮโดรไซยาเนต โดยควบคุมดัชนีโไฮโดรไซยาเนตเท่ากับ 100 โดยใช้เอทิลีนไกลคอล เป็นสารขยายสายโซ่ที่ความเข้มข้นต่างกัน (0–5 โมล) จากผลสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดยืนยันการเกิดพันธะยูรีเทนและพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล การทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าการเติมเอทิลีนไกลคอลช่วยเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะโดยมีค่าสูงสุด 26.2 เมกะปาสคาล และมีค่าความเครียด ณ จุดขาดที่ 284 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้น 2 โมล การวิเคราะห์โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นพื้นผิวที่ยึดติดมีความขรุขระมากขึ้นเมื่อใช้เอทิลีนไกลคอลในปริมาณที่เหมาะสม รวมทั้งเพิ่มมุมสัมผัสน้ำและลดพลังงานพื้นผิวจาก 127 มิลลิจูล/ตารางเมตร เหลือ 12 มิลลิจูล/ตารางเมตร การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน บ่งบอกถึงการเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างส่วนแข็งและส่วนอ่อนและเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนเมื่อใช้เอทิลีนไกลคอลในปริมาณที่เหมาะสม (2 โมล) แต่ประสิทธิภาพลดลงเมื่อใช้เอทิลีนไกลคอลปริมาณมากกว่า 2 โมล เนื่องจากการแสดงผลเป็นพลาสติกไซเซชันและเกิดสายโซ่สั้น จากผลการทดสอบบ่งชี้ว่า เอทิลีนไกลคอลเป็นปัจจัยสำคัญในการปรับปรุงพอลิยูรีเทนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยต้องสร้างสมดุลระหว่างสมบัติการยึดเกาะ ความยืดหยุ่น สมบัติการเปื่อยผิผิว และความเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิยูรีเทน

(มีจำนวนทั้งสิ้น 69 หน้า)

คำสำคัญ : พอลิยูรีเทน, น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร, สารขยายสายโซ่

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Mr. Thanathach Yingshataporn-a-nan
Thesis Title : Preparation of Polyurethane from Modified Used
Palm Oil-based Polyol/Polyethylene Glycol Blend for
Coating Applications
Major Field : Mechanical Engineering Technology
King Mongkut's University of Technology North
Bangkok
Thesis Advisor : Associate Professor Dr. Nathapong Sukhawipat
Co-Advisor : Assistant Professor Dr. Siriorn Isarankura Na
Ayutthaya
Academic Year : 2025

ABSTRACT

Polyurethane was synthesized from a 50/50 polyol blend of polyethylene glycol and modified used palm oil, with toluene diisocyanate at control NCO index of 100. Ethylene glycol was employed as a chain extender (0–5 mol) to investigate its effects on chemical structure and properties. Fourier transform infrared (FTIR) spectra provided clear evidence of urethane bond formation and intermolecular hydrogen bonding in PU. Mechanical property testing revealed that addition of EG enhanced adhesion strength and elongation, with maximum values of 26.2 MPa and 284 % at EG 2 mol. Morphological analysis by scanning electron microscopy (SEM) showed rougher surfaces at 2 mol of EG content. Moreover, water contact angle increased, and surface energy decreased from 127 to 12 mJ/m². DSC/TGA analyses indicated enhanced hard–soft segment interactions and improved thermal stability at EG contents 2 mol, whereas EG at 3-5 mol reduced performance due to plasticization and short chain molecule. These results suggest that EG is a key factor in tailoring environmentally friendly PU, flexibility, wettability, and thermal stability.

(Total 69 Pages)

Keywords: Polyurethane, Modified Used Palm Oils, Chain extender

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จบรรลุเป้าหมายได้นั้น อันเนื่องมาจากความกรุณาช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย รวมถึงความสนาสามัคคีและความอุตสาหของผู้จัดทำ เนื่องด้วยเหตุที่มีข้อจำกัดหลายด้าน อาจส่งผลให้เกิดข้อผิดพลาด ทางคณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่าน และเป็นส่วนช่วยให้ผู้ที่มีความสนใจในการเตรียมพอลิยูรีเทนจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปรผสมพอลิเอทิลีนไกลคอลสำหรับการเคลือบผิว สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดได้ดียิ่งขึ้นต่อไป

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. นัฐพงษ์ สุขวิวัฒน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริอร อิศรางกูร ณ อยุธยา เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการ ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธฤติมา ศรีตะปัญญะ ซึ่งเป็นกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ในภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และขอขอบพระคุณประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร ไชยลาต ที่มีความเมตตาในการให้คำแนะนำ เป็นที่ปรึกษา ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นด้วยความเอาใจใส่อย่างยิ่ง และขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ใช้สถานที่และเครื่องมือต่างๆ ที่จำเป็นในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ได้อุปการะส่งเสริมในทุกเรื่อง ไม่เคยกดดันและเป็นกำลังใจเป็นแรงผลักดันให้มาโดยตลอด รวมถึงเพื่อนทุกๆ ท่านที่ได้ช่วยเหลือเกื้อกูลลงแรง ระดมความคิด เป็นกำลังใจและร่วมแสดงความคิดเห็นจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

ความดี ความสำเร็จทั้งปวงของการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบให้แก่ บิดา มารดา ครูบาอาจารย์ คณะผู้จัดทำ และผู้มีพระคุณทั้งหลายที่ได้ให้ความกรุณาช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา แนะนำและมอบวิชาความรู้ให้ตลอดมา

ธนรัช ยี่งสถาพรอนันต์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูปภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 สารเคลือบ (Coating)	5
2.2 พอลิยูรีเทน (Polyurethane)	5
2.3 พอลิออล	9
2.4 น้ำมันปาล์ม	15
2.5 น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว	16
2.6 ไดไอโซไซยาเนต	18
2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts)	21
2.8 สารขยายสายโซ่	22
2.9 การวิเคราะห์และทดสอบวัสดุ	22
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	28
3.1 สารเคมี	28
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	29
3.3 วิธีการทดลอง	30
3.4 วิธีการทดสอบ	31

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิจัย	36
4.1 ผลการตัดแปรรโครงสร้างของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว	36
4.2 ผลการทดสอบพอลิยูรีเทน	41
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุป	58
5.2 อภิปรายผล	59
5.3 ข้อเสนอแนะ	59
บรรณานุกรม	60
ภาคผนวก ก.	69
ภาคผนวก ข.	72



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 สรุปรายงานการเตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทน	8
2-2 สรุปรายงานการเตรียมพอลิยูรีเทนโดยใช้พอลิออลจากธรรมชาติ	12
2-3 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอมีนและการนำไปใช้งาน	21
2-4 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโลหะอินทรีย์ เกลือและการนำไปใช้งาน	22
3-1 สูตรการเตรียมพอลิยูรีเทนที่อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ	31
4-1 สมบัติของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว (UPO) น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร (mUPO)	37
4-2 สรุปลค่าน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วและน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร	40
4-3 สรุปลผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิยูรีเทนด้วยเจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟี	47
ก-1 คำนวณปริมาณการใช้สารที่เอทิลีนไกลคอล 0 โมล	70
ก-2 คำนวณปริมาณการใช้สารที่เอทิลีนไกลคอล 1 โมล	70
ก-3 คำนวณปริมาณการใช้สารที่เอทิลีนไกลคอล 2 โมล	70
ก-4 คำนวณปริมาณการใช้สารที่เอทิลีนไกลคอล 3 โมล	71
ก-5 คำนวณปริมาณการใช้สารที่เอทิลีนไกลคอล 4 โมล	71
ก-6 คำนวณปริมาณการใช้สารที่เอทิลีนไกลคอล 5 โมล	71

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2-1 โครงสร้างของพอลิยูรีเทน	5
2-2 ตัวอย่างปฏิกิริยาการเกิดพอลิยูรีเทน	6
2-3 โครงสร้างของพอลิออลเมื่อ R คือหน่วยซ้ำ (Repeating unit)	9
2-4 มอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์อะคริลิกพอลิออล	10
2-5 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์อะคริลิกพอลิออล	10
2-6 พอลิออลที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม	11
2-7 โครงสร้างของน้ำมันปาล์ม	15
2-8 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์	16
2-9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันปาล์ม	17
2-10 ไดไอโซไซยานเนตที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน	18
2-11 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของพอลิยูรีเทน	19
2-12 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของแต่ละตำแหน่ง	19
2-13 ภาพรวมของการเกิดปฏิกิริยาพันธะยูรีเทน	20
2-14 อันตรกิริยาของสารละลาย	21
2-15 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงเฉือน	25
3-1 ชุดอุปกรณ์สังเคราะห์พอลิออลจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว	29
4-1 ลักษณะทางกายภาพของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วและน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร	36
4-2 สเปกตรัมของฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว และน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร	38
4-3 ผลการวิเคราะห์นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตราและโครงสร้างทางเคมีของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วและน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร	39
4-4 ผลการวิเคราะห์เจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟีของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วและน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร	40
4-5 ลักษณะทางกายภาพของสารละลายพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลต่างกัน (EG0-EG5)	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-6 ผลการวิเคราะห์ความหนืดของสารละลายพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลต่างกัน (ก) กราฟความหนืด-อัตราเฉือน และ (ข) กราฟความหนืด-เวลา	42
4-7 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์พอร์มอินฟราเรด (ก) สเปกตรัมของพอลิยูรีเทน ที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลต่างกัน (ข) สเปกตรัมบริเวณหมู่ไฮดรอกซิล และ (ค) สเปกตรัมบริเวณหมู่คาร์บอนิล	44
4-8 ผลการวิเคราะห์นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตราและโครงสร้างทางเคมีของน้ำมัน ปาล์มที่ใช้แล้วตัดแปร และพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลที่ 0 และ 2 โมล (ก) ผลการทดสอบนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตราที่ละลายใน CDCl_3 (ข) โครงสร้างทางเคมีของพอลิยูรีเทนที่ไม่ได้ใส่เอทิลีนไกลคอล (EG0) และ (ค) โครงสร้าง ทางเคมีของพอลิยูรีเทนที่ใส่เอทิลีนไกลคอล 2 โมล (EG2)	46
4-9 ผลการวิเคราะห์เจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟีที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลต่างกัน	47
4-10 ผลการทดสอบพอลิยูรีเทนจากพอลิออลผสมที่มีเอทิลีนไกลคอลต่างกัน (ก) มอดูลัส กักเก็บ-ความถี่ และ (ข) มอดูลัสสูญเสีย-ความถี่	49
4-11 มุมสัมผัสน้ำและพลังงานพื้นผิวของสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณเอทิลีน ไกลคอลต่างกัน	50
4-12 ผลการทดสอบแรงเฉือนของพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลต่างกันโดยการ ทดสอบแรงเฉือน (ก) กราฟความเค้น-ความเครียด (ข) ความเค้นสูงสุด (ค) ความเครียด ณ จุดขาด และ (ง) มอดูลัสของยัง	52
4-13 ผลการทดสอบของพอลิยูรีเทนจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วตัดแปรและพอลิเอทิลีนไกลคอล ที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลต่างกัน หลังจากทดสอบแรงเฉือน	54
4-14 ตัวอย่างการเกิดอันตรกิริยาระหว่างแผ่นกระจกและสารเคลือบพอลิยูรีเทน (ก) ตัวอย่าง ที่มีเอทิลีนไกลคอลในปริมาณที่เหมาะสม และ (ข) ตัวอย่างที่มีเอทิลีนไกลคอลใน ปริมาณที่มากเกินไป	54
4-15 ผลการทดสอบสมบัติความร้อนของพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอล ต่างกันด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-16 ผลการวิเคราะห์การเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอล ต่างกัน (EG0-EG5) โดยใช้เทคนิควิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก	57
ข-1 การเข้าร่วมงานประชุมวิชาการ The International Polymer Conference of Thailand ครั้งที่ 15	73



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สารเคลือบ คือ สารที่ใช้เคลือบพื้นผิววัสดุเพื่อป้องกันหรือปรับปรุงสมบัติต่างๆ เช่น การป้องกันการกัดกร่อน การเพิ่มสมบัติเชิงกล ความเสถียรต่อความร้อน รวมทั้งเพิ่มความสวยงามให้กับพื้นผิว [1, 2] พอลิยูรีเทน (Polyurethane; PU) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการใช้เป็นสารเคลือบ เนื่องจากมีสมบัติที่หลากหลาย เช่น ความยืดหยุ่นสูง ความทนทานต่อการสึกกร่อน และความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของน้ำและอากาศ [3] พอลิยูรีเทนโดยทั่วไปสามารถเตรียมได้จากสองส่วนหลัก ได้แก่ ไดไอโซไซยาเนตและพอลิออล [4] โดยปกติแล้วพอลิยูรีเทนมีโครงสร้างทางเคมีเป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ (Block copolymer) ที่ประกอบไปด้วยส่วนอ่อนและส่วนแข็งสลับกัน [5] โดยพอลิออลจะทำหน้าที่เป็นส่วนอ่อน [6] ในขณะที่ไดไอโซไซยาเนตจะทำหน้าที่เป็นส่วนแข็งในโครงสร้างของพอลิยูรีเทน [7] โดยสมบัติของพอลิยูรีเทนขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างส่วนแข็งและส่วนอ่อนรวมทั้งจำนวนพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของพอลิยูรีเทน [7, 8, 9]

ด้วยสมบัติที่หลากหลายทำให้พอลิยูรีเทนจึงเหมาะสำหรับการนำมาใช้เป็นวัสดุเคลือบผิว อย่างไรก็ตาม พอลิยูรีเทนโดยส่วนใหญ่มักจะใช้พอลิออลจากแหล่งปิโตรเลียมมาใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน เช่น พอลิอีเทอร์และพอลิเอสเทอร์พอลิออล [10, 11, 12] ซึ่งเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไป รวมทั้งในปัจจุบันได้มีการผลักดันในการลดการใช้ทรัพยากรจำพวกนี้และหันไปใช้ทรัพยากรหมุนเวียนแทน จากสาเหตุนี้เองน้ำมันจากธรรมชาติ เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันละหุ่ง น้ำมันเรพซิด และน้ำมันปาล์ม จึงถูกนำมาใช้เป็นพอลิออลจากธรรมชาติโดยการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมีผ่านปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน การไกลโคไลซิส ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน และปฏิกิริยาเอทอกซิเลชันให้มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้าง [13, 14, 15, 16, 17] พอลิออลจากธรรมชาติมักจะนิยมใช้ในการทำโฟมพอลิยูรีเทน ฟิล์มพอลิยูรีเทนและสารเคลือบพอลิยูรีเทน

ในบรรดาน้ำมันพืชทั้งหมด น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันที่มีการบริโภคมากที่สุดเนื่องมาจากความต้านทานต่อการออกซิเดชันระหว่างการปรุงอาหาร อย่างไรก็ตามการนำน้ำมันปาล์มมาใช้ซ้ำในการประกอบอาหารส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพ [18, 19, 20] จึงได้มีการศึกษาค้นคว้าเพื่อแก้ไขปัญหาในการนำน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ หนึ่งในนั้นคือการดัดแปลงน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วให้เป็นพอลิออลเพื่อนำไปใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนจากทรัพยากรหมุนเวียน [18] เช่น ใช้ในการผลิตโฟมดูดซับเสียง [21]

คอมโพสิตดูดซับเสียงจากเส้นใยผักตบชวา [22] และกาวจากวัสดุธรรมชาติสำหรับแผ่นไม้อัดเป็นต้น [23]

อย่างไรก็ตาม พอลิออลจากน้ำมันพืชมักจะมีน้ำหนักสูงและมีหมู่ไฮดรอกซิลทุติยภูมิซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาก่อนข้างต่ำ ส่งผลให้สมบัติของวัสดุถูกจำกัด [20], [24] ในทางกลับกัน พอลิออลที่ได้มาจากปิโตรเลียมมักมีหมู่ไฮดรอกซิลปฐมภูมิ ซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูงกว่าและมีสมบัติที่ดีกว่า [20], [25] เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าว จึงมีงานวิจัยที่นำพอลิออลทั้ง 2 ชนิดมาผสมกันเพื่อกลบข้อด้อยดังกล่าว เช่น การผสมระหว่างน้ำมันละหุ่งกับพอลิออลจากปิโตรเลียมและการผสมน้ำมันถั่วเหลืองกับพอลิอีเทอร์ [26, 27, 28] งานวิจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นถึงทั้งศักยภาพและข้อจำกัดของพอลิออลจากน้ำมันปาล์มในการพัฒนาพอลิยูรีเทน นอกจากนี้การใช้สารขยายสายโซ่ (Chain extender) ยังเป็นหนึ่งในแนวทางในการเพิ่มสมบัติพอลิยูรีเทน โดยทั่วไปสารขยายสายโซ่มักจะประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลหรือหมู่เอมีนที่สามารถเพิ่มโครงสร้างของส่วนแข็งและยังส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา ความเสถียรทางความร้อน และความแข็งแรงเชิงกล [29, 30] จากงานวิจัยต่างๆ ได้บ่งบอกถึงสารขยายสายโซ่สามารถปรับปรุงและเพิ่มพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของพอลิยูรีเทนผ่านอันตรกิริยาระหว่างไมโครเฟส รวมถึงสมบัติวิสโคอีลาสติกในระบบพอลิยูรีเทนได้ [31, 32, 33]

แม้ว่าพอลิยูรีเทนจากพอลิออลจากน้ำมันพืชและการผสมกับสารประกอบที่ได้จากปิโตรเลียมมีการศึกษาอย่างแพร่หลายในการประยุกต์ใช้กับโฟม อีลาสโตเมอร์ และ สารเคลือบ แต่การใช้ประโยชน์จากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปรร่วมกับพอลิเอทิลีนไกลคอลในการสังเคราะห์สารเคลือบพอลิยูรีเทนยังมีรายงานการศึกษาค่อนข้างจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้สารขยายสายโซ่เพื่อเพิ่มความแข็งแรงยังไม่แพร่หลาย ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกที่จะสังเคราะห์สารเคลือบพอลิยูรีเทนจากการผสมพอลิออลระหว่างน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร (Modified Used Palm Oil-based Polyol; mUPO) และ พอลิเอทิลีนไกลคอล 3,000 กรัม/โมล ในอัตราส่วน 50/50 โดยโมล และทำปฏิกิริยากับโทลูอินไดไอโซไซยาเนต (Toluene diisocyanate; TDI) พร้อมทั้งเติมเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol; EG) เป็นสารขยายสายโซ่ในช่วงความเข้มข้นต่างๆ ตั้งแต่ 0–5 โมล โดยจะศึกษาผลกระทบต่อโครงสร้างระดับโมเลกุล ลักษณะทางสัณฐานวิทยา การยึดเกาะ ความเปื่อยผิวน และสมบัติทางความร้อน กระบวนการดังกล่าวไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับน้ำมันปาล์มใช้แล้วแต่ยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับสารเคลือบ รวมถึงเป็นการวางรากฐานสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถปรับแต่งสมบัติได้ ส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยีสารเคลือบและกาวเชิงความยั่งยืนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเตรียมวัสดุสารเคลือบจากพอลิออลผสมระหว่างน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วตัดแปรและพอลิเอทิลีนไกลคอล 3,000 กรัม/โมล
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการกระบวนการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนและหาสภาวะที่เหมาะสม
- 1.2.3 เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารขยายสายโซ่ที่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิยูรีเทน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 การเตรียมวัสดุและสารตั้งต้น
 - 1.3.1.1 เตรียมพอลิออลผสมระหว่างพอลิออลจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 3,000 กรัม/โมล ได้โดยใช้อัตราส่วนระหว่างพอลิออลจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วกับพอลิเอทิลีนไกลคอลที่ 50/50 โดยโมล
 - 1.3.1.2 เตรียมสารเคลือบพอลิยูรีเทนจากพอลิออลโดยควบคุมดัชนีไอโซไซยานาตที่ 100 โดยใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นสารขยายสายโซ่ที่ปริมาณ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 โมล ตามลำดับ
 - 1.3.1.3 ศึกษาอิทธิพลของสารขยายสายโซ่ ที่ปริมาณ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 โมล
- 1.3.2 วิธีการทดสอบ
 - 1.3.2.1 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR)
 - 1.3.2.2 ศึกษาโครงสร้างพื้นฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy; SEM)
 - 1.3.2.3 ศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบแบบเฉือน (Lap shear test) เพื่อหาความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปของสารเคลือบพอลิยูรีเทน
 - 1.3.2.4 ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimetry; DSC) และเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis; TGA)
 - 1.3.2.5 ศึกษาพฤติกรรมการไหลของด้วยเครื่องวัดรีโอโลยีแบบหมุน (Rotational rheometer)

1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

- 1.4.1 พอลิยูรีเทน เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างพอลิออลกับไอโซไซยานาตเพื่อให้เกิดพันธะยูรีเทน

1.4.2 ส่วนอ่อน (Soft segment) เป็นกลุ่มไดโอลที่มีสายโซ่ยาวช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพอลิยูรีเทน

1.4.3 ส่วนแข็ง (Hard segment) เป็นกลุ่มไดไอโซไซยาเนต มีสายโซ่สั้นและมีพลังงานพันธะสูง จึงช่วยให้โครงสร้างของพอลิยูรีเทนมีความแข็งแรงสูง

1.4.4 พอลิออล (Polyols) เป็นสารจำพวกพอลิเมอร์ที่มีหมู่ปลายเป็นไฮดรอกซิล (-OH) เป็นสารที่ใช้เตรียมส่วนอ่อน โดยในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้พอลิออลผสมระหว่างน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วตัดแปรและพอลิเอทิลีนไกลคอล 3,000 กรัม/โมล

1.4.5 ไดไอโซไซยาเนต (Diisocyanate) เป็นสารอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็น -NCO เป็นสารที่ใช้เตรียมส่วนแข็งของพอลิยูรีเทน

1.4.6 สารขยายสายโซ่ เป็นสารที่ช่วยในการเพิ่มความยาวให้กับสายโซ่ของพอลิเมอร์ ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น ในงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นสารช่วยขยายสายโซ่ในพอลิยูรีเทน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถเตรียมพอลิยูรีเทนได้จากพอลิออลผสมระหว่างน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วตัดแปรและพอลิเอทิลีนไกลคอล 3,000 กรัม/โมล

1.5.2 สามารถเตรียมสารเคลือบพอลิยูรีเทนจากพอลิออลผสมได้

1.5.3 สามารถใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นสารขยายสายโซ่เพื่อเพิ่มสมบัติด้านต่างๆ ในสารเคลือบพอลิยูรีเทนได้

1.5.4 สามารถนำพอลิยูรีเทนจากพอลิออลผสมไปใช้เป็นสารเคลือบได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

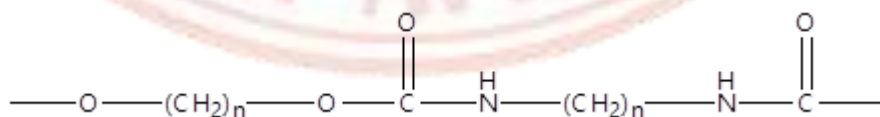
2.1 สารเคลือบ (Coating) [1]

สารเคลือบ คือวัสดุที่ถูกนำมาเคลือบบนพื้นผิวของวัสดุหรือวัตถุอื่น เพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มสมบัติของพื้นผิวนั้นให้เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการ ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อน การป้องกันความร้อน การลดการซึมผ่านของความชื้นและน้ำ หรือแม้กระทั่งการเสริมความสวยงามและความเงางาม สารเคลือบจึงมีบทบาทสำคัญต่อการยืดอายุการใช้งานและเพิ่มคุณค่าให้กับผลิตภัณฑ์ โดยสามารถพบการประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การเคลือบโลหะเพื่อป้องกันสนิม การเคลือบสีบนผนังอาคารหรือยานยนต์ การเคลือบพื้นผิววัสดุในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ไปจนถึงการเคลือบสารกันซึมที่ใช้ในงานก่อสร้าง ซึ่งแสดงถึงความหลากหลายและความสำคัญของสารเคลือบต่อการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมและวิศวกรรมวัสดุ

หนึ่งในสารเคลือบที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากที่สุดคือ พอลิยูรีเทน เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูง การยึดเกาะที่ดีเยี่ยม ทนต่อสารเคมี ความชื้น และการสึกกร่อน จึงเหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการสมบัติรอบด้านและความคงทนในระยะยาว

2.2 พอลิยูรีเทน (Polyurethane) [3]

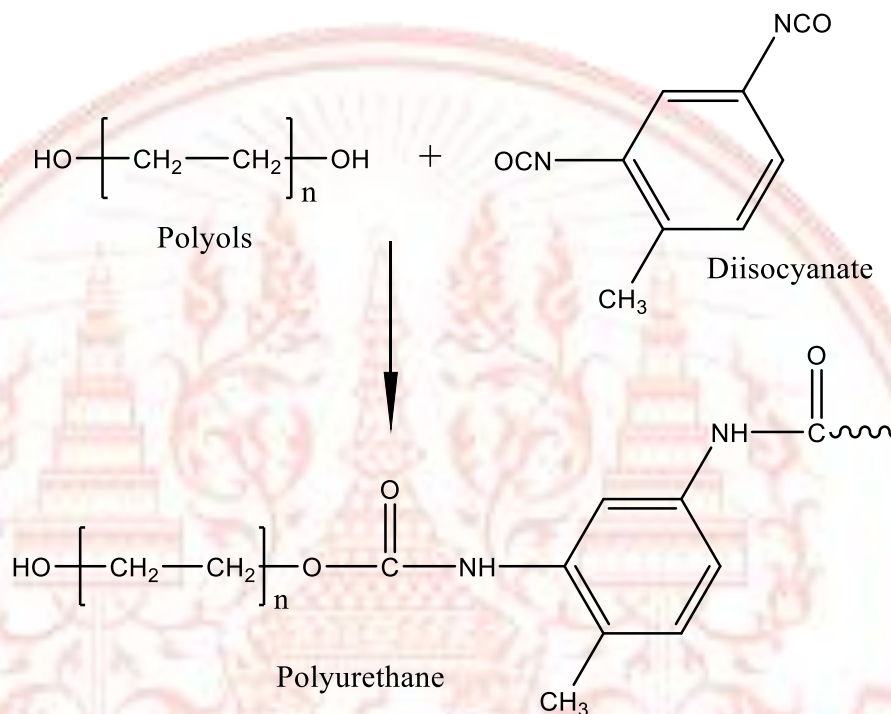
เป็นเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติกที่สามารถเตรียมให้มีลักษณะแข็งเหนียวจนกระทั่งนุ่มฟู เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายลักษณะ เช่น สี สารเคลือบ ฉนวนกันไฟฟ้า และโฟมพอลิยูรีเทน ทำให้ในปัจจุบันพอลิยูรีเทนได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานที่สูง โดยมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 โครงสร้างของพอลิยูรีเทน

พอลิยูรีเทนเป็นหมู่ซ้ำหลักในโครงสร้างพอลิยูรีเทน ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของหมู่แอลกอฮอล์ (-OH) และไอโซไซยาเนต (NCO) นอกจากนี้โครงสร้างของพอลิยูรีเทนยังมีหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ ด้วย เช่น

หมู่เอสเทอร์ หมู่อีเทอร์ ยูเรีย และสารประกอบอะโรมาติก ดังแสดงในภาพที่ 2-2 ด้วยโครงสร้างทางเคมีที่หลากหลายทำให้สมบัติของพอลิยูรีเทนมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ในด้านต่างๆ ตามสมบัติที่ผู้พัฒนาต้องการ โดยสมบัติของพอลิยูรีเทนจะขึ้นอยู่กับประเภทและอัตราส่วนของพอลิโออลและไดไอโซไซยาเนต [3]



ภาพที่ 2-2 ตัวอย่างปฏิกิริยาการเกิดพอลิยูรีเทน [3]

ปัจจุบัน พอลิยูรีเทนมีบทบาทสำคัญต่อการเติบโตของอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายรูปแบบ และมีสมบัติทั้งทางกายภาพและเชิงกลที่ดีเยี่ยม ทำให้พอลิยูรีเทนถูกนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย หนึ่งในนั้นคือสารเคลือบจากพอลิยูรีเทน ซึ่งนิยมนำมาผลิตเป็นสีและวัสดุเคลือบพื้นผิวต่างๆ เนื่องจากมีความแข็งแรงในการยึดเกาะสูง ทนต่อสารเคมี ยึดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ และทนต่อการสึกกร่อน

2.2.1 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน

ในการทำปฏิกิริยาพอลิยูรีเทนจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่ไอโซไซยาเนต ขึ้นกับการนำไปใช้งานให้เหมาะสมกับด้านนั้นๆ โดยทั่วไปการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนจะนิยมใช้พอลิโออลและไอโซไซยาเนตให้เกิดปฏิกิริยาพอลิยูรีเทน โดยที่พอลิโออลจะเป็นส่วนอ่อนของสายโซ่หลักที่ทำหน้าที่เพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพอลิยูรีเทน รวมไปถึงเพิ่มความชอบน้ำอีกด้วย ไอโซไซยาเนตหรือสารตัวเติมอื่นๆ จะทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้คงรูป (Curing agent) ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับ

พอลิยูรีเทน นอกจากนี้การเพิ่มสัดส่วนของไดไอโซไซยาเนตจะเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำของพอลิยูรีเทน โดยสมบัติต่างๆ จะขึ้นอยู่กับปริมาณของส่วนแข็งและส่วนอ่อน การกำหนดปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยให้ควบคุมหรือกำหนดทิศทางการของสมบัติของพอลิยูรีเทนอีกด้วย อย่างไรก็ตามการเติมสารเติมแต่งลงไประหว่างการเกิดปฏิกิริยาอาจส่งผลต่อการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน เช่น สารป้องกันการลามไฟ สารช่วยในการเชื่อมขวาง สารเติมแต่งและสารช่วยให้เกิดฟอง ในปัจจุบันมีการรายงานการเตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนโดยใช้สารเคมีที่แตกต่างกัน ตัวอย่างมีดังนี้

ในปี 2018 Król P. และคณะ [34] เตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนโดยใช้พอลิออลที่มีน้ำหนักโมเลกุล 90 และ 1,000 กรัม/โมล เพื่อศึกษาความเป็นพิษในฟิล์มพอลิยูรีเทนรวมทั้งสมบัติอื่นๆ พบว่าฟิล์มพอลิยูรีเทนมีความเป็นพิษต่ำต่อโอบรบลาสต์ของมนุษย์และเซลล์เคราติโนไซต์

ในปี 2019 Li R. และคณะ [35] เตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างพอลิโพรไพลีนไกลคอลและโพลูอินไดไอโซไซยาเนตโดยควบคุมอัตราส่วนของส่วนอ่อนต่อส่วนแข็งที่ 3:2, 7:3, 3:1 และ 4:1 ตามลำดับ โดยการสังเคราะห์ในระบบน้ำ (Waterborne synthesis) และใช้เอทิลีนไกลคอลเป็นสารขยายสายโซ่ ผลการทดสอบบ่งชี้ว่า การเปลี่ยนแปลงของสมบัติมีความสัมพันธ์กับระดับการแยกเฟสและความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของส่วนแข็ง ทำให้ส่วนอ่อนและส่วนแข็งสามารถจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างซ้อนกันอย่างมีระเบียบมากขึ้น

ในปี 2020 Veetil R. และคณะ [36] ได้เตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนโดยไม่ใช้มอนอเมอร์แทนที่ส่วนอ่อนในโครงสร้างของพอลิยูรีเทนโดยทำปฏิกิริยาระหว่างฟลอโรกลูซินอล (Phloroglucinol) และ เฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต (Hexamethylene diisocyanate) จากการทดสอบพบว่าฟิล์มพอลิยูรีเทนจากฟลอโรกลูซินอล มีความยืดหยุ่นน้อยกว่าเนื่องจากมีจำนวนพันธะไฮโดรเจนที่มากกว่า

ในปี 2021 Peng H. และคณะ [37] เตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทนที่สามารถซ่อมแซมตัวเองได้โดยใช้กรดแทนนิกเป็นสารเชื่อมขวางจากการทดสอบพบว่าฟิล์มที่ถูกตัดสามารถซ่อมแซมตัวเองได้อย่างสมบูรณ์ภายใต้สภาวะอากาศและอุณหภูมิห้องภายในหนึ่งสัปดาห์ โดยไม่ต้องใช้การกระตุ้นจากสภาพแวดล้อมภายนอก นอกจากนี้พันธะไฮโดรเจนยังช่วยเพิ่มความต้านทานต่อแรงดึงให้กับฟิล์มพอลิยูรีเทนอีกด้วย

ในปี 2024 Dai S. และคณะ [38] พัฒนาโฟมพอลิยูรีเทนเพื่อให้มีความแข็งแรงในการยึดเกาะสูงและการคงตัวที่ดี การทดสอบพบว่าแก๊สที่เกิดจากการเกิดโฟมของพอลิยูรีเทนทำหน้าที่ช่วยสร้างโครงสร้างแบบประสานระหว่างสายโซ่พอลิยูรีเทนและพื้นผิวสัมผัส ทำให้เกิดการเชื่อมโยงทางเคมีมากขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงในการยึดเกาะสูงขึ้น

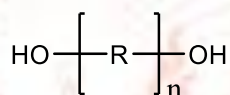
โดยตัวอย่างงานวิจัยในการเตรียมพอลิยูรีเทนจะสรุปดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 สรุปรายงานการเตรียมฟิล์มพอลิยูรีเทน

ชื่อ	สารที่ใช้	ผลที่ได้	การใช้งาน
Król P. และคณะ [34]	พอลิคาโพรแลกโตนหรือ พอลิออกซีเมทิลีนเป็น พอลิออลและใช้เมทิลีน ไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนต เป็นไอโซไซยาเนต	ฟิล์มพอลิยูรีเทนมีความเป็นพิษ ต่ำต่อโบบลาสต์ของมนุษย์ และเซลล์เคราติโนไซต์	อุปกรณ์การแพทย์ ทั่วไป
Li R. และคณะ [35]	พอลิโพรไพลีนไกลคอลและ โทลูอินไดไอโซไซยาเนต	การเปลี่ยนแปลงของสมบัติมี ความสัมพันธ์กับระดับการแยก เฟสและความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้น ตามปริมาณของส่วนแข็ง ทำให้ ส่วนอ่อนและส่วนแข็งสามารถ จัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างซ้อน กันอย่างมีระเบียบมากขึ้น	กาวพอลิยูรีเทน
Veetil R. และคณะ [36]	ฟลอโรกุลชินอลและเฮกซะ เมทิลีนไดไอโซไซยาเนต	ฟิล์มพอลิยูรีเทนจากฟลอโรกุล ชินอล มีความยืดหยุ่นน้อยกว่า เนื่องจากมีจำนวนพันธะ ไฮโดรเจนที่มากกว่า	ฟิล์มที่สามารถ ฟื้นฟูตัวเอง
Peng H. และคณะ [37]	พอลิโพรไพลีนไกลคอล และไอโซไฟโร ไดไอโซ ไซยาเนต	ฟิล์มที่ถูกตัดสามารถซ่อมแซม ตัวเองได้อย่างสมบูรณ์ภายใต้ สภาวะอากาศและอุณหภูมิห้อง ภายในหนึ่งสัปดาห์ โดยไม่ต้อง ใช้การกระตุ้นสภาพแวดล้อม ภายนอก	ฟิล์มพอลิยูรีเทน
Dai S. และคณะ [38]	พอลิฟีนอลออกไซด์และ ไอโซไฟโร นไดไอโซ ไซยาเนต	แก๊สที่เกิดจากการเกิดโฟมของ พอลิยูรีเทนทำหน้าที่ช่วย ทำให้ เกิดการเชื่อมโยงทางเคมี ส่งผล ให้ความแข็งแรงในการยึดเกาะ สูงขึ้น	โฟมพอลิยูรีเทน

2.3 พอลิออล [29]

พอลิออลเป็นสารจำพวกไดออลที่มีหมู่ปลายเป็นไฮดรอกซิลดังแสดงในภาพที่ 2-3 ซึ่งนิยมนำมาใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนโดยแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ พอลิอีเทอร์พอลิออลและพอลิเอสเทอร์พอลิออล นอกจากนี้ยังมีการนำน้ำมันจากธรรมชาติหรือน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งานมาแล้วมาทำการดัดแปรโครงสร้าง เช่น น้ำมันถั่วเหลืองหรือพอลิออลจากน้ำมันที่ใช้แล้วจะทำให้พอลิยูรีเทนมีสมบัติเฉพาะตัวอีกด้วย

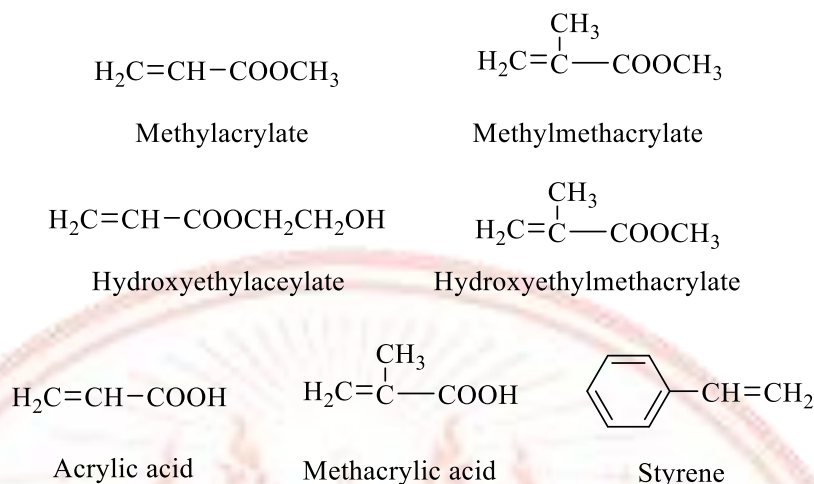


ภาพที่ 2-3 โครงสร้างของพอลิออลเมื่อ R คือหน่วยซ้ำ (Repeating unit) [3]

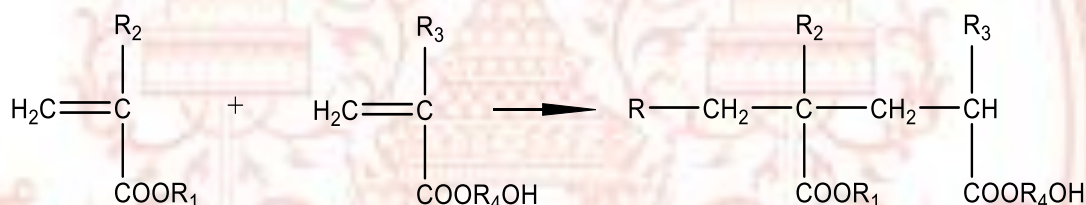
โดยทั่วไปพอลิออลสามารถแบ่งออกตามน้ำหนักโมเลกุลซึ่งส่งผลต่อสมบัติความยืดหยุ่นของพอลิยูรีเทน พอลิยูรีเทนที่มีความยืดหยุ่นสูงซึ่งถูกเตรียมจากพอลิออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (High molecular weight polyols) ซึ่งมีส่วนประกอบของสายอัลคิลที่ยาวถูกนำมาใช้ในการเตรียมพอลิยูรีเทนชนิดยืดหยุ่น เนื่องจากมีสายโซ่โมเลกุลแบบเส้นตรงช่วยให้เกิดการเคลื่อนตัวอิสระของสายโซ่โมเลกุล นอกจากนี้ยังมีหมู่ฟังก์ชันที่น้อยและมีระดับการเชื่อมขวาง (Crosslinking) ต่ำทำให้วัสดุที่ได้มีความยืดหยุ่นสูง [29]

พอลิเอสเทอร์พอลิออลเป็นหนึ่งในพอลิออลที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์เนื่องจากเมื่อทำปฏิกิริยาแล้วจะทำให้โครงสร้างเกิดผลึกสูงเป็นผลมาจากอันตรกิริยาที่แข็งแรงของสายโซ่ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความเสถียรทางความร้อนและลดการลามไฟได้ สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาควบนั่นระหว่างพอลิออลกับไดคาร์บอกซิลิก หรือผ่านปฏิกิริยาเปิดวงกับแลคโตน [29]

อะคริลิกพอลิออลเป็นหนึ่งในพอลิออลที่นิยมนำมาสังเคราะห์เป็นพอลิยูรีเทนเช่นกัน โดยอะคริลิกพอลิออลถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยผ่านปฏิกิริยาแบบเพิ่มอนุมูลอิสระ มอนอเมอร์ที่ใช้มักจะมีหมู่ไฮดรอกซีเพื่อทำปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนต ดังแสดงในภาพที่ 2-4 โดยโครงสร้างที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อสมบัติอีกด้วย เช่น เมทิลเมทาอะคริเลตและสไตรีนมีโครงสร้างสั้นทำให้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงรวมทั้งกันน้ำได้ นอกจากนี้การมีหมู่ฟังก์ชันที่ทำปฏิกิริยาได้ เช่น กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acids) ซึ่งทำให้เมทิลเมทาคริเลตละลายน้ำได้ง่ายหลังจากที่ถูกทำให้เป็นกลาง (Neutralized) ทำให้สามารถกระจายตัวได้ดีในตัวทำละลายที่มีขี้ผึ้งหรือน้ำและความหนืดต่ำ ภาพที่ 2-5 แสดงถึงตัวอย่างการสังเคราะห์อะคริลิกพอลิออล



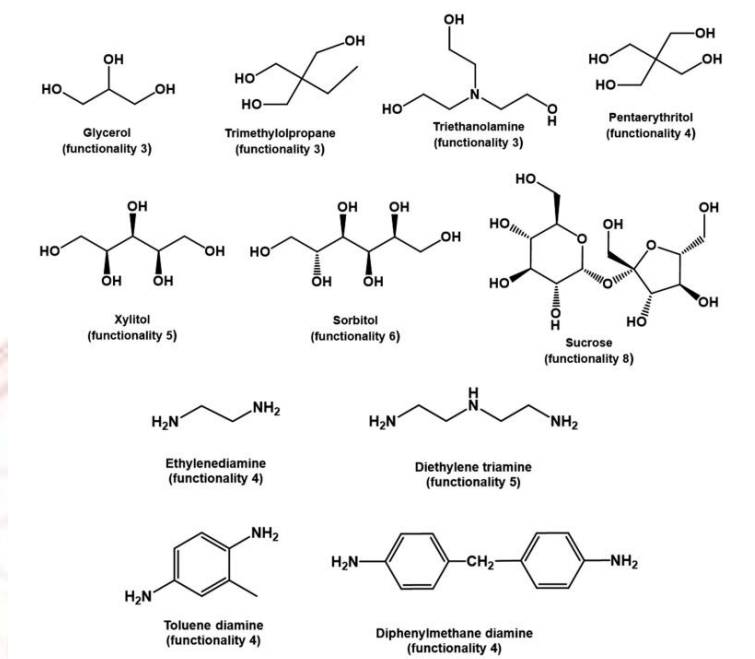
ภาพที่ 2-4 มอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์อะคริลิกพอลิออล [29]



ภาพที่ 2-5 ปฏิกริยาการสังเคราะห์อะคริลิกพอลิออล [29]

พอลิซิลอกเซนเป็นพอลิออลอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมในการเตรียมพอลิยูรีเทนพอลิเมอร์ที่มีฐานเป็นพอลิซิลอกเซน (Polysiloxane-based polymer) มีช่วงอุณหภูมิการทำงานที่กว้างและคงที่ จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น หนึ่งในสมบัติสำคัญของพอลิยูรีเทนที่ได้จากพอลิซิลอกเซนคือความสามารถในการคงสมบัติยืดหยุ่นแม้ในอุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้พอลิยูรีเทนที่มีซิลิโคนยังมีความเสถียรสูงต่อสภาพแวดล้อม รวมถึงทนต่อกระแสไฟฟ้า ทำให้สามารถนำไปใช้ในสารเคลือบที่ทนต่อการกัดกร่อนและเป็นฉนวนไฟฟ้าได้

พอลิออลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะนิยมใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนชนิดแข็ง เนื่องจากมีสายโซ่สั้นทำให้โครงสร้างมีกิ่งและเกิดการเชื่อมขวางในโครงสร้างพอลิยูรีเทน ทำให้ระบบมีความหนืดสูง นอกจากนี้การทำปฏิกิริยากับไอโซไซยาเนตที่มีวงอะโรมาติกในโครงสร้างจะช่วยให้พอลิยูรีเทนมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นรวมทั้งจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของพอลิออลจะทำให้เกิดการเชื่อมขวางมากขึ้นซึ่งส่งผลต่ออันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ โดยพอลิออลที่นิยมใช้จะแสดงในภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 พอลิออลที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม [29]

อย่างไรก็ตามพอลิออลที่นิยมใช้ในปัจจุบันมักจะเป็นพอลิออลจากแหล่งปิโตรเลียมซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความไม่มั่นคงทางเศรษฐกิจ จึงมีการนำวัสดุหมุนเวียนมาใช้เพื่อทดแทนพอลิออลจากแหล่งปิโตรเลียมเช่น กลีเซอรอล ซูโครส ซอร์บิทอลและกรดรีซินโอเลอิก สามารถนำไปสังเคราะห์พอลิยูรีเทนได้เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้าง พอลิออลจากแหล่งธรรมชาติสามารถสังเคราะห์ได้ผ่านหลายวิธี เช่น การเกิดอีพอกไซด์ชัน (Epoxidation) ตามด้วยการเปิดวงแหวน (Ring-opening) โอโซนไลซิส (Ozonolysis) ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) และปฏิกิริยาไธออล-อีน (Thiol-ene reaction) ตัวอย่างของวัตถุดิบเริ่มต้นที่ถูกแปลงเป็นไบโอพอลิออลได้แก่ ลิกนิน (Lignin) เทอร์ปีน (Terpenes) เทอร์ปีนอยด์ (Terpenoid) ข้าวโพด และน้ำมันถั่วเหลือง ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่นำพอลิออลจากแหล่งธรรมชาติมาใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนมีตัวอย่างดังนี้

ในปี 2009 Dutta S. และคณะ [39] เตรียมสีจากพอลิยูรีเทนเอสเทอร์ที่ดัดแปรจากน้ำมันเมล็ดถั่วเหลือง โดยใช้เมลามีนฟอร์มัลดีไฮด์เรซินผสมกับพอลิยูรีเทนเอสเทอร์ ด้วยอัตราส่วน 70:30 โดยน้ำหนัก และใช้อีพอกซีเรซินชนิดบิสฟีนอล-เอ ดัดแปรผสมกับพอลิยูรีเทนเอสเทอร์ในอัตราส่วน 50:50 โดยน้ำหนัก จากการทดสอบพบว่าสีทั้งสองชนิดมีสมบัติใกล้เคียงกับสีมาตรฐานอุตสาหกรรม โดยสีที่ดัดแปรด้วยอีพอกซีเรซินชนิดบิสฟีนอล-เอ มีประสิทธิภาพดีกว่าและถือเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการทำสี

ในปี 2020 Sukhawipat N. และคณะ [40] สังเคราะห์พอลิยูรีเทนจากยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุล 2,820 1,800 และ 950 กรัม/โมล ร่วมกับโพลีอินไดไฮโดรไซยาเนตและเอทิลีนไกลคอล พบว่าน้ำหนักโมเลกุลส่งผลต่อขนาดอนุภาคของน้ำยางเนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลส่งผลให้สายโซ่มีความยืดหยุ่นมากขึ้นทำให้ลดแรงตึงผิวระหว่างอนุภาค ทำให้มีขนาดอนุภาคที่เล็กลง นอกจากนี้ประสิทธิภาพการยึดเกาะกับหนังวัวยังมีประสิทธิภาพสูงอีกด้วย

ในปี 2021 Gulmez F. และคณะ [41] นำน้ำมันละหุ่งมาทำการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนจากธรรมชาติเพื่อนำไปใช้ในการประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ โดยควบคุมอัตราส่วนระหว่างน้ำมันละหุ่ง/พอลิเอทิลีนไกลคอล พบว่าการลดน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเอทิลีนไกลคอลทำให้การปล่อยยาดีขึ้น นอกจากนี้ อัตราส่วนน้ำมันละหุ่ง/พอลิเอทิลีนไกลคอล และค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีผลสำคัญต่อพฤติกรรมการปล่อยยา ระบบการปล่อยยาถูกวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับศูนย์ จลนพลศาสตร์อันดับหนึ่ง จลนพลศาสตร์ของ Higuchi จลนพลศาสตร์ของ Korsmeyer-Peppas และจลนพลศาสตร์ของ Kopcha

ในปี 2022 El Gharrak A. และคณะ [42] สังเคราะห์พอลิยูรีเทนจากลิกนินและน้ำมันเรปซิดเพื่อนำไปใช้เป็นสารเคลือบปุ๋ยไนโตรเจน-ฟอสฟอรัส-โพแทสเซียมเพื่อควบคุมการปลดปล่อยแร่ธาตุจากการทดสอบพบว่าการปรับสัดส่วนของลิกนินและน้ำมันเรปซิดโดยการใช้น้ำมันเรปซิดสามารถยืดการปลดปล่อยแร่ธาตุได้สูงสุดถึง 70 วัน

ในปี 2023 Wang W. และคณะ [43] สังเคราะห์ฟิล์มพอลิยูรีเทนโดยใช้น้ำมันละหุ่งในการสังเคราะห์เพื่อนำไปใช้ในการถนอมอาหาร จากการศึกษาพบว่าฟิล์มพอลิยูรีเทนมีค่าการป้องกันรังสียูวีที่สูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความเป็นพิษต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถยืดอายุของผลไม้ได้รวมทั้งฟิล์มยังสามารถย่อยสลายได้ภายใน 8 วันอีกด้วย

โดยตัวอย่างงานวิจัยในการเตรียมพอลิยูรีเทนจากแหล่งธรรมชาติจะสรุปดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 สรุปรายงานการเตรียมพอลิยูรีเทนโดยใช้พอลิออลจากธรรมชาติ

ชื่อ	สารที่ใช้	ผลที่ได้	การใช้งาน
Dutta S. และคณะ [39]	น้ำมันเมล็ดถั่วเหลืองดัดแปรและโพลีอินไดไฮโดรไซยาเนตผสมกับเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์เรซินและอีพอกซีเรซินชนิดบิสฟีนอล-เอ	สีทั้งสองชนิดมีสมบัติใกล้เคียงกับสีมาตรฐานอุตสาหกรรม โดยสีที่ดัดแปลงด้วยอีพอกซีเรซินชนิดบิสฟีนอล-เอแสดงประสิทธิภาพดีกว่าและถือเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการทำสี	สีจากพอลิยูรีเทน

ตารางที่ 2-2 (ต่อ)

ชื่อ	สารที่ใช้	ผลที่ได้	การใช้งาน
Sukhawipat N. และคณะ [40]	ยางธรรมชาติ และ โทลูอินไดไอโซไซยาเนต	น้ำหนักโมเลกุลส่งผลต่อขนาดอนุภาคของลาเท็กซ์เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลส่งผลให้สายโซ่มีความยืดหยุ่นมากขึ้นทำให้ลดแรงตึงผิวระหว่างอนุภาค ทำให้มีขนาดอนุภาคที่เล็กลง นอกจากนี้ประสิทธิภาพการยึดเกาะกับหนังวัวก็ยังมีประสิทธิภาพสูงอีกด้วย	กาวพอลิยูรีเทนจากน้ำยางธรรมชาติ
Gulmez F. และคณะ [41]	น้ำมันละหุ่ง/พอลิเอทิลีนไกลคอล และ เฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต	การลดน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเอทิลีนไกลคอลทำให้การปล่อยยาดีขึ้น นอกจากนี้ อัตราส่วนน้ำมันละหุ่ง/พอลิเอทิลีนไกลคอล และ ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีผลสำคัญต่อพฤติกรรมของการปล่อยยา	ระบบขนส่งยา
El Gharrak A. และคณะ [42]	น้ำมันเรปซิด	การการปรับสัดส่วนของลิกนินและน้ำมันเรปซิดโดยใช้ น้ำมันเรปซิดสามารถยืดการปลดปล่อยธาตุอาหารได้สูงสุดถึง 70 วัน	ระบบปลดปล่อยปุ๋ย
Wang W. และคณะ [43]	น้ำมันละหุ่งและ โทลูอินไดไอโซไซยาเนต	ฟิล์มพอลิยูรีเทนมีค่าการป้องกันรังสียูวีที่สูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์และมีค่าความเป็นพิษต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถยืดอายุของผลไม้ได้รวมทั้งฟิล์มยังสามารถย่อยสลายได้ภายใน 8 วันอีกด้วย	ฟิล์มถนอมอาหาร

จากการศึกษาค้นคว้าที่กล่าวมาข้างต้น งานวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วมาเป็นพอลิออลจากแหล่งธรรมชาติ เนื่องจากน้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันที่ถูกบริโภคมากที่สุดจากความคงตัวต่อการเกิดออกซิเดชันระหว่างการปรุงอาหาร อย่างไรก็ตามการนำน้ำมันปาล์มกลับมาใช้ซ้ำในการประกอบอาหารบ่อยครั้งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่อาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วมาทำการดัดแปลงโครงสร้างให้มีหมู่ไฮดรอกซิลเพื่อใช้เป็นพอลิออลจากแหล่งธรรมชาติ โดยตัวอย่างงานวิจัยจะมีดังนี้

ในปี 2019 Riyapan D. และคณะ [21] ดัดแปลงโครงสร้างของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วและนำมาประยุกต์ใช้ในการผลิตโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง โดยใช้ไขมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปรผ่านกระบวนการอีพอกซิเดชันและการเปิดวงในขั้นตอนเดียวพร้อมทั้งศึกษาสัดส่วนของสารตั้งต้นและเวลาในการเกิดปฏิกิริยา จากการศึกษาพบว่าหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการสังเคราะห์ นอกจากนี้โฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็งมีขนาดเซลล์และความแข็งแรงต่อแรงกดเพิ่มขึ้นเมื่อไฮดรอกซิลสูงขึ้น

ในปี 2020 Suwan A. และคณะ [23] พัฒนาพาร์ติเคิลบอร์ดโดยใช้เศษไม้ไผ่ร่วมกับกาวพอลิยูรีเทนที่สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร จากผลการทดสอบพบว่าการเพิ่มปริมาณกาวที่ 15–60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ดัชนีไอโซไซยานตที่ 100–180 ส่งผลให้ความแข็งแรงต่อดัดงอ โมดูลัสยืดหยุ่น และความต้านทานการดูดซึมน้ำของพาร์ติเคิลบอร์ดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเคลือบผิวบนพาร์ติเคิลบอร์ดด้วยกาวยังช่วยเพิ่มความเงางาม ลดการเปลี่ยนสี และชะลอการเสื่อมสภาพจากรังสียูวี อีกทั้งยังช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลและความต้านทานการดูดซึมน้ำอีกด้วย

ในปี 2021 Sukhawipat N. และคณะ [22] ขึ้นรูปโฟมพอลิยูรีเทนคอมโพสิตผสมกับเส้นใยผักตบชวาโดยกำหนดค่าดัชนีไอโซไซยานตที่ 100 และปริมาณเส้นใยผักตบชวาที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พร้อมปรับขนาดอนุภาคตั้งแต่ 177–841 ไมครอนจากการทดสอบพบว่าเมื่อขนาดเส้นใยลดลง ความแข็งแรงต่อแรงอัดของโฟมเพิ่มขึ้นรวมทั้งขนาดเส้นใยที่มีขนาดเล็กเล็กยังช่วยให้เซลล์โฟมมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้สมบัติการดูดซับเสียงและความต้านทานการติดไฟดีขึ้น

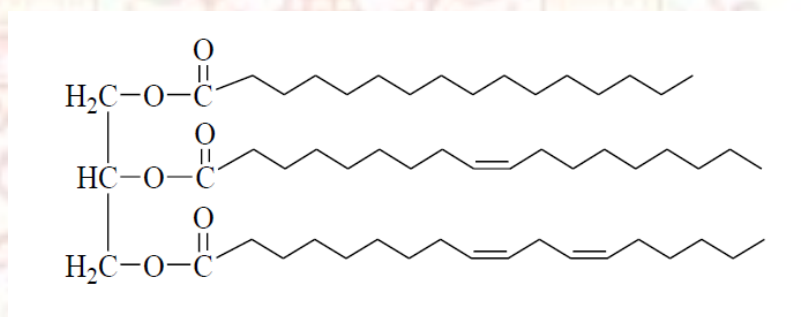
ในปี 2023 Tengsuthiwat J. และคณะ [44] พัฒนาวัสดุวิศวกรรมที่มีสมบัติการดูดซับเสียงและการเป็นฉนวนกันความร้อน โดยใช้เส้นใยผักตบชวามผสมกับกาวพอลิยูรีเทนจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร จากการศึกษาพบว่าความหนาแน่นของวัสดุเป็นปัจจัยสำคัญต่อสมบัติการใช้งาน โดยการใช้เส้นใยผักตบชวาปริมาณ 60 เปอร์เซ็นต์จะทำให้การดูดซับเสียงและการป้องกันความร้อนที่ดีที่สุด เนื่องจากมีช่องว่างที่มากเพียงพอที่จะทำให้การกระจายพลังงานมีประสิทธิภาพ

ในปี 2024 Chotchuangchutchaval T. และคณะ [45] นำแผ่นเนื้อเยื่อคอมโพสิตจากโฟมพอลิยูรีเทนจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปรร่วมกับเส้นใยผักตบชวา โดยกำหนดปริมาณเส้นใยผักตบชวาตั้งแต่ 0–1.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและกำหนดขนาดเส้นใยที่ 841 ไมครอน

จากผลการทดสอบพบว่าพบว่าการเติมเส้นใยผักตบชวา 1.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ประสิทธิภาพการดูดซับเสียงสูงสุด นอกจากนี้ยังพบว่าเนื้อเยื่อคอมโพสิตมีความเสถียรทางความร้อนสูง

2.4 น้ำมันปาล์ม [21]

ต้นปาล์มส่วนใหญ่พบในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้โดยเฉพาะมาเลเซียและไทย น้ำมันปาล์มดิบประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนแรกจากเนื้อปาล์มและส่วนที่สองมาจากเมล็ด มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบของน้ำมันปาล์มเป็นไตรกลีเซอไรด์ที่มีโมเลกุลกลีเซอรอลกับกรดไขมันสามชนิด กรดไขมันหลักในน้ำมันปาล์ม คือปาล์มติก (C16: 0) สเตียริก (C18: 0) โอลิอิก (C18: 1) และลิโนลิก (C18: 2) ซึ่งประกอบด้วยน้ำมันที่เป็นกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวในปริมาณที่เท่ากัน นอกจากนี้ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ในน้ำมันปาล์ม ประกอบด้วยฟอสเฟต สเตอรอล เม็ดสี โทโคฟีรอล โทโคฟีโนล และไอออนของโลหะ โทโคฟีรอลซึ่งเป็นวิตามินอีที่ละลายในไขมันเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญของน้ำมันพืช โครงสร้างทางเคมีที่เป็นไปได้ของน้ำมันปาล์มดังแสดงในภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 โครงสร้างของน้ำมันปาล์ม [21]

น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันที่ใช้บริโภคมากที่สุดเมื่อเทียบกับพืชน้ำมันอื่นๆ เพราะเป็นน้ำมันที่ถูกที่สุดในโลก นอกจากนี้โครงสร้างของน้ำมันปาล์มยังประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวเกือบ 50 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันที่สูงในระหว่างการปรุงที่อุณหภูมิสูง น้ำมันปาล์มมีอายุการเก็บรักษานานและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง จากสมบัติของน้ำมันปาล์มเป็นเหตุผลว่าทำไมจึงเป็นตัวเลือกที่นิยมใช้ในการทอดในอาหาร แม้จะมีข้อได้เปรียบเหล่านี้เมื่อนำกลับมาใช้ใหม่เป็นระยะเวลานานสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันปาล์มจะเปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทอดตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อถัดไป

2.5 น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว [21]

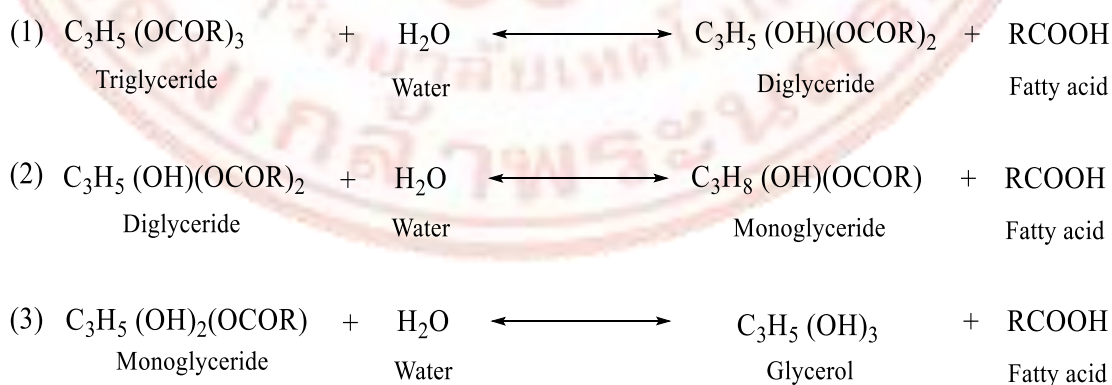
อาหารทอดเป็นหนึ่งในอาหารที่นิยมในการบริโภคเพราะมีรสชาติและเนื้อสัมผัสที่ดี กระบวนการทอดเกี่ยวข้องกับการแช่อาหารในน้ำมันที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 150-190 องศาเซลเซียส การใช้ น้ำมันปาล์มบ่อยครั้งสำหรับทอด ทำให้สมบัติทางกายภาพและทางเคมีเสื่อมสภาพ กระบวนการทอด ที่อุณหภูมิสูงนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ทำให้เกิดสีคล้ำเพิ่มความหนืด และกลิ่นหืน ปฏิกิริยาทางเคมีที่ซับซ้อนเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทอด ปฏิกิริยาที่สำคัญ ได้แก่ ปฏิกิริยา ไฮโดรไลซิส ปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน และผลิสารประกอบที่ระเหยได้ หรือไม่ระเหยเช่นทรานส์ไอโซเมอร์กรดไขมันอิสระ คีโตนไฮโดรคาร์บอนอัลดีไฮด์สารประกอบไซโคล แอลกอฮอล์ และสารประกอบอีพอกไซด์

2.4.1 ปฏิกิริยาทางเคมีของน้ำมันพืชระหว่างกระบวนการทอด [21]

การทอดโดยใช้น้ำมันซ้ำเป็นระยะเวลานานที่อุณหภูมิสูงสำหรับกระบวนการทอดเริ่มต้น ชุดของปฏิกิริยาทางเคมีและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของน้ำมันพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โครงสร้างของน้ำมันพืชที่ไม่อิ่มตัวจะออกซิไดซ์ความร้อนได้เร็วกว่าโครงสร้างอิ่มตัว

2.4.1.1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส [21]

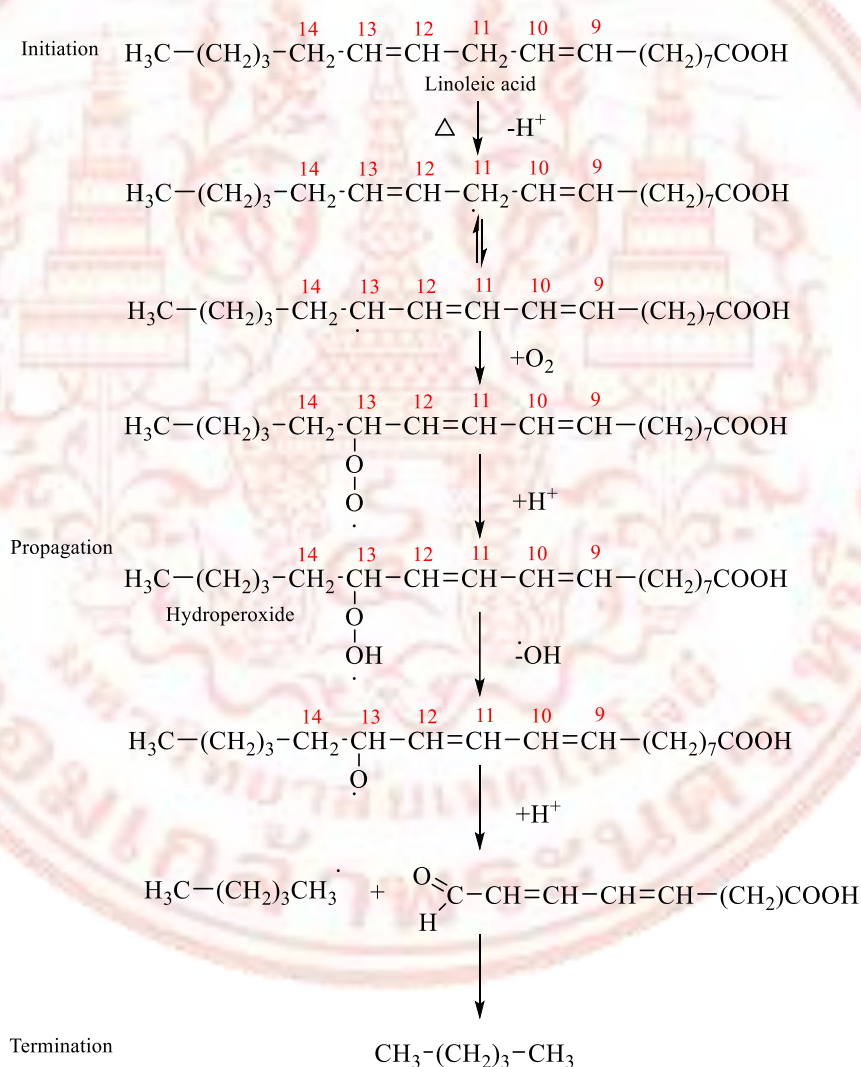
ในระหว่างการทอดปฏิกิริยาของน้ำจากอาหารที่ผลิตน้ำมันมอนอกลิเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ กรดไขมันและเอสเทอร์บางส่วน ที่อุณหภูมิสูงมากมีอัตราการย่อยสลายต่ำมากเนื่องจาก น้ำในอาหารระเหยในอัตราที่สูง เริ่มจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้ ไตรกลีเซอไรด์ (Diglycerides) ขั้นที่สองของการทำปฏิกิริยาไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้ โมโนกลีเซอไรด์ และส่วนสุดท้ายเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาของมอนอกลิเซอไรด์ด้วยน้ำได้กลีเซอรอลและ กรดไขมัน แสดงดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ [21]

2.4.1.2 ปฏิกิริยาออกซิเดชัน [21]

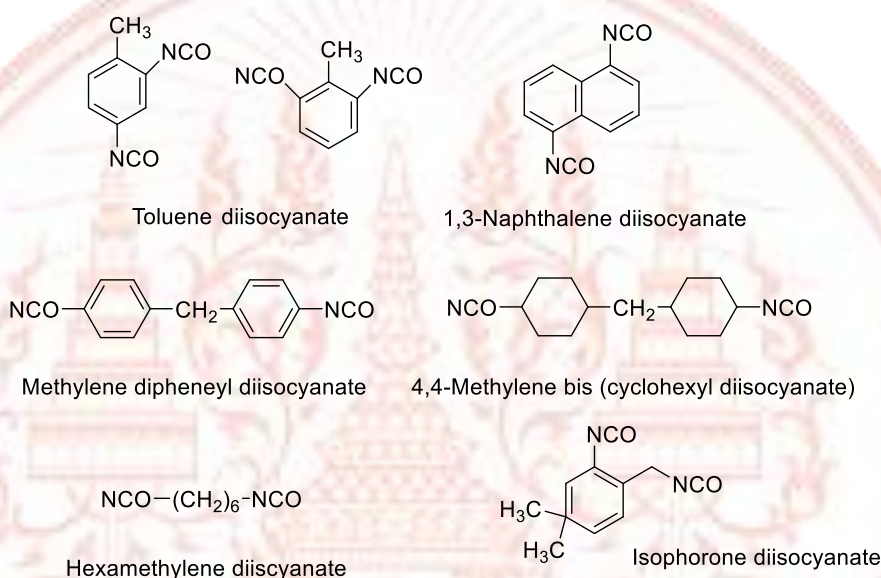
น้ำมันพืชจะถูกออกซิไดส์ในระหว่างการทอดที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นระหว่างไขมันจากน้ำมันพืชและออกซิเจน มีสามขั้นตอนในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือ ขั้นตอนเริ่มต้น แผลขยายสายโซ่ และสิ้นสุดปฏิกิริยา อะตอมไฮโดรเจนจากอะตอมคาร์บอนที่อยู่ติดกับพันธะคู่จะหายไปก่อนที่จะกลายเป็นอนุมูลอิสระในขั้นเริ่มต้น ในขั้นแผลขยายสายโซ่ลิปิดอัลคิลอนุมูลทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในรูปแบบอนุมูลเปอร์ออกไซด์ อนุมูลอัลค็อกซีทำปฏิกิริยากับอนุมูลอัลค็อกซีอื่นเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีเรดิคอลในสิ้นสุดปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 กลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำมันปาล์ม [21]

2.6 ไดไอโซไซยาเนต [29]

ไดไอโซไซยาเนตมีหมู่ฟังก์ชันไอโซไซยาเนต ซึ่งเป็นหมู่ที่สามารถทำปฏิกิริยาในการเกิดพอลิยูรีเทนได้ดีโดยทำปฏิกิริยาผ่านหมู่ไฮดรอกซิล โดยโครงสร้างทางเคมีที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนถูกแสดงในภาพที่ 2-10 โดยไดไอโซไซยาเนตมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งมีผลต่อการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน



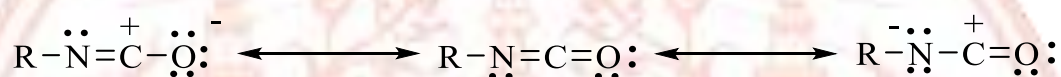
ภาพที่ 2-10 ไดไอโซไซยาเนตที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน [29]

ไดไอโซไซยาเนตแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ อะลิฟาติก (Aliphatic) และ อะโรมาติก (Aromatic) โดยไอโซไซยาเนตประเภทอะโรมาติกแสดงความเป็นส่วนแข็งทำให้ส่งผลต่อสมบัติโดยรวมของพอลิยูรีเทน ตัวอย่างเช่น โทลูอินไดไอโซไซยาเนต และเมทิลีนไดฟีนิล ไดไอโซไซยาเนต (Methylene diphenyl diisocyanate; MDI) ซึ่งนิยมใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนแข็งหรือเทอร์โมเซตพอลิยูรีเทน นอกจากนี้ไดไอโซไซยาเนต 2 ชนิดนี้ยังมีราคาถูกและมีการเกิดปฏิกิริยาที่ไวกว่าชนิดอื่นๆ จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามไดไอโซไซยาเนตชนิดนี้มีความไวต่อรังสียูวีสูง จึงทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานในที่ที่มีแสงอาทิตย์ ไดไอโซไซยาเนตประเภทอะลิฟาติก เช่น เฮกซะเมทิลีน ไดไอโซไซยาเนต (Hexamethylene diisocyanate; HMDI) และไอโซโฟรอน ไดไอโซไซยาเนต (Isophorone diisocyanate; IPDI) จะถูกใช้ในสารเคลือบเนื่องจากเข้ากันได้ดีกับเม็ดสี มีความเงาและความเสถียรต่อรังสียูวี พอลิยูรีเทนที่มีหมู่ไอโซไซยาเนต มักจะมีสมบัติไม่ชอบ

น้ำ มีเสถียรภาพทางเคมี และมีความแข็งแรงมากกว่า ในขณะที่พอลิยูรีเทนที่มีหมู่ไฮดรอกซิลจะมีสมบัติชอบน้ำ ว่องไวต่อปฏิกิริยาและความยืดหยุ่นมากกว่า

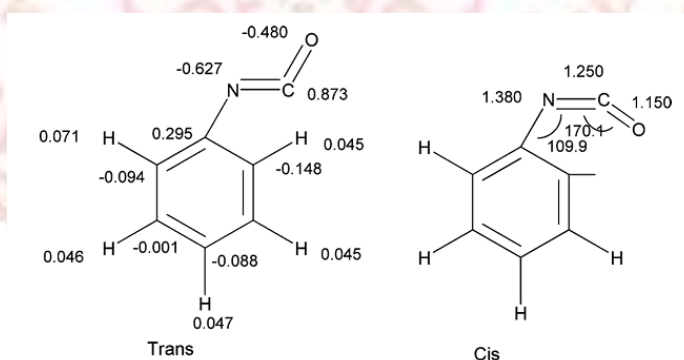
2.6.1 โครงสร้างและการเกิดปฏิกิริยาของโมโนไอโซไซยาเนต [29]

โครงสร้างทางเคมีของไดไอโซไซยาเนตประกอบด้วยพันธะคู่ระหว่าง N=C และ C=O โดยปฏิกิริยาของไอโซไซยาเนตจะขึ้นอยู่กับการเกิดโพลาไรเซชัน (Polarization) จากไนโตรเจนและออกซิเจนที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีซึ่งทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่ไปยังไนโตรเจนและออกซิเจนดังภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของพอลิยูรีเทน [29]

ภาพที่ 2-12 แสดงถึงความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ระยะห่างและมุมของโมเลกุลตามงานวิจัยของ Sacher E. [46] ที่กล่าวถึงโครงสร้างของโมเลกุลฟีนิลไอโซไซยาเนตทั้งหมดอยู่ในระนาบเดียวกัน โดยคำนวณมาจากโครงสร้างไอโซเมอร์แบบซิส/ทรานส์ ว่าพันธะคู่ใดระหว่าง N=C หรือ C=O ที่เริ่มทำปฏิกิริยาก่อนรวมถึงอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของไนโตรเจนพร้อมจะทำปฏิกิริยาหรือไม่เนื่องจากวงแหวนอะโรมาติกในโครงสร้าง

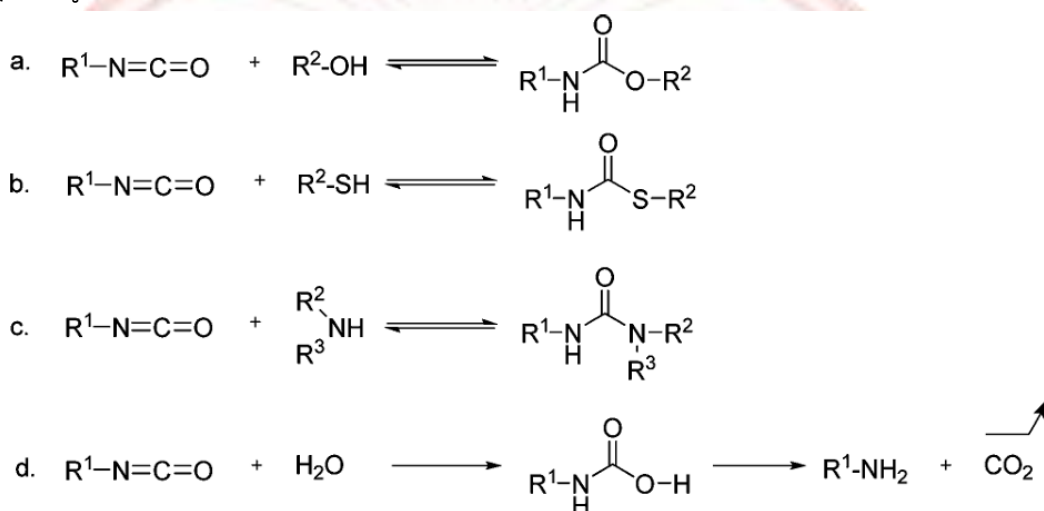


ภาพที่ 2-12 ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของแต่ละตำแหน่ง [47]

2.6.2 การเกิดพันธะยูรีเทน [47]

2.6.2.1 การเตรียมยูรีเทน ยูเรียและไตรโอยูรีเทน [47]

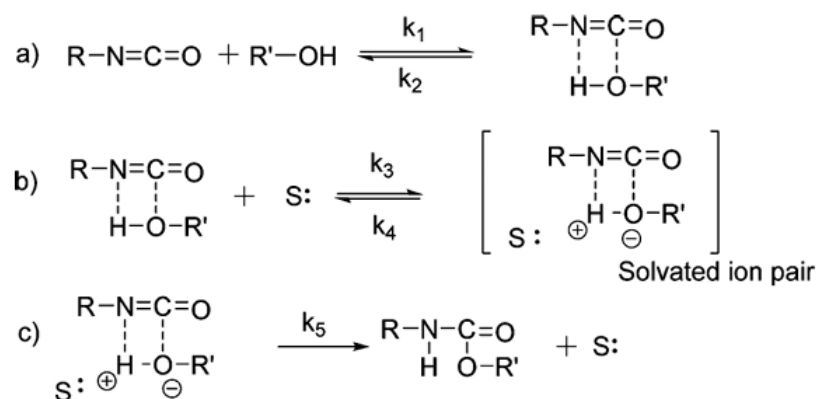
สิ่งสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาในการเตรียมพันธะยูรีเทนคือการทำปฏิกิริยากับหมู่แอลกอฮอล์ หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่เอมีนโดยภาพรวมของการเกิดปฏิกิริยาจะแสดงดังภาพที่ 2-13 โดยสมการ a เป็นการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่ไฮดรอกซิล สมการ b เป็นการทำให้ปฏิกิริยากับไตรโอยูรีเทน สมการ c เป็นการทำให้ปฏิกิริยากับหมู่เอมีนและสมการ d เป็นการทำให้ปฏิกิริยายูรีเทนโดยใช้ความชื้น



ภาพที่ 2-13 ภาพรวมของการเกิดปฏิกิริยาพันธะยูรีเทน [47]

2.6.2.2 ความเข้มข้นและอิทธิพลของสารละลาย

ความเข้มข้นของสารละลายเช่น แอลกอฮอล์แบบไดเมอร์หรือไตรเมอร์ แอลกอฮอล์-ไอโซไซยาเนต หรือแอลกอฮอล์-ตัวทำละลายไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวทำละลายด้วย เช่น ความเป็นขั้ว ความสามารถในการสร้างพันธะไฮโดรเจน และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยายูรีเทนโดยดูจากการให้อิเล็กตรอนสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-14 เริ่มจากหมู่แอลกอฮอล์ทำอันตรกิริยากับไดไอโซไซยาเนต เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน หลังจากนั้นโมเลกุลอื่นๆ เช่น สารละลาย ทำอันตรกิริยากับพันธะไฮโดรเจน เกิดเป็นอิเล็กตรอนโดดเดี่ยวทำให้การเกิดพันธะยูรีเทนง่ายขึ้น



ภาพที่ 2-14 อันตรกิริยาของสารละลาย [47]

2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts) [48]

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นเบสมีความจำเป็นในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน โดยเฉพาะกลุ่มเทอร์เทียรีเอมีน (Tertiary amine) โลหะออกไซด์ (Metal oxide) และตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงซ้อนของโลหะอินทรีย์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตพอลิยูรีเทน เช่น เพนตามetilไดเอทิลีนไตรเอมีนและไดเมทิลไซโคลเฮกซิลามีน ในขณะที่ไดอะมิโนไซโคลออกเทนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอมีนที่นิยมใช้มากที่สุดในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน นอกจากนี้สารประกอบโลหะอินทรีย์ของดีบุก มักจะนิยมใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนโดยใช้ระบบน้ำ เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วยส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิออลและไอโซไซยานต โดยชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะแสดงในตารางที่ 2-3 และตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-3 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอมีนและการนำไปใช้งาน [48]

ตัวเร่งปฏิกิริยา	สมบัติและการนำไปใช้งาน
ไดอะมิโนไซโคลออกเทน	ของแข็ง ละลายในน้ำ นิยมใช้ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน
เพนตามetilไดเอทิลีนไตรเอมีน	ของเหลว ใช้กับโพลียดียูรีเทนและโพลีเอไมด์
ไดเมทิลไซโคลเฮกซิลามีน	ของเหลว นิยมใช้กับโพลีเอไมด์
ไดเมทิลเอทิลามีน	ของเหลว โพลีเอไมด์จากพอลิเอสเทอร์

ตารางที่ 2-4 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโลหะอินทรีย์ กลือและการนำไปใช้งาน [48]

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโลหะอินทรีย์	สมบัติและการนำไปใช้งาน
สแตนเนสออกเตด	โพลียูรีเทนชนิด Slabstock ที่ทำจากพอลิอีเธอร์
ไดบิวทิลทินไดออกไซด์	ของแข็งไม่มีสี, RIM ระบบการขึ้นรูปสองช็อต (Two-pot moulding) และอีลาสโตเมอร์
ไดบิวทิลทินเมอร์แคปไทด์	ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทนทานต่อการไฮโดรไลซิสระบบกักเก็บพลังงาน
ไดบิวทิลทินไทโอคาร์บอกซิเลตและไดออกซิลทินไทโอคาร์บอกซิเลต	ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ออกฤทธิ์ล่าช้า สำหรับ RIM และโพลีที่มีความยืดหยุ่นสูง
ฟีนิลเมอร์คิวริกโปรพิโอเนต	สารเติมแต่ง และสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบหน่วงเวลาได้

2.8 สารขยายสายโซ่ [48]

สารที่มีฟังก์ชันการทำงานแบบฟังก์ชันคู่ เช่น ไกลคอล (Glycols) ไดเอมีน (Diamines) หรือไฮดรอกซิลเอมีน (Hydroxyl amine) รวมถึงไดออล (Diols) หรือเอมีนสายสั้น (Short-chain diols or amines) เช่น เอทิลีนไกลคอล และ เอทิลีนไดเอมีน (Ethylene diamine) ในขณะที่สารเชื่อมขวางมีฟังก์ชันการทำงานตั้งแต่สามฟังก์ชันขึ้นไป (Functionality of three or more) เช่น ไดเอทิลีนไตรเอมีน (Diethylene triamine) และ ไตรเอทิลีนเตตระเอมีน (Triethylene tetramine) สารขยายสายโซ่จะทำปฏิกิริยากับไดไอโซไซยาเนตเพื่อสร้างพอลิยูรีเทนหรือพอลิยูเรีย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์

2.9 การวิเคราะห์และทดสอบวัสดุ

2.9.1 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

2.9.1.1 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบโครงสร้างหรือโมเลกุลของสารโดยอาศัยการตอบสนองของโมเลกุลจากการสั่นของโมเลกุล โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ ย่านอินฟราเรดใกล้ (Near IR) ทดสอบในช่วง $4,000-12,800 \text{ cm}^{-1}$ ย่านอินฟราเรดกลาง (Mid-IR) ทดสอบในช่วง $200-4,000 \text{ cm}^{-1}$ และ ย่านอินฟราเรดไกล (Far IR) ทดสอบในช่วง $10-200 \text{ cm}^{-1}$ เมื่อสารอินทรีย์หรือโมเลกุลสารดูดกลืนรังสี จะทำให้เกิดการทรานซิชันการสั่นพร้อมกับการหมุนของโมเลกุล ปรากฏการณ์นี้จะบ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันที่มีการตอบสนองตามความยาวคลื่นนั้นๆ

การนำเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด มาประยุกต์ใช้ในด้านเคมีจะช่วย
ให้ได้ข้อมูลของตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันในสารที่ทดสอบหรือหมู่ฟังก์ชันในการเกิดปฏิกิริยาสามารถนำไปสู่
กลไกการเกิดปฏิกิริยารวมทั้งการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางเคมี

2.9.1.2 เทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ชนิดโปรตอน ($^1\text{H-NMR}$
spectroscopy)

เทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ชนิดโปรตอน เป็นวิธีที่ใช้
ในการตรวจสอบชนิดและตำแหน่งของอะตอมไฮโดรเจนในโมเลกุลโดยอาศัยหลักการของปฏิสัมพันธ์
ระหว่างแม่เหล็กนิวเคลียร์และสนามแม่เหล็กจากการเคลื่อนไหวของโมเลกุลการเปลี่ยนแปลง
โครงสร้างของโมเลกุลและผลึก รวมถึงการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมี เทคนิคนี้จะทำการ
ละลายตัวอย่างในตัวทำละลายที่เหมาะสมและวางไว้ในเครื่องวัดค่า จากนั้นอุปกรณ์จะทำการตรวจจับ
ไฮโดรเจนและแสดงผลออกมาเป็นพีคโดยจำนวนพีคจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของไฮโดรเจนอะตอม ณ
ตำแหน่งนั้นๆ

2.9.2 การทดสอบน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ด้วย
เครื่องเจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟี (Gel Permeation Chromatography; GPC)

การทดสอบน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยใช้เทคนิคเจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟีเป็น
การทดสอบที่นิยมใช้กับพอลิเมอร์ในการหาน้ำหนักโมเลกุล โดยภายในตัวเครื่องมีคอลัมน์ที่อาศัย
หลักการของตัวทำละลายที่อยู่นิ่ง (Stagnant solvent) ภายในรูพรุนของวัสดุพอลิเมอร์กึ่งของแข็งที่มี
โครงสร้างแบบเชื่อมขวางเพื่อสร้างเป็นเจล (Gel) และใช้สารละลายที่ไหลผ่านเป็นเฟสเคลื่อนที่
(Mobile phase) โดยการวัดน้ำหนักโมเลกุลใช้ความแตกต่างของขนาดโครงสร้างพอลิเมอร์ เมื่อ
โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่จะถูกแยกออกมาก่อนเนื่องจากไม่สามารถเข้าแทรกในรูพรุนของ
เจลได้จึงทำให้มีเวลาในการกักเก็บ (retention time) สั้นที่สุด

2.9.3 การวัดมุมสัมผัสน้ำและพลังงานพื้นผิว (Water contact angle and Surface energy)

การวัดทำด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสน้ำ Dataphysics รุ่น OCA-15EC ประเทศเยอรมนี
พร้อมซอฟต์แวร์ SCA20_U ในโหมด Static Sessile Drop โดยหยดน้ำกลั่นปริมาตร 2 ไมโครลิตร
ลงบนผิวฟิล์มอย่างเบาและบันทึกรูปทรงหยดน้ำด้วยระบบดิจิทัลเพื่อนำมาวิเคราะห์ โดยจะทำการ
หยดน้ำ 3 หยดแบบสุ่มของแต่ละตัวอย่าง และใช้ค่าเฉลี่ยเป็นค่ามุมสัมผัสโดยความสัมพันธ์
ระหว่างมุมสัมผัส (θ) และองค์ประกอบของพลังงานพื้นผิวถูกอธิบายด้วยสมการของยัง

$$\cos\theta = \left(\frac{\gamma_{SG} - \gamma_{LS}}{\gamma_{LG}} \right) \quad (3-4)$$

โดยที่ γ_{SG} , γ_{LS} และ γ_{LG} แทนค่าพลังงานพื้นผิวที่บริเวณรอยต่อระหว่างของแข็ง-ก๊าซ ของเหลว-ของแข็ง และของเหลว-ก๊าซ ตามลำดับ

แบบจำลองนี้ให้คำอธิบายพื้นฐานเกี่ยวกับสมบัติการเปียกของพื้นผิว สำหรับพื้นผิวที่มีความขรุขระในระดับไมโครหรือนาโน ค่ามุมสัมผัสเชิงปรากฏถูกอธิบายเพิ่มเติมด้วยแบบจำลองแคสซี-แบกซ์เตอร์

$$\cos\theta_{CB} = f_1(\cos\theta_1 + 1) - 1 \quad (3-5)$$

โดยที่ θ_{CB} คือ มุมสัมผัสเชิงปรากฏบนพื้นผิวที่ขรุขระ, f_1 คือ สัดส่วนพื้นที่สัมผัสระหว่างของเหลว-ของแข็ง และ θ_1 คือ มุมสัมผัสที่แท้จริงซึ่งวัดบนพื้นผิวเรียบ ความสัมพันธ์นี้อธิบายได้ว่าความขรุขระของพื้นผิวสามารถเพิ่มสมบัติการไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) ได้โดยการลดพื้นที่สัมผัสที่ระหว่างของเหลว-ของแข็ง และกักเก็บอากาศไว้ได้หยดน้ำ

ค่าพลังงานผิว (SE) ของฟิล์มพอลิยูรีเทน ถูกกำหนดเพิ่มเติมโดยการวัดมุมสัมผัสกับของเหลวทดสอบ 3 ชนิด ได้แก่ น้ำ ฟอว์มาไมด์ และเอทิลีนไกลคอล ซึ่งถูกเลือกมาเนื่องจากมีสมบัติเชิงขั้วและการกระจายตัวที่แตกต่างกัน จากนั้นจึงคำนวณค่าพลังงานพื้นผิวโดยใช้วิธีการค่าเฉลี่ยฮาร์มอนิกของวู

$$\gamma_{LG}(1 + \cos\theta) = 4 \left(\frac{\gamma_L^d \gamma_S^d}{\gamma_L^d + \gamma_S^d} + \frac{\gamma_L^p \gamma_S^p}{\gamma_L^p + \gamma_S^p} \right) \quad (3-6)$$

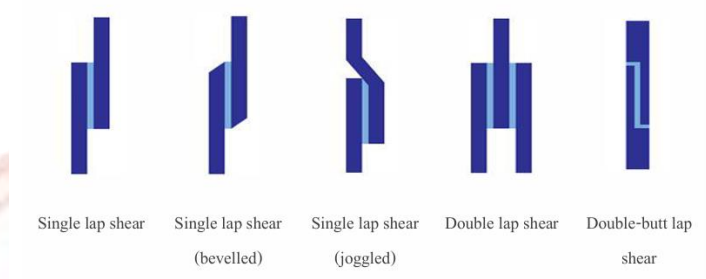
โดยที่ γ_L^d และ γ_S^d คือองค์ประกอบกระจายตัว (Dispersive components) ของของเหลวและของแข็ง, γ_L^p และ γ_S^p คือองค์ประกอบเชิงขั้ว (Polar components) ของของเหลวและของแข็ง และ γ_{LG} คือค่าความตึงผิวที่อินเตอร์เฟซของเหลว-ก๊าซ วิธีการนี้ช่วยให้สามารถประมาณค่าพลังงานผิวรวมได้ โดยแยกส่วนที่เกิดจากแรงเชิงขั้วและการกระจายตัวออกจากกัน

2.9.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

2.9.4.1 การทดสอบแรงเฉือน (Lap shear testing)

กระบวนการทดสอบการดึงยึดสำหรับการทดสอบการยึดเกาะโดยดึงวัสดุที่ประกบติดกันให้แยกออกจากกันเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการยึดเกาะ จากผลการทดสอบสามารถอธิบายได้จากพฤติกรรมการแยกตัวของชั้นกาวจากพื้นผิววัสดุ โดยแรงดึงจะส่งผลต่อการฉีกขาดหรือหลุดออกจากกระนาบ โดยเทคนิคการทดสอบจะแสดงดังในภาพที่ 2-15 ในกระบวนการทดสอบนี้

ชิ้นงานของตัวอย่าง 2 ชิ้นจะถูกยึดด้วยปากคีบและดึงออกจากกันด้วยอัตราเร็วคงที่ โดยแรงที่กระทำจะสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวของกาวหรือพื้นที่เฉือน



ภาพที่ 2-15 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงเฉือน [48]

2.9.5 เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เป็นหนึ่งในเครื่องมือที่สามารถส่องพื้นผิวของวัสดุโดยใช้อิเล็กตรอนสะท้อนหรือตอบสนองกับอะตอมที่ทำให้เกิดการส่งสัญญาณเพื่อให้เกิดภาพพื้นผิวของวัสดุ เมื่ออิเล็กตรอนกระทบกับพื้นผิวตัวอย่าง จะเกิดการปฏิสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมในตัวอย่าง เช่น การปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons) หรืออิเล็กตรอนสะท้อนกลับ (Backscattered electrons) โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ปล่อยออกมาจะถูกตรวจจับโดยตัวตรวจจับ (Detector) และข้อมูลจะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วจะถูกประมวลผลเป็นภาพที่แสดงรายละเอียดของพื้นผิวชิ้นงาน

2.9.6 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

2.9.6.1 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

เป็นเทคนิคทางความร้อน ที่ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุเมื่อถูกให้ความร้อนหรือความเย็น โดยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์จะวัดการไหลของความร้อน (Heat flow) ในตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารอ้างอิง ขณะที่มีการเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง สมบัติที่สามารถวิเคราะห์ได้จากดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ได้แก่

ก. อุณหภูมิการเปลี่ยนแก้ว (Glass transition temperature; T_g) – บ่งบอกถึงการเปลี่ยนสภาพจากโครงสร้างที่แข็งเปราะไปสู่โครงสร้างที่ยืดหยุ่น

ข. อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature; T_m) – ชี้ให้เห็นถึงการเปลี่ยนจากของแข็งไปเป็นของเหลว

ค. การตกผลึก (Crystallization temperature; T_c) – การเปลี่ยนจากสถานะไม่เป็นระเบียบไปเป็นผลึก

ง. ค่าพลังงานในการเปลี่ยนเฟส (Enthalpy change; ΔH) – ใช้อธิบายกระบวนการดูดความร้อนหรือคายความร้อนของวัสดุ

จ. การสลายตัวทางความร้อนบางส่วน – สามารถตรวจสอบลักษณะการเสื่อมสภาพเบื้องต้น

2.9.6.2 การวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก

เป็นเทคนิคทางความร้อนเชิงวิเคราะห์ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงมวลของตัวอย่างเมื่อถูกให้ความร้อนหรือความเย็นภายใต้บรรยากาศควบคุม เช่น อากาศหรือไนโตรเจน โดยตัวเครื่องจะบันทึกมวลของตัวอย่างต่ออุณหภูมิหรือเวลา ทำให้สามารถวิเคราะห์กระบวนการเสื่อมสภาพหรือการสลายตัวของวัสดุได้ สมบัติที่สามารถวิเคราะห์ได้จากเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก ได้แก่

ก. ความเสถียรทางความร้อน (Thermal stability) – การตรวจสอบว่าพอลิเมอร์หรือวัสดุเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิใด

ข. อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (Onset decomposition temperature; T_{onset}) – จุดเริ่มต้นของการเสื่อมสภาพ

ค. อัตราการสูญเสียมวลสูงสุด (Maximum degradation rate; T_{max}) – ระบุช่วงที่วัสดุสลายตัวมากที่สุด

ง. ขี้เถ้าหลังเผาไหม้ (Residual char content) – ใช้วิเคราะห์ส่วนประกอบที่ไม่ระเหยหรือเสถียรต่อความร้อน

จ. การระบุองค์ประกอบหลายขั้น (Multi-step degradation) – แยกกระบวนการสลายตัวของวัสดุผสมหรือคอมโพสิต

2.9.5 การวิเคราะห์สมบัติการไหล

สมบัติการไหลมีบทบาทสำคัญต่อการใช้งานจริง ทั้งในด้านการกระจายตัวบนพื้นผิว ความหนาของฟิล์มและประสิทธิภาพการยึดเกาะ เนื่องจากสัมพันธ์โดยตรงกับความหนืดและพฤติกรรมการไหลของระบบพอลิเมอร์ เครื่องวัดการไหลแบบหมุนเป็นเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ในการศึกษาสมบัติต่างๆ โดยทำงานบนหลักการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนภายใต้การควบคุมแบบหมุน (Rotational mode) ซึ่งสามารถบ่งบอกค่าความหนืดและพฤติกรรมการไหลของวัสดุได้ สำหรับสารละลายพอลิเมอร์ที่มีความหนืดสูง มักเลือกใช้การจัดเรียงแบบโคนและแผ่นเรียบหรือแผ่นต่อแผ่นเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะตัวอย่างและลดข้อผิดพลาดในการทดสอบ โดยพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะมีพฤติกรรมการไหลแบบเชียร์ทินนิง (Shear-thinning) ความหนืดจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราเฉือน ซึ่งเป็นสมบัติที่เอื้อต่อการใช้งานจริง ทั้งในด้านการเคลือบและการกระจายตัวบน

พื้นผิว นอกจากนี้การทดสอบในโหมดการสั่น (Oscillatory mod) ยังสามารถให้ข้อมูลเชิงโครงสร้างภายใน เช่น ค่ามอดูลัสกักเก็บ (Storage modulus: G') และ มอดูลัสสูญเสีย (Loss modulus: G'') ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมวิสโคอีลาสติกของโครงสร้างพอลิเมอร์ ดังนั้นเครื่องวัดการไหลแบบหมุนจึงเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมในการประเมินผลขององค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างโมเลกุลต่อสมบัติการไหลและการใช้งานของพอลิเมอร์



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

โครงการวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับสารเคลือบที่เตรียมได้จากพอลิยูรีเทนจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปรและพอลิเอทิลีนไกลคอล 3,000 กรัม/โมล ซึ่งจะทำให้การศึกษาสมบัติเชิงกล การวัดมุมสัมผัสน้ำและพลังงานพื้นผิว ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อน เพื่อเตรียมและศึกษาสมบัติต่างๆ โดยจำแนกส่วนและขั้นตอนได้ดังนี้

- 3.1 สารเคมี
- 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ
- 3.3 วิธีการทดลอง
- 3.4 วิธีการทดสอบ

3.1 สารเคมี

3.1.1 พอลิเอทิลีนไกลคอล 3,000 กรัม/โมล

พอลิเอทิลีนไกลคอล มีลักษณะเป็นเกล็ดขาว ใช้เป็นพอลิออลในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน ผลิตโดย FAOT นครศรีธรรมราช ประเทศไทย

3.1.2 2,4 โทลูอินไดไอโซไซยาเนต

โทลูอินไดไอโซไซยาเนต มีลักษณะเป็นของเหลวใส ใช้เป็นไดไอโซไซยาเนตในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน ผลิตจากบริษัท ไทย-ไลซาท จำกัด พระนครศรีอยุธยา ประเทศไทย

3.1.3 เอทิลีนไกลคอล

เอทิลีนไกลคอล มีลักษณะเป็นของเหลวใส ความเข้มข้น 99เปอร์เซ็นต์ ใช้เป็นสารขยายสายโซ่ในพอลิยูรีเทน ผลิตโดยบริษัท สยามเคมี จำกัด (มหาชน) สมุทรปราการ ประเทศไทย

3.1.4 ไดบิวทิลทินไดลอเรต

ไดบิวทิลทินไดลอเรต มีลักษณะเป็นของเหลวใส ความเข้มข้น 100 เปอร์เซ็นต์ ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน ผลิตโดยบริษัท สยามเคมี จำกัด (มหาชน) สมุทรปราการ ประเทศไทย

3.1.5 น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร

น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร ใช้เป็นพอลิออกตัวที่ 2 ในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทน โดยสังเคราะห์จาก NAS Lab

3.1.6 เตตระไฮโดรฟลูอเรน

เตตระไฮโดรฟลูอเรนใช้เป็นสารละลาย มีความเข้มข้น 99.6 เปอร์เซ็นต์ ซื้อจากบริษัท อาร์ซีไอ แล็บสแกน จำกัด สมุทรสาคร ประเทศไทย

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.2.1 ชุดสังเคราะห์พอลิออลจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว ประกอบด้วย หม้อปฏิกรณ์ (Reactor) ที่ใช้ทำปฏิกิริยาขนาด 2 ลิตร ที่ต่อกับเครื่องกวนพร้อมใบพัดติดตั้งในอ่างน้ำ โดยมีระบบหล่อเย็นด้วย คอนเดนเซอร์ ดังแสดงในภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 ชุดอุปกรณ์สังเคราะห์พอลิออลจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว

3.2.2 เครื่องกวน (Mechanical stirrer) รุ่น C-MAG-HS7 สามารถปรับความเร็วได้ตั้งแต่ 50-2,000 รอบ/นาที ผลิตโดยบริษัท IKA ประเทศเยอรมนี

3.2.3 เตาให้ความร้อน (Heating plate) รุ่น C-MAG HS7 Package พร้อมด้วยอุปกรณ์กวนสารด้วยแม่เหล็ก ภายในเครื่องและมีระบบควบคุมอุณหภูมิในช่วง 50-500 องศาเซลเซียส ผลิตโดยบริษัท IKA® ประเทศเยอรมนี

3.2.4 เครื่องชั่ง (Balance) ใช้ในการชั่งสารเคมีและตัวอย่างโดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น A&B HR 250 ผลิตโดย A&D company ประเทศญี่ปุ่น

3.2.5 ตู้อบอากาศร้อน (Hot air oven) ขนาดความจุ 53 ลิตร รุ่น Memmert-UN450 ผลิตโดย Memmert ประเทศเยอรมนี สามารถควบคุมอุณหภูมิได้สูงถึง 250 องศาเซลเซียส และตั้งเวลาในการปิดได้นานถึง 24 ชั่วโมง

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การดัดแปรโครงสร้างน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว

น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว จะเป็นน้ำมันปาล์มที่เก็บหลังจากกระบวนการทอดประมาณ 2-3 ครั้ง ทำการรวบรวมแล้วกรองทำความสะอาดน้ำมันก่อนทำการดัดแปรโครงสร้างโดยใช้น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว (UPO) ทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน โดยทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) / กรดฟอร์มิก ($HCOOH$) ที่อัตราส่วนระหว่าง $UPO/H_2O_2/HCOOH = 1/0.5/0.5$ ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 400 รอบ/นาที หลังจากนั้นทำการแยกน้ำมันปาล์มดัดแปรด้วยเอทิลอะซิเตท (Ethyl acetate) แล้วล้างด้วย สารละลาย โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate; $NaHCO_3$) ตามด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว ($NaCl$) ทำการแยกชั้นน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร มาทำการแยกสารละลายออกให้เป็นสารบริสุทธิ์ นำน้ำมันที่ผ่านการดัดแปรและทำบริสุทธิ์แล้วไปตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟลูออโรกราฟฟี อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี และหาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิคโครมาโตกราฟีแบบเจลซึมผ่าน

3.3.2 การสังเคราะห์พอลิยูรีเทน

การเตรียมพอลิยูรีเทนถูกเตรียมในระบบสารละลาย โดยเตรียมในขวดแก้วกันกลม 3 คอ นำพอลิเอทิลีนไกลคอลจากพอลิเอทิลีนไกลคอลที่อัตราส่วน 50/50 โดยโมล และสารตัวเร่งปฏิกิริยาใส่ลงในขวดแก้วกันกลม 3 คอ จากนั้นนำชุดขวดแก้วกันกลม 3 คอ ติดตั้งชุดควบคุมแบบเกลียว โดยทำปฏิกิริยาในระบบด้วยแก๊สไนโตรเจนเพื่อป้องกันออกซิเจนเข้าไปในระบบระหว่างเกิดปฏิกิริยา โดยจะควบคุมอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วในการกวนที่ 200 รอบต่อนาที หยดโพลีอินโดไลโซไซยานาตเข้าไปในระบบ ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที หลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยาให้ทำการคูลดาวน์เพื่อลดอุณหภูมิในระบบให้อยู่ในอุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการใส่เอทิลีนไกลคอล โดยควบคุมปริมาณที่ 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 โมล แล้วกวนต่อเป็นเวลา 10 นาที เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาแล้วทำการเทสารเคลือบพอลิยูรีเทนลงในขวดไดออล และทำการระเหยสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเก็บในตู้เย็นเพื่อทำการทดสอบต่อไป โดยสูตรในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 สูตรการเตรียมพอลิยูรีเทนที่อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ

สูตรพอลิยูรีเทน	mUPO (โมล)	PEG 3,000 (โมล)	DBTL (ไมโครลิตร)	TDI (โมล)	EG (โมล)
EG0	1	1	1	2	0
EG1				3	1
EG2				4	2
EG3				5	3
EG4				6	4
EG5				7	5

3.4 วิธีการทดสอบ

3.4.1 การทดสอบน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร

3.4.1.1 การหาความเป็นกรดของพอลิออล

ในการหาค่าความเป็นกรดของพอลิออลทำตาม ASTM D4662 โดยชั่งพอลิออลมาประมาณ 5 กรัม ใส่ในขวดชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วทำการไทเทรต (1 เบนซิน/1 อีทานอล) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงไปเขย่าให้เข้ากัน แล้วนำสารผสมที่ได้มาไทเทรตด้วย 0.1 นอร์มัลลิตีของ KOH โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ สังเกตจุดยุติจะเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีชมพู และทำสารเทียบควบคู่ไปด้วยแล้วทำการคำนวณหาค่าความเป็นกรดของพอลิออลตามสมการที่ 3-1

$$\text{ปริมาณกรด} = \frac{56.1[A-B] \times N}{W} \quad (3-1)$$

โดยที่ A = ปริมาตรของ KOH ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของ KOH ที่ใช้ในการไทเทรตสารเทียบ (มิลลิลิตร)

W = น้ำหนักของพอลิออล (กรัม)

และ N = ความเข้มข้นของ KOH (นอร์มัลลิตี)

3.4.1.2 การหาค่าหมู่ไฮดรอกซิล

ในการหาค่าหมู่ไฮดรอกซิล ทำตาม ASTM D4274 โดยชั่งพอลิออลมาประมาณ 3 กรัม ใส่ในขวดกันกลม ขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วไปเปิดด้วยกรดพาทาลิกแอนไฮไดรด์ผสมกับไพรีดินที่อัตราส่วน 1 : 6 โดยปริมาตร โดยทำการรีฟลักซ์ (Reflux) ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเมื่อครบกำหนดเวลา จึงทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องโดยการเติมน้ำกลั่นเย็น 50 มิลลิลิตร ลงไปซ้ำๆ ผ่านทางปากคอนเดนเซอร์ และทำการเขย่าให้เข้ากันแล้วนำไปไทเทรตด้วย 1 นอร์มัลลิตี KOH โดยใช้ ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ โดยสังเกตจุดยุติจะเป็นจากใสไม่มีสีเป็น สีชมพู ทำสารเทียบควบคู่ไปด้วย แล้วทำการคำนวณหาค่าหมู่ไฮดรอกซิลตามสมการที่ 3-2

$$\text{OH number} = \frac{56.1[B-A]}{W} + \text{Acid number} \quad (3-2)$$

โดยที่ A = ปริมาตรของ KOH ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรของ KOH ที่ใช้ในการไทเทรตสารเทียบ (มิลลิลิตร)

และ W = น้ำหนักของพอลิออล (กรัม)

3.4.1.3 การหาค่าไอโอดีน

ในการหาค่าไอโอดีน ทำตาม ASTM D4671 โดยชั่งพอลิออลมาประมาณ 0.05 กรัม ใส่ในขวดชมพูขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วไปเปิดด้วยสารละลายวิดส์ (Wij's solution) ซึ่งเป็น สารละลายไอโอดีนละลายอยู่ในกรดอะซิติก และมีไอโอดีนโมโนคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 20 มิลลิลิตร จากนั้นนำของผสมตั้งทิ้งไว้ที่มีดเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำสารผสมที่ได้มาไทเทรตกับ โซเดียมไธโอซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัลลิตี โดยใช้น้ำแบ่งเป็นอินดิเคเตอร์ สังเกตสีจาก ของเหลวใสสีเหลืองเข้มเป็นของเหลวใสไม่มีสี อ่านปริมาตรที่ได้และทำการควบคุมควบคู่ไปด้วย แล้วทำการคำนวณหาค่าไอโอดีนตามสมการที่ 3-3

$$\text{Iodine number} = \frac{(V1-V2) \times N \times 126.9 \times 100}{W} + \text{Acid number} \quad (3-3)$$

โดยที่ V1 = ปริมาตรโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต Blank (มิลลิลิตร)

V2 = ปริมาตรโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของโซเดียมไธโอซัลเฟต

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

3.4.1.4 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตร มิเตอร์ชนิดโปรตรอน

นำสารตัวอย่างประมาณ 10-20 มิลลิกรัม ที่ต้องการวิเคราะห์ละลายใน ดิวเทอเรียมคลอโรฟอร์ม (CDCl_3) ซึ่งเป็นตัวทำละลาย โดยใส่สารละลายตัวอย่างลงในหลอด NMR

ความสูงของสารละลายตัวอย่างไม่น้อยกว่า 4 เซนติเมตร แล้วนำไปวางในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นวิทยุความถี่ 500 เมกกะเฮิร์ตซ์

3.4.1.5 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

นำตัวอย่าง ใส่ในช่องทดสอบ และทำการทดสอบโดยใช้เทคนิคการสะท้อน (Attenuated total reflectance; ATR) แต่ละสเปกตรัมได้จากการเฉลี่ยสัญญาณจำนวน 32 ครั้ง เพื่อเพิ่มอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน โดยทดสอบในช่วง $400-4,000\text{ cm}^{-1}$ ตัวอย่างถูกเตรียมเป็นฟิล์มบางและทำให้แห้งก่อนการวัดเพื่อจัดการรบกวนจากตัวทำละลายและความชื้นที่ตกค้าง นอกจากนี้ยังได้ทำการเก็บสเปกตรัมพื้นหลัง (Background spectrum) ก่อนการวัดทุกครั้ง เพื่อให้มั่นใจในความถูกต้องและเพื่อลดการรบกวนจากบรรยากาศ

3.4.2 การทดสอบพอลิยูรีเทน

3.4.2.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

นำตัวอย่างใส่ในช่องทดสอบ และทำการทดสอบโดยใช้เทคนิคการสะท้อน แต่ละสเปกตรัมได้จากการเฉลี่ยสัญญาณจำนวน 32 ครั้ง เพื่อเพิ่มอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน โดยทดสอบในช่วง $400-4,000\text{ cm}^{-1}$ ตัวอย่างถูกเตรียมเป็นฟิล์มบางและทำให้แห้งก่อนการวัดเพื่อจัดการรบกวนจากตัวทำละลายและความชื้นที่ตกค้าง นอกจากนี้ยังได้ทำการเก็บสเปกตรัมพื้นหลังก่อนการวัดทุกครั้งเพื่อให้มั่นใจในความถูกต้องและเพื่อลดการรบกวนจากบรรยากาศ

3.4.2.2 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์

นำสารตัวอย่างประมาณ 10-20 มิลลิกรัม ที่ต้องการวิเคราะห์ละลายในดิโอเทอเรียมคลอโรฟอร์มซึ่งเป็นตัวทำละลาย โดยใส่สารละลายตัวอย่างลงในหลอด NMR ความสูงของสารละลายตัวอย่างไม่น้อยกว่า 4 เซนติเมตร แล้วนำไปวางในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นวิทยุความถี่ 500 เมกกะเฮิร์ตซ์

3.4.2.3 การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยและการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ด้วยเครื่องเจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟี

ละลายตัวอย่างพอลิยูรีเทนในตัวทำละลายเตตระไฮโดรฟิวแรน ที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการกรองสารละลายผ่านไส้กรองเพื่อให้สารละลายไม่อุดตันในคอลัมน์ ฉีดตัวอย่างเข้าคอลัมน์ในอัตราการไหลที่ 1.00 มิลลิลิตร/นาที น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จะเทียบกับสารละลายมาตรฐานพอลิสไตรีน

3.4.2.4 การวิเคราะห์สมบัติการไหลด้วยเครื่องวัดรีโอมิเตอร์แบบหมุน

ทำการระเหยสารละลายพอลิยูรีเทนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อระเหยสารละลายที่อยู่ในระบบ หลังจากนั้นทำการศึกษาพฤติกรรมของการไหลโดยใช้เครื่องวัดรีโอมิเตอร์แบบหมุน (Kinexus Lab+) ความหนืดเฉือนถูกวัดด้วยโครงสร้างแผ่นขนานตามมาตรฐาน ASTM D2196 โดยมีอัตราเฉือนตั้งแต่ 0.0001 ถึง 100 วินาที⁻¹ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส การทดสอบการสั่นได้ดำเนินการโดยใช้การตั้งค่าเดียวกันตามมาตรฐาน ASTM D4440 ที่ความเครียดคงที่ 10 เปอร์เซ็นต์ และช่วงความถี่ 0.1–10 เฮิรตซ์ เพื่อหาค่ามอดูลัสกักเก็บ (G') และมอดูลัสสูญเสีย (G'')

3.4.2.5 การวัดมุมสัมผัสน้ำและพลังงานพื้นผิว

นำสารเคลือบพอลิยูรีเทนปริมาณ 0.5 มิลลิลิตรมาทำการเคลือบลงบนแผ่นกระจก หลังจากนั้นปาดสารละลายให้ทั่วบนพื้นผิวกระจก แล้วทำการอบในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้สารเคลือบพอลิยูรีเทนเกิดการแข็งตัว ทำการวัดทำด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสน้ำ Dataphysics รุ่น OCA-15EC โดยหยดน้ำกลั่นปริมาตร 2 ไมโครลิตร ลงบนผิวฟิล์มอย่างเบามือ และบันทึกรูปทรงหยดน้ำด้วยระบบดิจิทัลเพื่อนำมาวิเคราะห์ โดยจะทำการหยดน้ำ 3 หยดแบบสุ่มของแต่ละตัวอย่าง

3.4.2.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบแรงเฉือน

เตรียมชิ้นงานทดสอบแรงเฉือนโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 4587 นำสารเคลือบพอลิยูรีเทนมาทำการทาลงบนผิวกระจกโดยใช้ปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร หลังจากนั้นทำการหนีบด้วยคลิปหนีบกระดาษแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเข้าเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้สารเคลือบเกิดการแข็งตัว แล้วทำการทดสอบการดึงชิ้นงานทดสอบโดยใช้เทคนิคทดสอบแรงเฉือนโดยใช้โหลดเซลล์ 2,500 กิโลนิวตัน ความเร็วในการดึง 10 มิลลิเมตร/นาที โดยก่อนทำการทดสอบให้พันเทปกาวยางกาวเหนียวบริเวณที่จะหนีบเพื่อป้องกันการเลื่อนของชิ้นงานระหว่างทดสอบ

3.4.2.7 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

หลังการทดสอบแรงเฉือน ทำการตัดชิ้นงานขนาด 5x5 มิลลิเมตร แล้วนำไปเคลือบทองโดยทดสอบภายใต้สภาวะสุญญากาศสูงและแรงดันไฟฟ้าสูงที่ 20 กิโลโวลต์ โดยได้บันทึกภาพที่กำลังขยาย 500 เท่า และ 5,000 เท่า เพื่อประเมินลักษณะพื้นผิวที่ฉีกขาดของตัวอย่าง

3.4.2.8 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

ทำการเตรียมตัวอย่างโดยทำการอบสารเคลือบพอลิยูรีเทนในเตาอบลมร้อนเพื่อระเหยสารละลายที่อยู่ในระบบ หลังจากนั้นนำพอลิยูรีเทนใส่ในช่องทดสอบและทำการทดสอบภายใต้สภาวะไนโตรเจน ณ ช่วงอุณหภูมิ -80 ถึง 150 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการทำความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียส

3.4.2.9 การวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก

ทำการเตรียมตัวอย่างโดยทำการอบสารเคลือบพอลิยูรีเทนในเตาอบลมร้อนเพื่อระเหยสารละลายที่อยู่ในระบบ หลังจากนั้นนำพอลิยูรีเทนใส่ในช่องทดสอบและทำการทดสอบภายใต้สภาวะไนโตรเจน ณ ช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 600 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการทำความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที



บทที่ 4

ผลการวิจัย

โครงการวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับสารเคลือบที่เตรียมจากพอลิยูรีเทนจากพอลิออลผสมระหว่างน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วตัดแปรกับพอลิเอทิลีนไกลคอล 3,000 กรัม/โมล ได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

- 4.1 ผลการตัดแปรโครงสร้างของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว
- 4.2 ผลการทดสอบพอลิยูรีเทน

4.1 ผลการตัดแปรโครงสร้างของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว

4.1.1 สมบัติทางกายภาพ

ภาพที่ 4-1 แสดงลักษณะทางกายภาพของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วตัดแปร พบว่าน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วที่ไม่ผ่านกระบวนการกรองมีสีเหลืองอ่อนและมีความหนืดสูงซึ่งสอดคล้องกับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน เนื่องจากความร้อนระหว่างการทอดทำให้เกิดโครโมฟอร์ ได้แก่ คาร์บอนิลเชื่อมต่อกัน หรือพันธะที่ไม่อิ่มตัว รวมทั้งสารตกค้างที่มีมวลโมเลกุลสูง [49] หลังจากการตัดแปรโครงสร้างแล้ว น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วตัดแปรมีลักษณะใสและความหนืดลดลงอย่างชัดเจนซึ่งบ่งบอกถึงการจัดและการเปลี่ยนแปลงของโครโมฟอร์ นอกจากนี้ยังบ่งบอกถึงสิ่งปนเปื้อนที่ลดลงรวมทั้งความเข้ากันได้ของสารละลายซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในการสังเคราะห์พอลิออลจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว



ภาพที่ 4-1 ลักษณะทางกายภาพของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วและน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วตัดแปร

ตารางที่ 4-1 แสดงสมบัติของน้ำมันที่ใช้แล้วและน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร โดยแสดงค่า ไอโอดีน ค่าไฮดรอกซิล และค่าความเป็นกรด จากผลการทดสอบพบว่า ค่าไอโอดีนของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร มีค่าลดลง จาก 40.10 เป็น 0.51 เมื่อเทียบกับน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วยังไม่ผ่านกระบวนการดัดแปร แสดงให้เห็นว่า พันธะคู่ในโครงสร้างของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร มีค่าลดลง เนื่องจากผ่านกระบวนการอีพอกซิเดชันตำแหน่งพันธะคู่ และตามด้วยปฏิกิริยาการเปิดวงเป็นหมู่ไฮดรอกซิล [21] ทำให้จำนวนพันธะคู่ในโครงสร้างหลักของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร มีปริมาณลดลง นอกจากนี้จำนวนหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร มีค่าเพิ่มขึ้น จาก 0 เป็น 192.19 เมื่อเทียบกับน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วมาผ่านกระบวนการอีพอกซิเดชันเปิดพันธะคู่เป็นหมู่อีพอกไซด์และตามด้วยปฏิกิริยาการเปิดวง ทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างบริเวณพันธะคู่ [50] อย่างไรก็ตาม น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร มีค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้นจาก 1.41 เป็น 1.76 เมื่อเทียบกับน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว แสดงให้เห็นว่าในปฏิกิริยาการเปิดวง ส่งผลต่อค่าความเป็นกรดในน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร ซึ่งความเป็นกรดมากจะไปทำลายตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการขึ้นสังเคราะห์พอลิยูรีเทน ทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง [21]

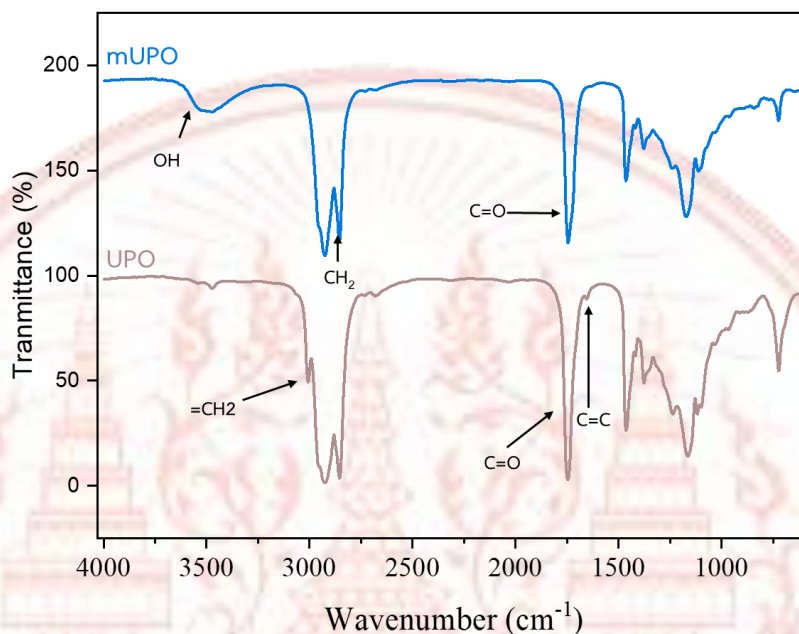
ตารางที่ 4-1 สมบัติของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว (UPO) น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร (mUPO)

สมบัติ	น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว	น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร
ค่าไอโอดีน	40.10	0.51
ค่าหมู่ไฮดรอกซิล (mg.KOH/g)	0	192.19
ค่าความเป็นกรด (mg.KOH/g)	1.41	1.76
ผลที่ได้ (เปอร์เซ็นต์)	-	90

4.1.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด

ภาพที่ 4-2 แสดงถึงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดจากผลของสเปกตรัมของฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด พบว่าน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วพบพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3100, 3,000, 2800, 1,750 และ 1,680 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน $=\text{CH}$, CH , $\text{C}=\text{O}$ และ $\text{C}=\text{C}$ ตามลำดับ ซึ่งยืนยันว่าน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วมีโครงสร้างหลักเป็นไตรกลีเซอไรด์ไม่อิ่มตัว [21] น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร พบว่าตำแหน่งพีคที่เลขคลื่น 2,800-3,000 และ 1,670 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน CH_2 และ $\text{C}=\text{C}$ ตามลำดับ รวมทั้งพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 3,100 และ 1,680 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งพันธะคู่หายไป นอกจากนี้ยังพบพีคที่สำคัญเกิดขึ้นใหม่ที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 3,500 cm^{-1} เป็นตำแหน่งการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล [21]

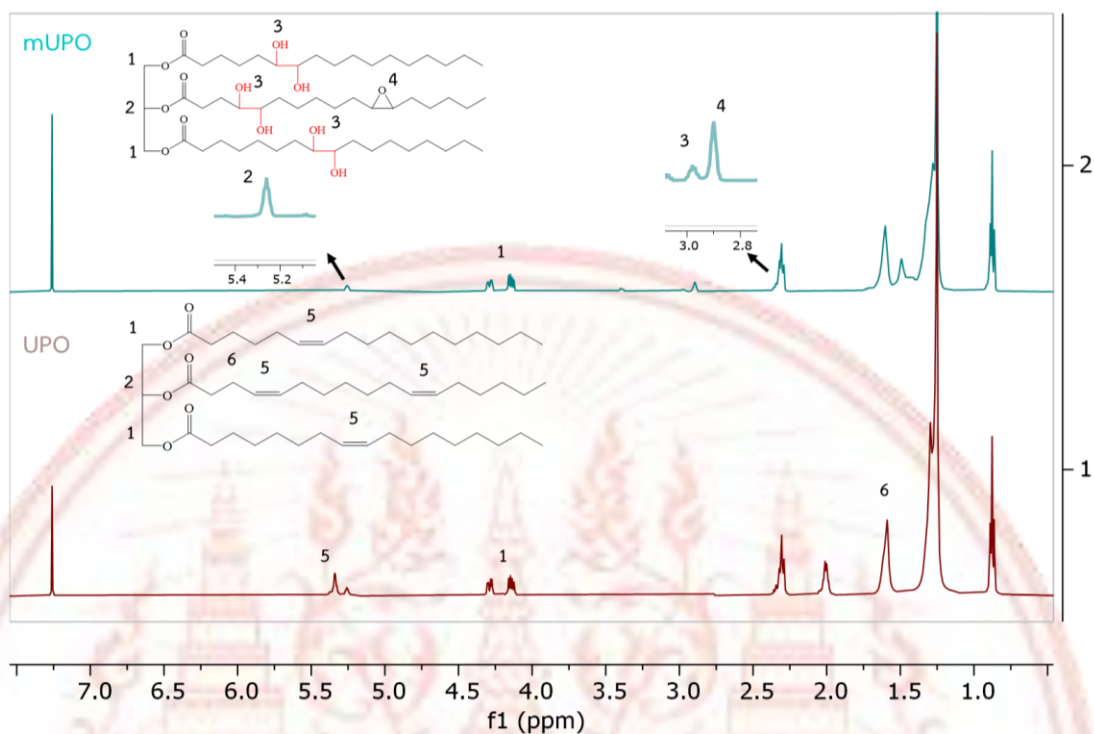
ซึ่งสามารถยืนยันผลได้ว่าน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปรมีหมู่ฟังก์ชันเป็นไฮดรอกซีซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นพอลิออลซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเตรียมพอลิยูรีเทนต่อไป



ภาพที่ 4-2 สเปกตรัมของฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว และน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร

4.1.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ชนิดโปรตอน

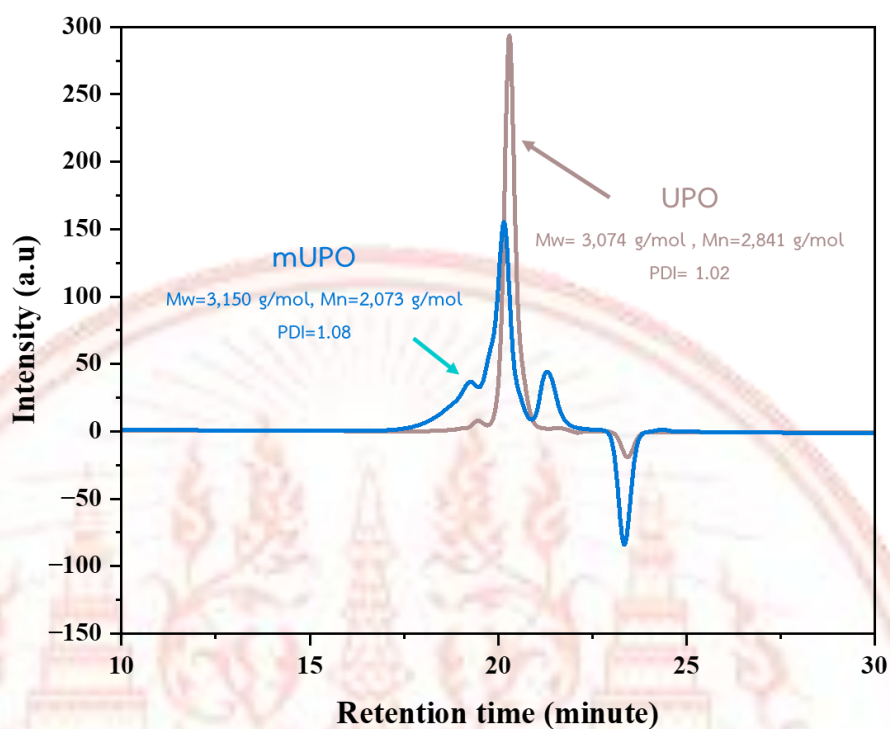
โครงสร้างของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร ดังแสดงในภาพที่ 4-3 ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ชนิดโปรตอน พบสัญญาณที่ 4.0-4.4 ppm ($-\text{CH}_2\text{O}$ ($\text{C}=\text{O}$)), 5.2-5.3 ppm ($-\text{CHO}$ ($\text{C}=\text{O}$)) และ 5.3-5.4 ppm ($-\text{CH}=\text{CH}-$) ซึ่งเป็นโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ และพบพีคใหม่ที่ 3.0-3.2 ppm ($-\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})$) เป็นไฮโดรเจนที่ต่อจากคาร์บอนที่ติดกับหมู่แอลกอฮอล์ (OH) และเกิดการหายไปของพีคที่สัญญาณ 5.3-5.4 ppm ซึ่งเป็นพันธะคู่ของไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าการดัดแปลงโครงสร้างของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว ให้เป็น พอลิออล นั้นประสบผลสำเร็จ อย่างไรก็ตามหมู่ฮิพอกซินนั้นพบที่สัญญาณ 2.9 ppm และ 1.40-1.55 ppm ($-\text{CH}(\text{O})$) แสดงว่ายังมีหมู่ฮิพอกซีเหลืออยู่ในโครงสร้าง ดังนั้นจึงสามารถยืนยันผลโครงสร้างของน้ำมันปาล์มใช้ดัดแปรได้ ดังภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรัมและโครงสร้างทางเคมีของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วและน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร

4.1.4 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์

จากผลการทดลองหาน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ผลโครมาโตแกรมของเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ ดังแสดงในภาพที่ 4-4 ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 4-2 พบค่าการกระจายช่วงของน้ำหนักโมเลกุลเป็น 2 ช่วงน้ำหนักโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุลของ น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว เท่ากับ 2,840 และ 1,250 กรัม/โมล ซึ่งมีค่าดัชนีการกระจายตัวเท่ากับ 1.02 ส่วนโมเลกุลของ น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปรมีขนาดที่ 3,073 และ 1,441 กรัม/โมล ซึ่งมีค่าดัชนีการกระจายตัวเท่ากับ 1.08 และ 1.03 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการดัดแปลงโครงสร้างของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นในทั้งสองส่วน เพราะพันธะคู่ในโครงสร้างถูกเปิดออกจากการแทนที่ด้วยหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล ซึ่งสอดคล้องกับผลการยืนยันทางโครงสร้างที่มีไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้นได้ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี นอกจากนี้ยังพบว่า การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างการเปิดวงในสายโซ่หลักของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปรนั้นเป็นแบบสุ่ม จึงทำให้เกิดการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่มากขึ้น รวมทั้งมีการตัดสายโซ่เกิดขึ้น ทำให้มีช่วงน้ำหนักโมเลกุลขนาดเล็กเกิดขึ้น



ภาพที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์เจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟีของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วและน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร

ตารางที่ 4-2 สรุปผลค่าน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วและน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร

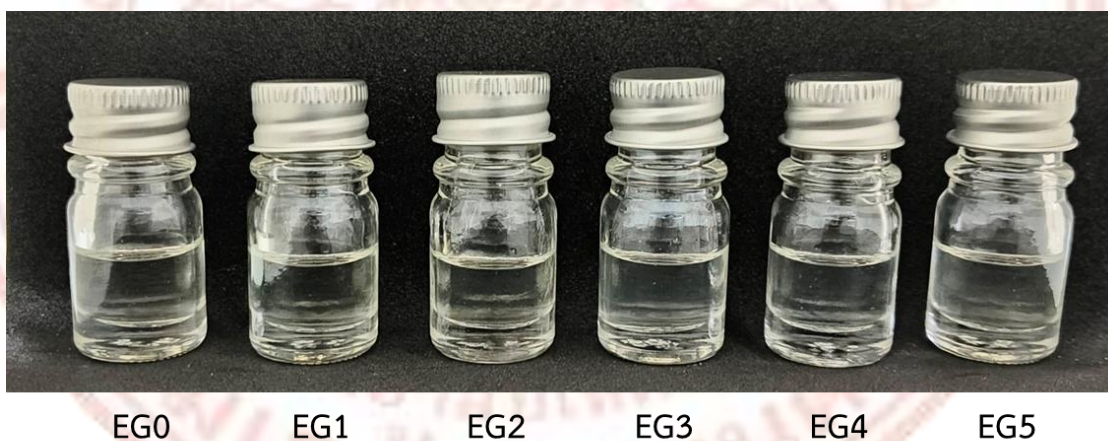
สมบัติ	น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว		น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร	
	ช่วงน้ำหนักที่ 1	ช่วงน้ำหนักที่ 2	ช่วงน้ำหนักที่ 1	ช่วงน้ำหนักที่ 2
$\bar{M}_n$ (กรัม/โมล)	2,841	1,250	3,073	1,441
$\bar{M}_w$ (กรัม/โมล)	3,074	1,287	3,150	1,469
PDI	1.02	1.02	1.08	1.03

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี และการวิเคราะห์ด้วยการไทเทรต สามารถยืนยันผลทางโครงสร้างเคมีได้ว่าสามารถเตรียมพอลิออกจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วได้ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลของพอลิออกด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์เท่ากับ 3,073 ซึ่งสมบัติดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่า พอลิออกจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วสามารถทดแทนพอลิออกจากปิโตรเลียมเพื่อเตรียมสารเคลือบพอลิยูรีเทนเพื่อต่อไปได้

4.2 ผลการทดสอบพอลิยูรีเทน

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพ

ภาพที่ 4-5 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารละลายพอลิยูรีเทนทั้งหมดที่มีความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลที่ 0-5 โมล พบว่า มีลักษณะใส และไม่พบสิ่งเจือปนในตะตระไฮโดรฟิวแลน แสดงให้เห็นถึงการใช้สภาวะและการควบคุมปฏิกิริยาได้อย่างเหมาะสม ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการเกิดเจลและส่งผลต่อการแยกเฟสในระบบได้ จากผลการทดสอบพบว่าการใช้สภาวะที่เหมาะสมช่วยเพิ่มความเป็นเนื้อเดียวกันและลดการเกิดเจล [51] นอกจากนี้ การที่สารละลายมีความใสยังบ่งชี้ว่าการจัดกลุ่มของส่วนแข็งผ่านพันธะไฮโดรเจน มีขนาดที่จำกัดอยู่เพียงในระดับนาโนเมตร จากผลการทดสอบสอดคล้องกับรายงานก่อนหน้านี้ที่กล่าวถึงหมู่ยูรีเทนและยูเรียสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงได้ง่าย ส่งผลให้เกิดการรวมตัวเฉพาะที่ของส่วนแข็งโดยไม่ทำให้เกิดความขุ่นในสารละลาย [52] หากมีการแยกเฟสระหว่างส่วนแข็งและส่วนอ่อนภายในสารละลายในระบบก็เป็นเพียงส่วนน้อยหรือมีจำนวนน้อยกว่าจะตรวจพบด้วยตาเปล่า นอกจากนี้ลักษณะของสารเคลือบพอลิยูรีเทนไม่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของสารขยายสายโซ่ที่ใส่เข้าไปในระบบ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสัดส่วนของส่วนแข็งผ่านการขยายสายโซ่ไม่ได้รับกวนความเข้ากันได้ในระบบ



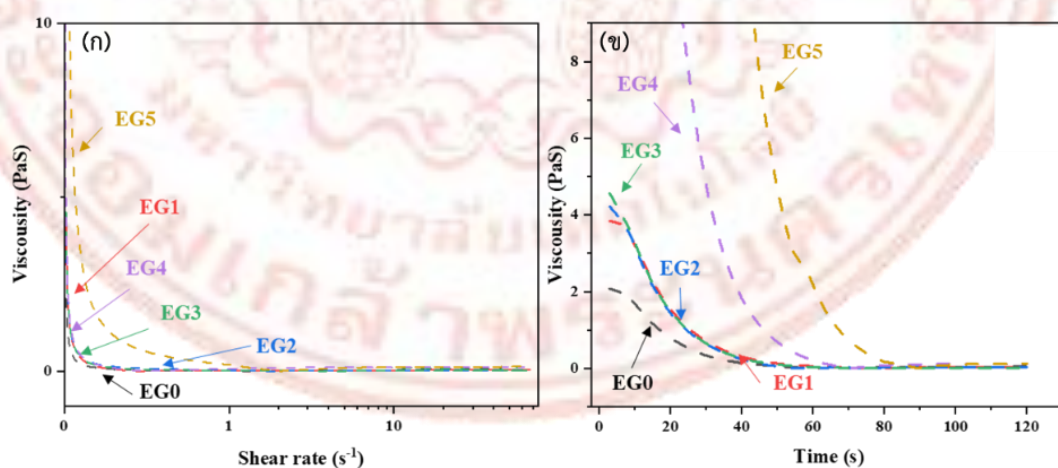
ภาพที่ 4-5 ลักษณะทางกายภาพของสารละลายพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลต่างกัน (EG0-EG5)

4.2.2 ความหนืดของสารละลาย

อิทธิพลของเอทิลีนไกลคอลต่อความหนืดของสารละลายแสดงในภาพที่ 4-6 จากผลการทดสอบพบว่าความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลเนื่องจากเอทิลีนไกลคอลทำหน้าที่เป็นสารขยายสายโซ่ซึ่งทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโพลียูรีเทนไดไฮดรอกซีเพนทาเนตเป็น

การเพิ่มส่วนแข็งในสายโซ่และเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของพอลิยูรีเทน ทำให้เกิดการพันกันของสายโซ่และขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ส่งผลให้ความหนืดของสารละลายพอลิยูรีเทนสูงขึ้น [53] นอกจากนี้ เอทิลีนไกลคอลยังส่งผลต่อสมบัติการไหลดังแสดงในภาพที่ 4-6(ก) สารละลายทั้งหมดแสดงพฤติกรรมแบบเชียร์ทินนิ่งโดยความหนืดจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราเฉือน จากพฤติกรรมแสดงให้เห็นถึงการคลายตัวของสายโซ่ตามแรงเฉือน ทำให้สายโซ่เคลื่อนตัวได้ง่ายขึ้น สารละลายที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลสูง โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอลที่ 5 โมล ที่มีค่าความหนืดสูงสุดเมื่อเทียบกับสารละลายตัวอื่นๆ ซึ่งสื่อถึงอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของส่วนแข็ง

จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและเวลาแสดงภาพที่ 4-6(ข) พบว่าความหนืดจะลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งความหนืดคงที่ จากผลการทดสอบสะท้อนให้เห็นถึงการคลายตัวของสายโซ่และการจัดเรียงตัวใหม่ของส่วนแข็งและส่วนอ่อนไปสู่จุดสมดุล โดยจะเห็นได้ชัดที่ความเข้มข้นที่ 4 โมล และ 5 โมล ที่มีปริมาณส่วนแข็งมากที่คอยขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ทำให้สายโซ่เคลื่อนตัวยากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้อธิบายเกี่ยวกับสัดส่วนของพอลิยูรีเทนที่อธิบายเกี่ยวกับการเพิ่มปริมาณของส่วนแข็งหรือการใช้สารขยายสายโซ่มากขึ้น จะทำให้การแยกเฟสระดับไมโครและการเกี่ยวพันระหว่างสายโซ่ ทำให้การคลายตัวและการจัดเรียงตัวของสายโซ่ช้า [54] จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเอทิลีนไกลคอลไม่เพียงแต่เพิ่มความหนืด แต่ยังส่งผลต่อพฤติกรรมการไหลของสารละลายพอลิยูรีเทนโดยการเพิ่มความหนาแน่นของส่วนแข็งของสายโซ่พอลิเมอร์และทำให้การคลายตัวของสายโซ่ช้าลง

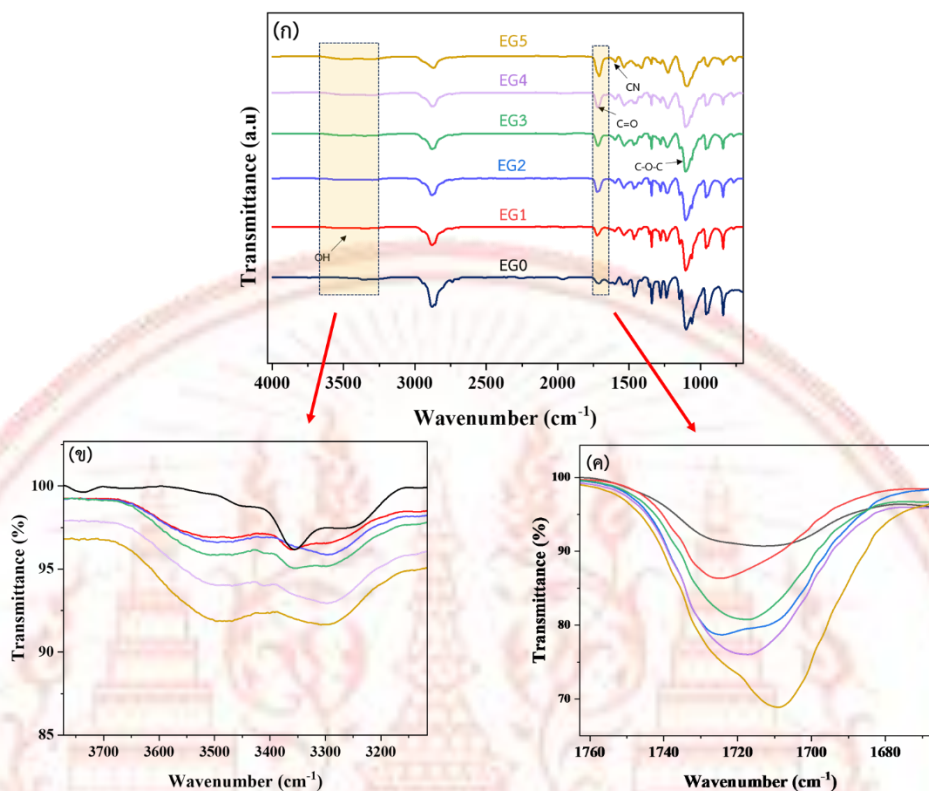


ภาพที่ 4-6 ผลการวิเคราะห์ความหนืดของสารละลายพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลต่างกัน
(ก) กราฟความหนืด-อัตราเฉือน และ (ข) กราฟความหนืด-เวลา

4.2.3 โครงสร้างทางเคมีของพอลิยูรีเทน

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปีดังแสดงในภาพที่ 4-2 และ 4-7 จากผลของสเปกตรัมของฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด พบว่าน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วพบพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3,100, 3,000, 2,800, 1,750 และ 1,680 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน $=\text{CH}$, CH , $\text{C}=\text{O}$ และ $\text{C}=\text{C}$ ตามลำดับ ซึ่งยืนยันว่าน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วมีโครงสร้างหลักเป็นไตรกลีเซอไรด์ไม่อิ่มตัว น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร พบว่าตำแหน่งพีคที่เลขคลื่น 2,800-3,000 และ 1,670 cm^{-1} เป็นพีคการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน $-\text{CH}_2$ และ $\text{C}=\text{C}$ ตามลำดับ รวมทั้งพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 3,100 และ 1,680 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งพันธะคู่หายไป นอกจากนี้ยังพบพีคที่สำคัญเกิดขึ้นใหม่ที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 3,500 cm^{-1} เป็นตำแหน่งการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ซึ่งสามารถยืนยันผลได้ว่าน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปรมีหมู่ฟังก์ชันเป็นไฮดรอกซิลซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นพอลิออลซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการเตรียมพอลิยูรีเทนต่อไป

หลังจากสังเคราะห์พอลิยูรีเทน พบการสั่นพ้องของหมู่ N-H ที่เลขคลื่น 3,200-3,400 cm^{-1} $\text{C}=\text{O}$ ที่ 1,650 cm^{-1} C-N ที่ 1,550 cm^{-1} และ C-O ณ ตำแหน่ง 1,224 cm^{-1} [48] ดังแสดงในภาพที่ 4-7(ข) เมื่อเติมเอทิลีนไกลคอลเข้าในระบบ ความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิลลดลงเมื่อเพิ่มเอทิลีนไกลคอลจากการทำปฏิกิริยาในการเกิดพอลิยูรีเทน นอกจากนี้ยังพบพีคที่เลขคลื่น 1,600-1,750 cm^{-1} จากการสั่นพ้องของหมู่คาร์บอนิล ซึ่งเป็นการยืนยันว่าเกิดพอลิยูรีเทนในโครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์ ณ เลขคลื่น 1,720-1,700 cm^{-1} บ่งบอกถึงการเกิดอันตรกิริยาของพันธะไฮโดรเจนระหว่างส่วนอ่อนและส่วนแข็ง ซึ่งแสดงถึงการเกิดการผสมของเฟสบางส่วนภายในโครงสร้างเครือข่ายของพอลิยูรีเทน ดังแสดงในภาพที่ 4-7(ค) จากผลการทดสอบสามารถยืนยันได้ว่าการเพิ่มเอทิลีนไกลคอลจะทำให้ส่วนแข็งในสายโซ่พอลิเมอร์มากขึ้นและส่งผลกระทบต่อจำนวนพันธะไฮโดรเจนและอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ ผลลัพธ์นี้จะสอดคล้องกับความหนืดที่การเพิ่มปริมาณเอทิลีนไกลคอลทำให้เกิดการพัวพันกันของสายโซ่มากขึ้นและส่งผลกระทบต่อความยืดหยุ่นของสายโซ่ที่ขาลงเนื่องจากมีพันธะยูรีเทนมากขึ้น [55, 56]



ภาพที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (ก) สเปกตรัมของพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลต่างกัน (ข) สเปกตรัมบริเวณหมู่ไฮดรอกซิล และ(ค) สเปกตรัมบริเวณหมู่คาร์บอนิล

นอกจากนี้ยังสามารถยืนยันโครงสร้างของพอลิยูรีเทนโดยใช้นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ชนิดโปรตอนของตัวอย่างน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว น้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร EG0 และ EG2 ดังแสดงในภาพที่ 4-8 โดยน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปรพบสัญญาณที่ 2.88 และ 4.28 ppm ($-C-O$ และ $-CH-OH$) ซึ่งแสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้าง หลังจากสังเคราะห์พอลิยูรีเทนพบสัญญาณใหม่ที่แสดงถึงตำแหน่งโปรตอนหมู่เมทิลีน ($-CH_2-$) ที่ 1.56 และ 1.85 ppm หมู่ยูรีเทน ($-NH-$) ที่สัญญาณ 3.75 ppm และอะโรมาติกที่สัญญาณ 7.26 ppm การที่สัญญาณของหมู่ไฮดรอกซิลหายไปซึ่งหมายถึงการเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮยาเนตเกิดเป็นหมู่ยูรีเทนในสายโซ่พอลิเมอร์ นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่าง EG0 และ EG2 พบว่าหมู่ยูรีเทนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเอทิลีนไกลคอลในระบบเนื่องจากจำนวนพันธะยูรีเทนที่เพิ่มจากการเพิ่มเอทิลีนไกลคอล [57]

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดและนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ชนิดโปรตอนสามารถยืนยันการเกิดพันธะยูรีเทนและเอทิลีนไกลคอลมี

บทบาทในการเพิ่มพันธะไฮโดรเจน จากผลดังกล่าวเป็นรากฐานสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงเชิง
สัณฐานวิทยาและสมบัติของวัสดุในส่วนถัดไป

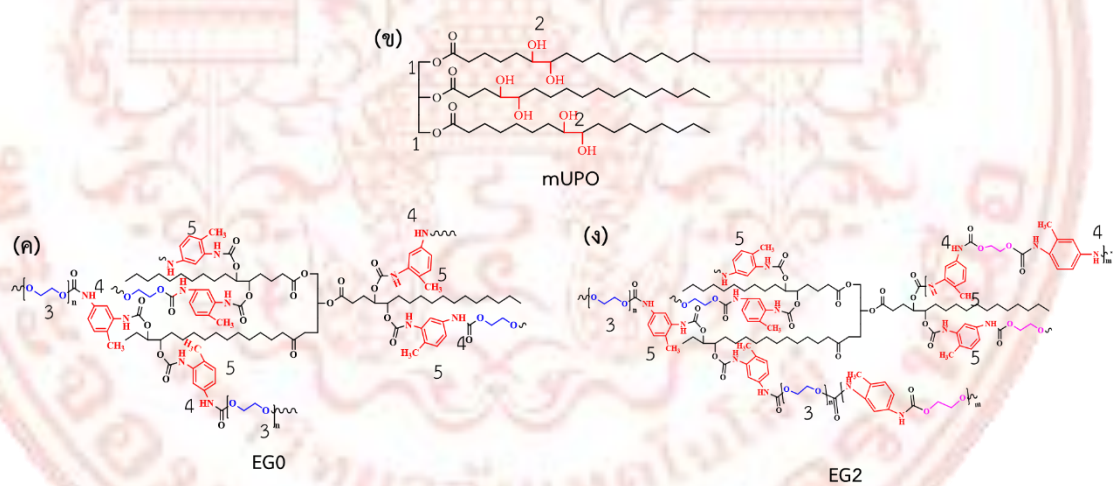
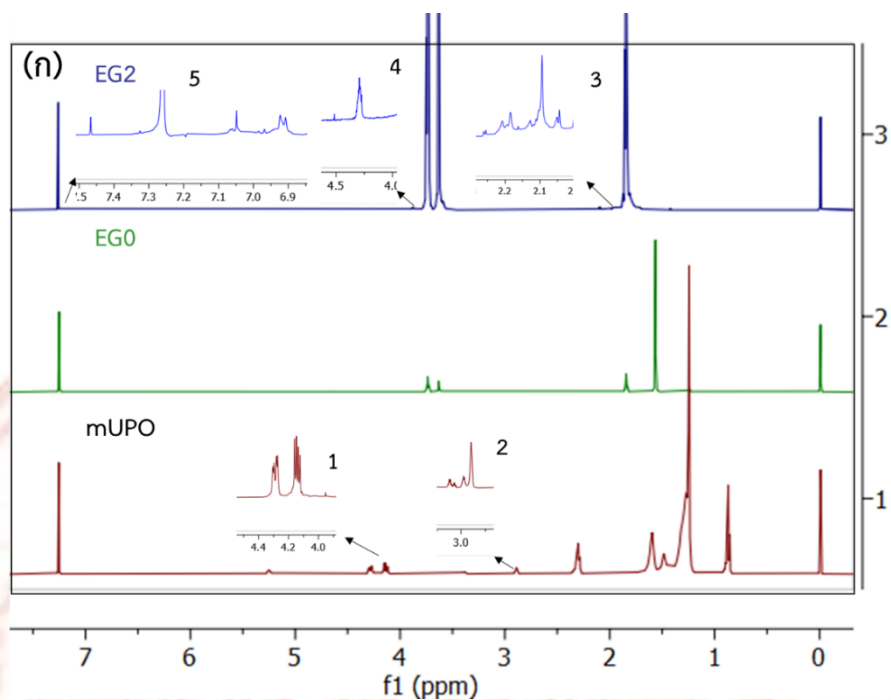
4.2.4 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล

ผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของตัวอย่างพอลิยูรีเทนด้วยเทคนิคเจลเพอร์มิเอชัน
โครมาโตกราฟี ดังแสดงในภาพที่ 4-9 และตารางที่ 4-3 สำหรับพอลิยูรีเทนที่ไม่ได้เติมเอทิลีนไกลคอล
มีน้ำหนักโมเลกุล 4,454 กรัม/โมล แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาที่จำกัดในสายโซ่พอลิเมอร์ หลังจากเติม
เอทิลีนไกลคอลน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นที่ 1 โมล 2 โมล และ 3 โมล โดยมีน้ำหนักโมเลกุลที่
15,739 กรัม/โมล 18,079 กรัม/โมล และ 21,761 กรัม/โมล การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลเป็นผล
มาจากเอทิลีนไกลคอลที่เป็นสารขยายสายโซ่ทำปฏิกิริยากับหมู่ไอโซไซยาเนตเพื่อสร้างพันธะยูรีเทน
เพิ่มเติม ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์ยาวขึ้นและมีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น [58]

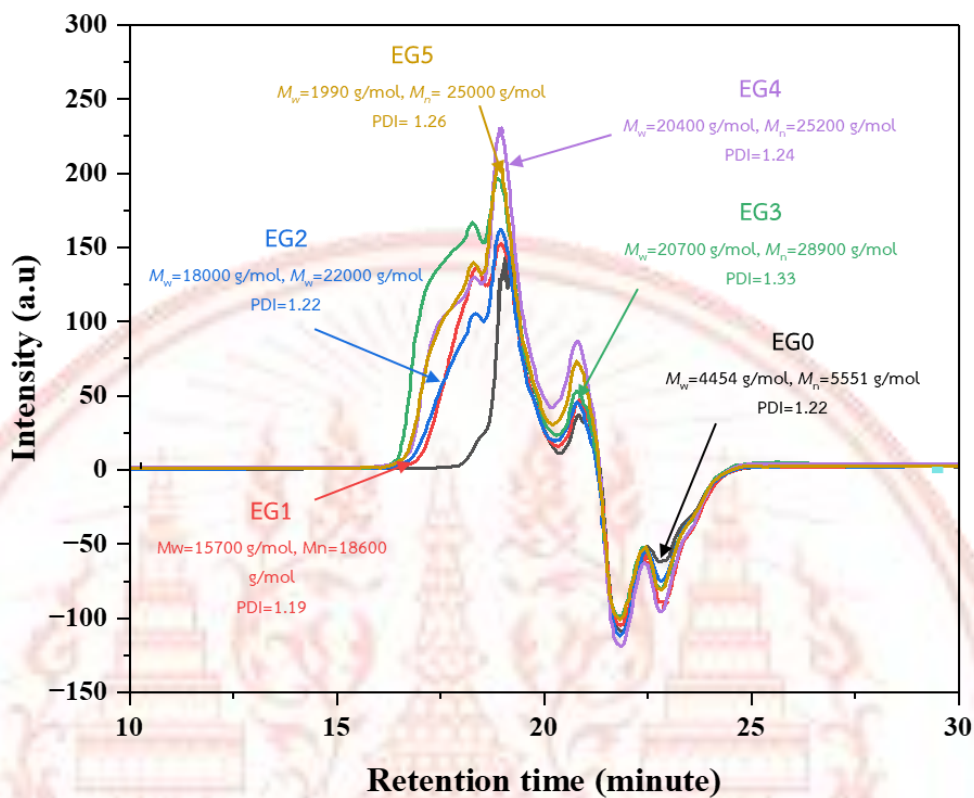
อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มเอทิลีนไกลคอลสูงขึ้น แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลจะ
ลดลงเหลือ 20,422 กรัม/โมล สำหรับ 4 โมล และ 19,915 กรัม/โมล ที่ 5 โมล เนื่องจากเกิดการ
ขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาจากเอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไปและเข้าไปทำปฏิกิริยากับไดไอโซไซยาเนต
แทนที่พอลิออลผสมก่อให้เกิดพันธะยูรีเทนแทนที่จะไปขยายสายโซ่พอลิเมอร์หรือไม่เกิดปฏิกิริยาทำ
ให้ส่วนที่เหลือในระบบขัดขวางการขยายสายโซ่ โดยมีการรายงานในงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยพบว่า
การใช้สารขยายสายโซ่เกินความจำเป็นทำให้ประสิทธิภาพการขยายสายโซ่ลดลง และทำให้เกิดความ
ไม่สม่ำเสมอในโครงสร้างของพอลิยูรีเทนเนื่องจากปฏิกิริยาข้างเคียง [32], [59]

การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของพอลิยูรีเทนมีค่าในช่วง 1.18-1.33 โดยที่ความ
เข้มข้น 3 โมล มีค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่ 1.33 ซึ่งบ่งชี้ว่า แม้ว่าเอทิลีนไกลคอลจะช่วย
การขยายสายโซ่แต่ก็ยังมีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้นในระบบ ส่งผลให้การกระจายตัวของน้ำหนัก
โมเลกุลสูงขึ้น อย่างไรก็ตามค่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลยังอยู่ในช่วงที่แคบ โดยมีค่า
ใกล้เคียงกับ 1.20 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างพอลิยูรีเทนมีความสม่ำเสมอในทุกๆ สูตร

จากผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลสามารถยืนยันได้ว่าเอทิลีนไกลคอลส่งผลต่อน้ำหนัก
โมเลกุลของพอลิยูรีเทนที่ปริมาณเอทิลีนไกลคอล 0-3 โมล สามารถเพิ่มความยาวสายโซ่และเพิ่ม
น้ำหนักโมเลกุล ในขณะเดียวกัน เมื่อเติมสารขยายสายโซ่มากกว่า 4 โมล จะลดความยาวของสายโซ่
ส่งผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-8 ผลการวิเคราะห์นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตราและโครงสร้างทางเคมีของน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปร และพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลที่ 0 และ 2 โมล (ก) ผลการทดสอบนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกตรา (ข) โครงสร้างทางเคมีของพอลิยูรีเทนที่ไม่ได้ใส่เอทิลีนไกลคอล (EGO) และ (ค) โครงสร้างทางเคมีของพอลิยูรีเทนที่ใส่เอทิลีนไกลคอล 2 โมล (EG2)



ภาพที่ 4-9 ผลการวิเคราะห์เจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟีที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลต่างกัน

ตารางที่ 4-3 สรุปผลการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของพอลิยูรีเทนด้วยเจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟี

ตัวอย่าง	ช่วงน้ำหนัก	$\bar{M}_w$ (กรัม/โมล)	$\bar{M}_n$ (กรัม/โมล)	PDI
EG0	ช่วงน้ำหนักที่ 1	4,454	5,413	1.22
EG1	ช่วงน้ำหนักที่ 1	15,739	18,693	1.19
	ช่วงน้ำหนักที่ 2	4,891	5,674	1.16
EG2	ช่วงน้ำหนักที่ 1	18,079	22,020	1.22
	ช่วงน้ำหนักที่ 2	5,204	6,037	1.16
EG3	ช่วงน้ำหนักที่ 1	21,761	28,959	1.33
	ช่วงน้ำหนักที่ 2	5,388	6,190	1.15

ตารางที่ 4-3 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ช่วงน้ำหนัก	$\bar{M}_w$ (กรัม/โมล)	$\bar{M}_n$ (กรัม/โมล)	PDI
EG4	ช่วงน้ำหนักที่ 1	20,422	25,287	1.24
	ช่วงน้ำหนักที่ 2	5388	6190	1.15
EG5	ช่วงน้ำหนักที่ 1	19,915	25,042	1.26
	ช่วงน้ำหนักที่ 2	5,353	6,199	1.16

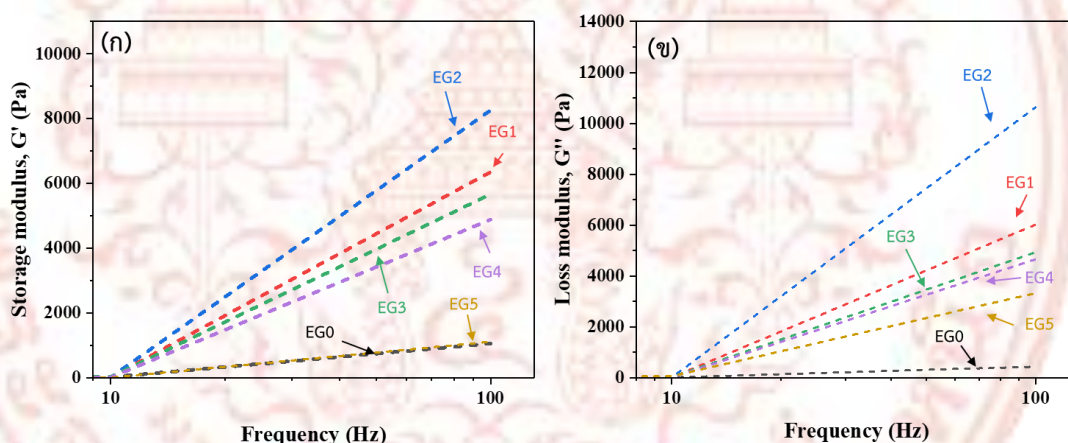
4.2.5 พฤติกรรมการไหลของพอลิยูรีเทน

การวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลโดยมีตัวอย่างทดสอบเพื่อศึกษาอิทธิพลสารขยายสายโซ่แสดงในภาพที่ 4-10 ที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของมอดูลัสกักเก็บและมอดูลัสสูญเสียพลังงานตามปริมาณเอทิลีนไกลคอลที่แตกต่างกัน โดยค่ามอดูลัสกักเก็บแสดงถึงสมบัติเชิงกลและอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล ผลการทดสอบพบว่าทุกตัวอย่างมีค่ามอดูลัสกักเก็บมากกว่าค่ามอดูลัสสูญเสียซึ่งเป็นลักษณะของพฤติกรรมวิสโคอิลาสติก [60] ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัสกักเก็บและมอดูลัสสูญเสียเมื่อเติมเอทิลีนไกลคอลที่ปริมาณ 1–2 โมล เป็นผลจากเอทิลีนไกลคอลที่เป็นสารขยายสายโซ่ช่วยเสริมสมบัติอิลาสติกและวิสคอสในสายโซ่ของพอลิยูรีเทน โดยที่ความเข้มข้น 2 โมล จะมีค่ามากที่สุดซึ่งสามารถอธิบายได้จากการขยายสายโซ่ ณ ปริมาณเอทิลีนไกลคอลที่เหมาะสมส่งผลให้มีการเพิ่มปริมาณส่วนแข็งในสายโซ่พอลิเมอร์ โดยส่วนแข็งจะเพิ่มปริมาณการเชื่อมขวางผ่านพันธะไฮโดรเจนทำให้เสริมความแข็งแรงของสายโซ่และเพิ่มสมบัติทั้งสมบัติอิลาสติกและวิสคอส นอกจากนี้จากการทดสอบน้ำหนักโมเลกุลยืนยันว่าการเพิ่มเอทิลีนไกลคอลช่วยเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลที่ความเข้มข้น 1-3 โมล ทำให้เพิ่มอันตรกิริยาในสายโซ่พอลิยูรีเทน มีรายงานการวิจัยที่คล้ายกันโดย Huang H. และคณะ [9] ได้ทำการเพิ่มปริมาณส่วนแข็งเพื่อเพิ่มพันธะไฮโดรเจนทำให้สมบัติเชิงกลและวิสโคอิลาสติกสูงขึ้น

ที่ปริมาณเอทิลีนไกลคอล 4 และ 5 โมล มอดูลัสกักเก็บและมอดูลัสสูญเสียลดลงเนื่องจากเอทิลีนไกลคอลขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาโดยการทำปฏิกิริยาแทนที่พอลิโออลผสม ทำให้สายโซ่พอลิยูรีเทนสั้นลงรวมทั้งยังลดการขยายสายโซ่ [32], [59] ทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางลดลงส่งผลให้สายโซ่ของพอลิยูรีเทนมีความสามารถในการกระจายแรงและการสะสมพลังงานที่จำกัด นอกจากนี้เอทิลีนไกลคอลที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาอาจทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ใน พอลิยูรีเทนทำให้ลดความแข็งแรงและลดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ [61] พฤติกรรมนี้สอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและเวลา ในภาพที่ 4-6(ข) เมื่อเพิ่มปริมาณเอทิลีนไกลคอลจะทำให้การคลายตัวของสายโซ่ช้าลง โครงสร้างที่ไม่แข็งแรงในระดับเอทิลีนไกลคอลที่มากจะ

ขัดขวางการจัดเรียงของสายโซ่ส่งผลให้ระยะเวลาในการคลายตัวเพิ่มขึ้น จากผลการทดสอบความเหนียวและพฤติกรรมการไหลสามารถยืนยันได้ว่า การเพิ่มเอทิลีนไกลคอลจะเพิ่มพันธะยูรีเทน แต่กลับลดประสิทธิภาพในการเชื่อมขวางของสายโซ่และลดสมบัติความเป็นวิสโคอิลาสติกซึ่งสอดคล้องกับรายงานจากงานวิจัยอื่นที่กล่าวถึงการคลายตัวของสายโซ่พอลิยูรีเทน ซึ่งระบุว่าเวลาการคลายตัวที่นานขึ้นมักเกิดจากการเชื่อมขวางที่อ่อนแอและไม่เป็นระเบียบ และการใช้สารขยายสายโซ่มากเกินไปจะทำให้การจัดเรียงโครงสร้างลดลงแม้จะเพิ่มปริมาณพันธะยูรีเทนก็ตาม [62]

จากผลการทดสอบยืนยันว่า เอทิลีนไกลคอลมีผลต่อการรักษาสมดุลในโครงสร้างของพอลิยูรีเทน โดยที่ 1-2 โมล ช่วยส่งเสริมการยึดตัวของสายโซ่และการก่อตัวของพันธะไฮโดรเจน ทำให้ค่ามอดูลัสกักเก็บและมอดูลัสสูญเสียสูงขึ้น หากเอทิลีนไกลคอลเกินปริมาณที่เหมาะสม (มากกว่า 2 โมล) กลับลดความแข็งแรงเชิงวิสโคอิลาสติก เนื่องจากการยึดตัวของสายโซ่ไม่เต็มที่ ปริมาณการเกิดพันธะไฮโดรเจนลดลง และเวลาการคลายสายโซ่ยาวนานขึ้น



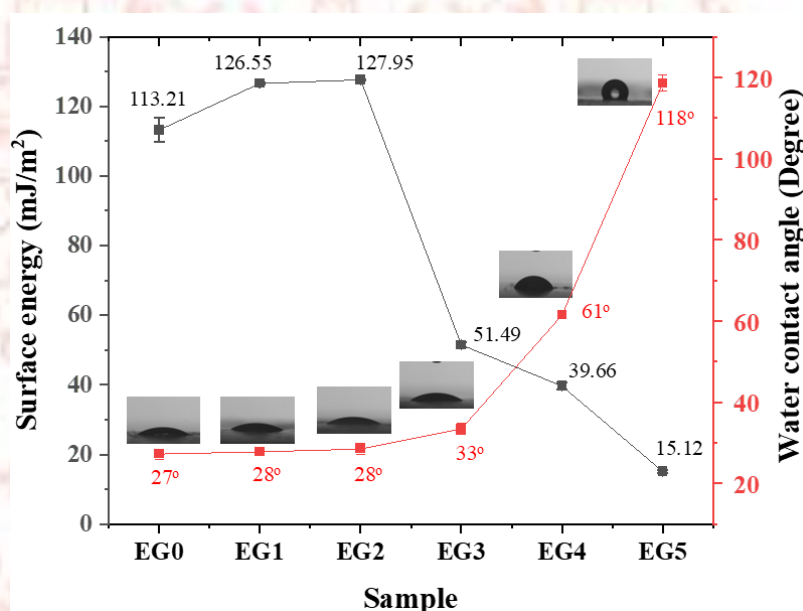
ภาพที่ 4-10 ผลการวิเคราะห์สมบัติการไหลของพอลิยูรีเทนจากพอลิออลผสมที่มีเอทิลีนไกลคอลต่างกัน (ก) มอดูลัสกักเก็บ-ความถี่ และ (ข) มอดูลัสสูญเสีย-ความถี่

4.2.6 การวัดมุมสัมผัสและพลังงานพื้นผิว

ผลการวัดมุมสัมผัสและพลังงานพื้นผิวของสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลแตกต่างกันแสดงในภาพที่ 4-11 สำหรับพอลิยูรีเทนที่ไม่ได้เติมเอทิลีนไกลคอลมีมุมสัมผัสที่ 27 องศาและมีค่าพลังงานพื้นผิว 113.21 มิลลิจูล/ตารางเมตร การเพิ่มเอทิลีนไกลคอลที่ 1 และ 2 โมล ไม่ส่งผลต่อมุมสัมผัส โดยมียค่าอยู่ที่ประมาณ 28 องศาและมีพลังงานพื้นผิวที่ 126.55 และ 127.95 มิลลิจูล/ตารางเมตร จากผลการทดสอบบ่งชี้ว่าพื้นผิวของสารเคลือบพอลิยูรีเทนมีสมบัติที่ชอบน้ำเป็นผลมาจากความหนาแน่นของหมู่ยูรีเทนที่มีขั้วบริเวณพื้นผิวโดยหมู่ที่

มีข้อทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำผ่านพันธะไฮโดรเจนจึงรักษาพลังงานพื้นผิวให้สูงและมุมสัมผัสให้ต่ำ โดยมีการรายงานจากการศึกษาก่อนหน้านี้ซึ่งพบว่าการรวมกลุ่มกันของหมู่ที่มีขั้วจะรักษาความชอบน้ำไว้ได้แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบในพอลิยูรีเทน [63]

จุดเปลี่ยนสำคัญจะอยู่ที่ปริมาณเอทิลีนไกลคอลตั้งแต่ 3 โมล ถึง 5 โมล โดยเพิ่มขึ้นที่ 33, 61 และ 118 องศา ในขณะที่พลังงานพื้นผิวลดลงโดยมีค่าอยู่ที่ 51.49, 39.66 และ 15.12 มิลลิจูล/ตารางเมตร จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ปริมาณเอทิลีนไกลคอลที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มการแยกเฟสภายในสายโซ่ระหว่างส่วนแข็งและส่วนอ่อนที่ปริมาณสารขยายสายโซ่เพิ่มขึ้น การเกาะกลุ่มของส่วนแข็งก็จะเพิ่มขึ้นด้วยการสร้างพันธะไฮโดรเจน ทำให้ความสามารถในการกระจายเฟสภายในสายโซ่ลดลง [64] ผลที่ตามมาคือ หมู่ที่มีขั้วเช่น $-NH$ และ $C=O$ จะถูกยูรีเทนสายโซ่สั้นขัดขวางการสร้างพันธะกับโมเลกุลของน้ำที่บริเวณผิวสัมผัสส่งผลให้พื้นผิวมีสมบัติไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4-11 มุมสัมผัสน้ำและพลังงานพื้นผิวของสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลต่างกัน

4.2.7 สมบัติเชิงกล

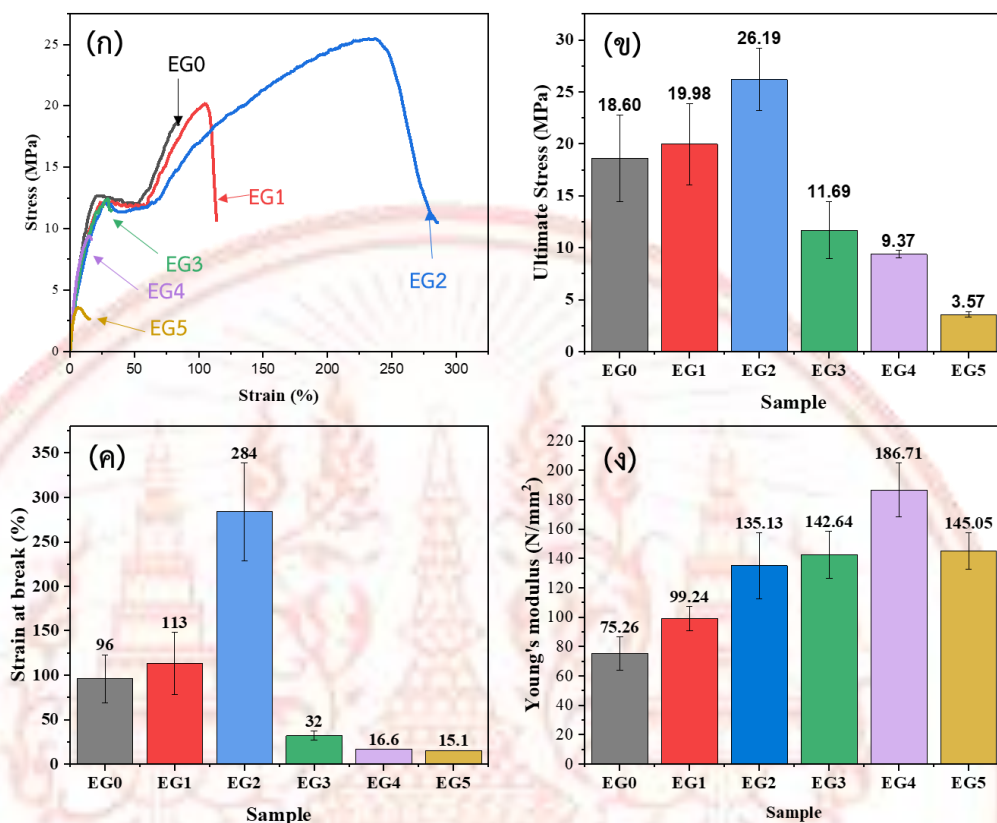
สมบัติเชิงกลของสารเคลือบพอลิยูรีเทนจะศึกษาโดยใช้วิธีการทดสอบแรงเหวี่ยงเพื่อศึกษาอิทธิพลของสารขยายสายโซ่ผ่านค่าความเค้นสูงสุด ระยะยืดสูงสุดและมอดูลัสของยัง อิทธิพลของเอทิลีนไกลคอลที่เป็นสารขยายสายโซ่นั้นแสดงดังภาพที่ 4-12 โดยที่ความเข้มข้น 0 โมล มีค่าความเค้นสูงสุดที่ 14.23 เมกะปาสคาลและความเครียด ณ จุดขาดที่ 96 เปอร์เซ็นต์ หลังจากเติม

เอทิลีนไกลคอลเข้าไปในพอลิยูรีเทน ความเค้นสูงสุดและความเครียด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นที่ปริมาณเอทิลีนไกลคอล 1 และ 2 โมล โดยมีค่าความเค้นสูงสุดที่ 14.96 เมกะปาสคาลและ 26.19 เมกะปาสคาล ส่วนความเครียด ณ จุดขาดมีค่าที่ 113 และ 284 เปอร์เซ็นต์ จากกราฟความเค้น-ความเครียดที่ความเข้มข้น 2 โมล แสดงถึงการเปลี่ยนรูปประเภทพลาสติกที่ดีขึ้นแสดงให้เห็นถึงการกระจายพลังงานที่ดีขึ้นจากการที่เอทิลีนไกลคอลช่วยเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลและเพิ่มปริมาณส่วนแข็งในโครงสร้างรวมทั้งเพิ่มความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจน ทำให้ช่วยเสริมการกระจายพลังงานภายในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้ส่วนอ่อนเกิดการเสียรูปก่อนที่จะขาด ทำให้สารเคลือบพอลิยูรีเทนมีความเหนียวเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณเอทิลีนไกลคอล ประสิทธิภาพในการเพิ่มสมบัติเชิงกลจะลดลง โดยที่ 3 โมล จะมีค่าความเค้นที่ 11.69 เมกะปาสคาลและความเครียด 32 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เอทิลีนไกลคอลปริมาณ 4 โมล และ 5 โมล จะลดลงเหลือ 9.37 และ 3.57 เมกะปาสคาล และความเครียด ณ จุดขาดลดลงเหลือ 16.6 และ 15.1 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งจะสอดคล้องกับน้ำหนักโมเลกุลและพฤติกรรมกรไหลของสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่บ่งบอกว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเอทิลีนไกลคอลมากเกินไปจะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิออลผสมและไดไอโซไซยาเนตทำให้โครงสร้างของพอลิยูรีเทนสั้นลง นอกจากนี้การที่เอทิลีนไกลคอลปริมาณมากเกินไปจะทำให้ส่วนแข็งเกิดการเกาะกลุ่มและอาจทำให้โมเลกุลที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาอาจแสดงผลพลาสติกไซเซอร์ภายในเนื้อพอลิยูรีเทนทำให้ความเป็นเนื้อเดียวกันลดลงและนำไปสู่การกระจายแรงที่ต่ำ ทำให้สมบัติเชิงกลลดลง โดยผลลัพธ์ที่คล้ายคลึงกันมีการรายงานโดย Jhon Y. และคณะ [59] ที่รายงานว่า การเติมสารขยายสายโซ่ที่มากเกินไปจะทำให้ระบบเกิดการปนเปื้อน ทำให้ประสิทธิภาพในการขยายสายโซ่ลดลงและนำไปสู่การลดประสิทธิภาพของสารเคลือบเนื่องจากการเชื่อมขวางภายในสายโซ่ลดลง

ค่ามอดูลัสของยังสามารถบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพอลิยูรีเทน โดยที่ค่ามอดูลัสของยังเพิ่มขึ้นจาก 75.26 เมกะปาสคาลที่เอทิลีนไกลคอล 0 โมล และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องที่ 1 โมล ถึง 4 โมล โดยมีค่าอยู่ที่ 99.24, 135.13, 142.64 และ 186.71 เมกะปาสคาล ก่อนที่ความเข้มข้นที่ 5 โมลจะลดลงเหลือ 145.05 เมกะปาสคาล การเพิ่มขึ้นของมอดูลัสของยังในช่วงแรกเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของส่วนแข็ง ทำให้การเชื่อมขวางภายในพอลิยูรีเทนแข็งแรงขึ้น อย่างไรก็ตามที่ปริมาณเอทิลีนไกลคอล 5 โมลเกิดการโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์และผลกระทบของพลาสติกไซเซอร์

ผลการทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าเอทิลีนไกลคอลในฐานะสารขยายโซ่มีผลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของสารเคลือบพอลิยูรีเทน โดยสามารถปรับสมดุลระหว่างส่วนอ่อนและส่วนแข็งอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ และการผสมระหว่างเฟส การปรับปริมาณเอทิลีนไกลคอลให้เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญในการปรับสมบัติทางกลให้เหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทาง



ภาพที่ 4-12 ผลการทดสอบแรงเค้นของพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลต่างกันโดยการทดสอบแรงเค้น (ก) กราฟความเค้น-ความเครียด (ข) ความเค้นสูงสุด (ค) ความเครียด ณ จุดขาด และ (ง) โมดูลัสของยัง

4.2.8 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ภาพที่ 4-13 แสดงลักษณะสัณฐานผิวของสารเคลือบพอลิยูรีเทน หลังการทดสอบแรงเค้น ลักษณะทางสัณฐานวิทยาจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณเอทิลีนไกลคอลซึ่งสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงโดยที่เอทิลีนไกลคอล 0 โมล มีพื้นผิวค่อนข้างเรียบ โดยจะสัมพันธ์กับการเสีรูปของพลาสติก และการฉีกขาดของสายโซ่บางส่วน ลักษณะทางสัณฐานวิทยาสอดคล้องกับความแข็งแรงและการยึดตัวซึ่งการใส่พอลิออลผสมเพียงอย่างเดียวส่งผลต่อการจำกัดการขยายสายโซ่เข้าไปสู่อันตรกิริยาที่ต่ำเมื่อเติมเอทิลีนไกลคอลที่ความเข้มข้น 1 และ 2 โมล พื้นผิวจะมีความขรุขระมากขึ้น แสดงให้เห็นร่องรอยการฉีกขาดจากการเค้น พื้นผิวเหล่านี้เป็นลักษณะเฉพาะของการแตกหักแบบเชื่อมประสาน และแบบเหนียว (Cohesive and ductile failure) ซึ่งเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกก่อนที่จะแตกหักออกจากกัน ลักษณะสัณฐานวิทยาที่ขรุขระนี้สอดคล้องกับสมบัติการทำงานที่ดี ณ ความเข้มข้น 2 โมล ซึ่งแสดงค่าความแข็งแรงและการยึดตัวสูงที่สุด

เมื่อเพิ่มปริมาณเอทิลีนไกลคอลที่ 3 โมล ลักษณะพื้นผิวยังคงขรุขระ โดยมีรอยแตกขนาดเล็กมากขึ้น ซึ่งบ่งชี้ถึงความไม่สม่ำเสมอเนื่องจากมีโครงสร้างของส่วนแข็งมากเกินไปและการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ สำหรับปริมาณเอทิลีนไกลคอลที่ 4 และ 5 โมล พื้นผิวจะเรียบโดยมีร่องรอยการฉีกขาดขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วพื้นผิว เนื่องจากความแข็งแรงในการยึดเกาะที่ลดลงและอันตรกิริยาที่ลดลงจากการเพิ่มปริมาณเอทิลีนไกลคอล โดยสามารถอธิบายได้จากเหตุผล 2 ประการ ประการแรกคือการที่เอทิลีนไกลคอลทำปฏิกิริยากับไดไฮดรอกซีไซยานูเรตมากขึ้นทำให้สายโซ่พอลิยูรีเทนสั้นลง ประการที่สอง โมเลกุลของเอทิลีนไกลคอลที่ไม่ทำปฏิกิริยาอาจจะแสดงผลเป็นพลาสติกไซเซอร์ทำให้อันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ลดลง นอกจากนี้พลังงานพื้นผิวและมุมสัมผัสยังบ่งชี้ดีกว่าพื้นผิวของพอลิยูรีเทนมีสมบัติไม่ชอบน้ำมากขึ้นส่งผลให้ค่าการยึดติดกับพื้นผิวแก้วที่ชอบน้ำลดลง และทำให้การยึดเกาะระหว่างผิวสัมผัสอ่อนแอลง

กลไกการยึดเกาะระหว่างสารเคลือบพอลิยูรีเทนและแผ่นกระจกแสดงดังภาพที่ 4-14 พันธะที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ยูรีเทนในพอลิยูรีเทนและหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) บนผิวกระจก โดยสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้จากหมู่ไฮดรอกซิลในไฮดรอกซิลในไฮดรอกซิลหรือหมู่คาร์บอนิลรวมทั้งหมู่ N-H ใน พอลิยูรีเทนที่จับกับออกซิเจนในไฮดรอกซิล โดยกลไกนี้ได้ถูกอธิบายโดย Baudrit J. และคณะ [65] ซึ่งชี้ให้เห็นว่าหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวซิลิกาสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ยูรีเทนได้ และยังช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเฟสในพอลิยูรีเทนและพื้นผิวซิลิเซียส (Siliceous) ที่ปริมาณเอทิลีนไกลคอลระดับกลาง หมู่ดังกล่าวสามารถก่อให้เกิดการเชื่อมขวางที่มีพันธะไฮโดรเจนหนาแน่น ซึ่งช่วยเพิ่มการยึดเกาะและส่งเสริมแรงยึดเกาะระหว่างสารเคลือบด้วยตัวเอง อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณเอทิลีนไกลคอลที่มากเกินไป หมู่ยูรีเทนจะถูกลดประสิทธิภาพในการเชื่อมขวางโดยเอทิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่ในระบบ เมื่อรวมกับสมบัติการเปื่อยที่ลดลง ส่งผลให้การยึดติดที่อ่อนแอลงรวมถึงมีรอยฉีกขาดที่เรียบกว่าอีกด้วย

การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสามารถยืนยันได้ว่าเอทิลีนไกลคอลส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาจากรอยฉีกขาดโดยที่ 1 ถึง 3 โมลจะมีพื้นผิวที่ขรุขระสอดคล้องกับความแข็งแรงและการยึดตัวที่สูง จึงทำให้การยึดเกาะมีประสิทธิภาพมากขึ้นในสารเคลือบ ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นมากกว่า 4 โมล ทำให้เกิดพื้นผิวรอยแตกที่เรียบและเปราะกว่า ซึ่งสะท้อนถึงการขยายสายโซ่ที่ไม่มีการยึดเกาะของส่วนเชื่อมประสานที่ลดลง ซึ่งเป็นสภาวะที่ลดความทนทานของสารเคลือบภายใต้แรงเค้นใช้งาน

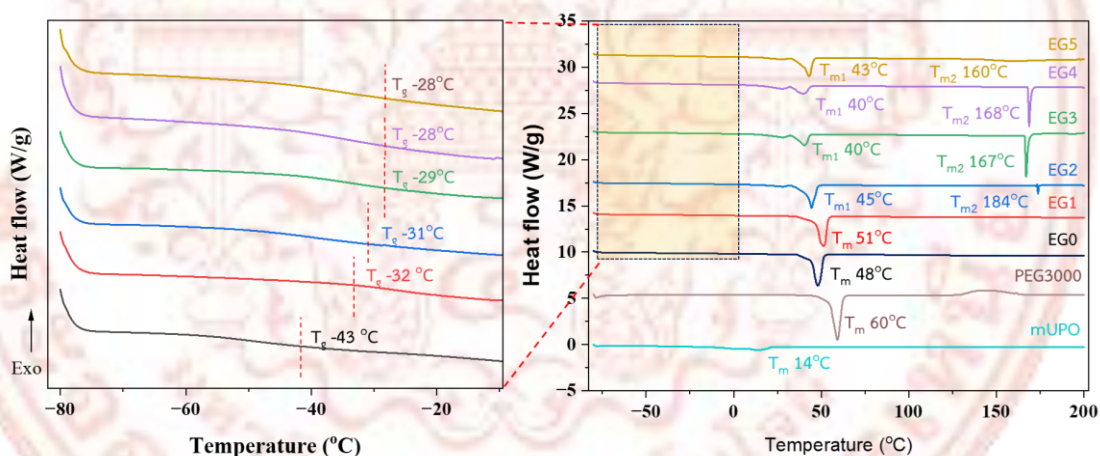
4.2.9 สมบัติทางความร้อน

อิทธิพลของสารขยายสายโซ่ในโครงสร้างของพอลิยูรีเทนจะถูกทดสอบโดยใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ในการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน การเกิดไมโครเฟส เซเพเรชัน (Microphase separation) เกิดจากอันตรกิริยาของโมเลกุลระหว่างหมู่ยูรีเทน ผลการวิเคราะห์ของตัวอย่างทดสอบแสดงดังในภาพที่ 4-15 ทุกตัวอย่างแสดงอุณหภูมิคล้ายแก้วที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ซึ่งแสดงถึงความยืดหยุ่นของส่วนอ่อนโดยอุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิยูรีเทนจะอยู่ในช่วง -43 องศาเซลเซียส สำหรับความเข้มข้นที่ 0 โมล ถึง -32 องศาเซลเซียส สำหรับที่ 1 โมล สำหรับความเข้มข้นที่ 2 โมลจะมีค่าประมาณ -31 องศาเซลเซียส และที่ 3-5 โมล จะประมาณ -28 ถึง -29 องศาเซลเซียส การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิคล้ายแก้วบ่งบอกถึงการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ถูกจำกัดเนื่องจากการมีพันธะยูรีเทนที่มากขึ้นรวมทั้งแรงยึดเหนี่ยวจากพันธะไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับรายงานก่อนหน้านี้ที่ระบุว่า การเคลื่อนไหวของส่วนต่างๆ ในสายโซ่ รวมถึงการตอบสนองทางความร้อนของพอลิยูรีเทนที่ถูกควบคุมอย่างมากโดยระดับของพันธะไฮโดรเจนและระดับของการแยกเฟสในสายโซ่ [66]

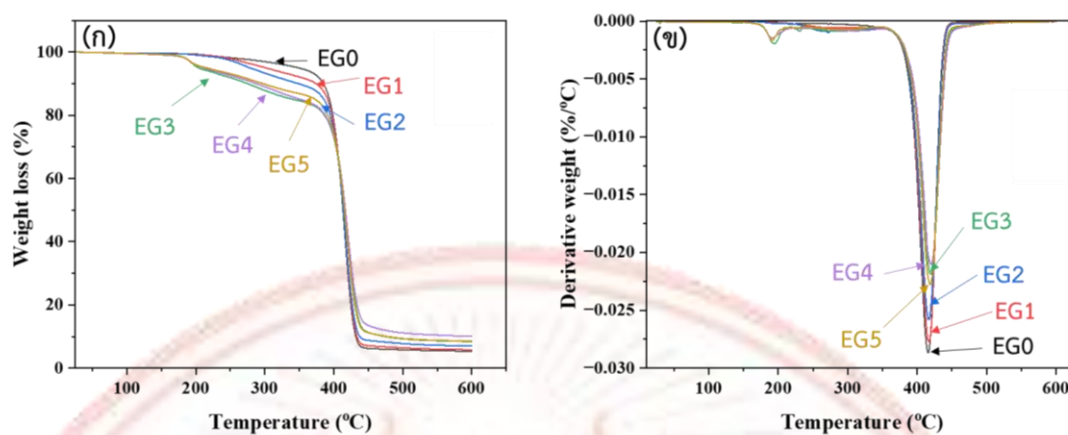
การดูความร้อนของพอลิยูรีเทนถูกค้นพบที่อุณหภูมิระหว่าง 40-51 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิหลอมเหลวของส่วนอ่อนในพอลิยูรีเทน เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ 60 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิมีการลดลงเมื่อเติมเอทิลีนไกลคอลเข้าไปในระบบโดยเฉพาะที่ 2 โมล แสดงให้เห็นถึงการเกิดพันธะยูรีเทนไปรบกวนการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเอทิลีนไกลคอล อย่างไรก็ตามในระดับที่เอทิลีนไกลคอลสูงขึ้น อุณหภูมิหลอมเหลวจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากการแยกเฟสที่เพิ่มขึ้นและเอื้อให้พอลิเอทิลีนไกลคอลสามารถจัดเรียงตัวและเกิดผลึกในโครงสร้างของพอลิยูรีเทนแนวโน้มนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงวิสโคอีลาสติก ซึ่งเอทิลีนไกลคอลที่เหมาะสมช่วยเพิ่มการเชื่อมขวางของสายโซ่ ในขณะที่เอทิลีนส่วนเกินทำให้การแยกเฟสเพิ่มขึ้นและการเกิดการเชื่อมขวางลดลง

นอกจากนี้ ที่ปริมาณเอทิลีนไกลคอล 2-5 โมลยังพบการดูความร้อนที่ 160-184 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิการหลอมเหลวของส่วนแข็งในสายโซ่พอลิยูรีเทน [67] โดยที่ความเข้มข้นของเอทิลีนไกลคอล 2 โมลจะมีอุณหภูมิคล้ายแก้วสูงที่สุดโดยมีอุณหภูมิอยู่ที่ 184 องศาเซลเซียส เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันเป็นระเบียบโดยมีโครงสร้างคล้ายผลึกขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลมากกว่า 2 โมล [68] เมื่อเพิ่มปริมาณเอทิลีนไกลคอลที่ 3, 4 และ 5 โมล จะมีอุณหภูมิการหลอมเหลวของส่วนแข็งที่ 167, 168 และ 160 องศาเซลเซียสตามลำดับ การลดลงของอุณหภูมิหลอมเหลวเป็นผลมาจากเอทิลีนไกลคอลที่หลงเหลืออยู่ในระบบแสดงผลเป็นพลาสติกใสเซอร์ภายในเนื้อพอลิยูรีเทนที่ลดอันตรกิริยาระหว่างส่วนแข็ง ทำให้ความเสถียรทางความร้อนลดลง [69]

ลักษณะการเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิยูรีเทนแสดงดังภาพที่ 4-16 ตัวอย่างที่ความเข้มข้นเอทิลีนไกลคอล 0-2 โมล แสดงให้เห็นการสลายหลักเพียงขั้นเดียว ในขณะที่ความเข้มข้นเอทิลีนไกลคอล 3-5 โมล แสดงให้เห็นการสลายสองช่วงโดยช่วงแรกพบอยู่ในช่วง 190-195 องศาเซลเซียส ซึ่งสัมพันธ์กับการสลายตัวขององค์ประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น เอทิลีนไกลคอลที่เหลืออยู่ในสายโซ่พอลิยูรีเทน ส่วนช่วงอุณหภูมิการเสื่อมสลายที่ 415-419 องศาเซลเซียส พบในทุกๆ ตัวอย่างซึ่งสอดคล้องกับสายโซ่หลักของพอลิยูรีเทน การเปลี่ยนของอุณหภูมิจากความเข้มข้น 1 โมล (415 องศาเซลเซียส) ไปยังความเข้มข้น 3-4 โมล (419 องศาเซลเซียส) บ่งบอกถึงการเพิ่มความเสถียรภาพที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจนในส่วนแข็ง ที่ความเข้มข้น 5 โมล อุณหภูมิการเสื่อมสลายลดลงเล็กน้อยเหลือ 418 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าเอทิลีนไกลคอลที่หลงเหลืออยู่ในระบบอาจทำให้ความเสถียรทางความร้อนลดลง ผลลัพธ์เหล่านี้สอดคล้องกับรูปแบบการสลายตัวที่รายงานไว้ในพอลิยูรีเทนซึ่งการสูญเสียน้ำหนักเริ่มต้นเกิดจากสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และการสร้างเสถียรภาพที่ขึ้นอยู่กับพันธะไฮโดรเจนและการจัดเรียงโครงสร้าง [66]



ภาพที่ 4-15 ผลการทดสอบสมบัติความร้อนของพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลต่างกันด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์



ภาพที่ 4-16 ผลการวิเคราะห์การเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิยูรีเทนที่มีปริมาณเอทิลีนไกลคอลต่างกัน (EG0-EG5) โดยใช้เทคนิควิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก

บทที่ 5

สรุปผลดำเนินงาน

โครงการวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำการศึกษาผลการเตรียมพอลิยูรีเทนจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว ดัดแปรและพอลิเอทิลีนไกลคอล 3,000 กรัม/โมล สำหรับการเคลือบผิว สามารถสรุปผลการทดลอง และอภิปรายผลในโครงการวิทยานิพนธ์ได้ดังต่อไปนี้

- 5.1 สรุป
- 5.2 อภิปรายผล
- 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

โครงการวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์พอลิยูรีเทนจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปรผสมพอลิเอทิลีนไกลคอล 3,000 กรัม/โมล และทำการศึกษาอิทธิพลของเอทิลีนไกลคอลที่เป็นสารขยายสายโซ่ในพอลิยูรีเทน เพื่อศึกษาผลกระทบต่องานโครงสร้างทางเคมีและสมบัติต่างๆ โดยทำการควบคุมปริมาณจาก 0 ถึง 5 โมล จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี ยืนยันการเกิดพันธะยูรีเทนและพันธะไฮโดรเจนในสายโซ่ รวมทั้งทำให้น้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นจาก 4,400 เป็น 21,000 กรัม/โมล การทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงให้เห็นว่าเอทิลีนไกลคอลช่วยเพิ่มสมบัติการยึดเกาะผ่านพันธะไฮโดรเจน โดยมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ 2 โมล (ความเค้นสูงสุด 26.2 เมกะปาสคาล และค่าความเครียด ณ จุดขาด 284 เปอร์เซ็นต์) การวิเคราะห์โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นพื้นผิวที่ยึดติดมีความขรุขระมากขึ้นเมื่อใช้เอทิลีนไกลคอลในปริมาณที่เหมาะสม การวิเคราะห์หุ้มสัมผัสน้ำแสดงให้เห็นว่าเอทิลีนไกลคอล ช่วยเพิ่มการแยกตัวของไมโครเฟส ลดการสัมผัสกับหมู่ขั้วบนผิว และเปลี่ยนสมบัติจากสมบัติชอบน้ำไปเป็นไม่ชอบน้ำ การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนแสดงให้เห็นว่าการเติมเอทิลีนไกลคอล ในปริมาณที่เหมาะสม ช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนผ่านการมีอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างส่วนแข็งและส่วนอ่อน

5.2 อภิปรายผล

จากการสังเคราะห์และวิเคราะห์สมบัติของพอลิยูรีเทนจากพอลิออลผสมระหว่างพอลิเอทิลีนไกลคอล 3,000 กรัม/โมล และน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วที่ดัดแปร ในอัตราส่วน 50/50 โดยโมล โดยใช้โทลูอีนไดไอโซไซยาเนตเป็นไดไอโซไซยาเนตสำหรับการทำปฏิกิริยา โดยใช้ดซ์นีไอโซไซยาเนตที่ 100 และเอทิลีนไกลคอลเป็นสารขยายสายโซ่ พบว่าปริมาณเอทิลีนไกลคอลมีผลต่อโครงสร้างทางเคมี สมบัติเชิงกล สมบัติทางพื้นผิว และสมบัติทางความร้อนของพอลิยูรีเทน จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีแสดงให้เห็นถึงการเกิดพันธะยูรีเทนเพิ่มขึ้นในสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเอทิลีนไกลคอล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ว่าการเติมสารขยายสายโซ่จะทำให้เกิดพันธะยูรีเทนมากขึ้นและทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลของสารเคลือบพอลิยูรีเทนจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนในส่วนแข็ง อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มเอทิลีนไกลคอลเข้าไปในระบบมากเกินไป จะส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิยูรีเทนลดลงเนื่องจากการแยกเฟสระหว่างส่วนแข็งและส่วนอ่อนในสายโซ่และการเกิดพลาสติกไลเซชันจากเอทิลีนไกลคอลที่หลงเหลืออยู่ในระบบ นอกจากนี้การเพิ่มเอทิลีนไกลคอลยังเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำของพอลิยูรีเทนอีกด้วย นอกจากนี้จากการเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ ทำให้สมบัติทางความร้อนเพิ่มขึ้นด้วยเมื่อเติมเอทิลีนไกลคอลไปในระบบ

ผลการศึกษาโดยรวมแสดงให้เห็นว่า เอทิลีนไกลคอลมีบทบาทสำคัญในการปรับแต่งสมบัติของพอลิยูรีเทนโดยการเติมเอทิลีนไกลคอลในระดับที่เหมาะสม (1–2 โมล) จะช่วยสร้างสมดุลระหว่างความแข็งแรงเชิงกล ความยืดหยุ่น ความไม่ชอบน้ำ และเสถียรภาพทางความร้อน ในขณะที่การเติมเอทิลีนไกลคอลในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้สมบัติโดยรวมลดลง เนื่องจากโครงสร้างไม่สม่ำเสมอและพลาสติกไลเซชันจากสารขยายสายโซ่ ดังนั้นการควบคุมปริมาณสารขยายสายโซ่จึงเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบสารเคลือบพอลิยูรีเทนที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ศึกษาการปรับสัดส่วนระหว่างน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วดัดแปรและพอลิเอทิลีนไกลคอล 3,000 กรัม/โมล

5.3.2 ศึกษาอิทธิพลของสารขยายสายโซ่ชนิดอื่นๆ

5.3.3 ศึกษาอิทธิพลของดซ์นีไอโซไซยาเนต

5.3.4 การประยุกต์ใช้งานจริง

บรรณานุกรม

- [1] H. Abd El-Wahab, "Nano Emulsion Binders for Paper Coating Synthesis and Application," *J. Macromol. Sci. Part A Pure Appl. Chem.*, vol. 54, Mar. 2017, doi: 10.1080/10601325.2017.1294450.
- [2] A. Kausar, "Polymer coating technology for high performance applications: Fundamentals and advances," *J. Macromol. Sci. Part A Pure Appl. Chem.*, vol. 55, no. 5, pp. 440–448, 2018, doi: 10.1080/10601325.2018.1453266.
- [3] J. O. Akindoyo, M. D. H. Beg, S. Ghazali, M. R. Islam, N. Jeyaratnam, and A. R. Yuvaraj, "Polyurethane types, synthesis and applications-a review," *RSC Adv.*, vol. 6, no. 115, pp. 114453–114482, 2016, doi: 10.1039/c6ra14525f.
- [4] D. K. Patel, D. Rana, V. K. Aswal, S. Srivastava, P. Roy, and P. Maiti, "Influence of graphene on self-assembly of polyurethane and evaluation of its biomedical properties," *Polymer (Guildf.)*, vol. 65, pp. 183–192, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2015.03.076>.
- [5] J. T. Koberstein and A. F. Galambos, "Multiple melting in segmented polyurethane block copolymers," *Macromolecules*, vol. 25, no. 21, pp. 5618–5624, Oct. 1992, doi: 10.1021/ma00047a010.
- [6] M. Shahrousvand, G. M. M. Sadeghi, E. Shahrousvand, M. Ghollasi, and A. Salimi, "Superficial physicochemical properties of polyurethane biomaterials as osteogenic regulators in human mesenchymal stem cells fates," *Colloids Surfaces B Biointerfaces*, vol. 156, pp. 292–304, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2017.04.059>.
- [7] U. Šebenik and M. Krajnc, "Influence of the soft segment length and content on the synthesis and properties of isocyanate-terminated urethane prepolymers," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 27, no. 7, pp. 527–535, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2006.10.001>.
- [8] C. M. Brunette, S. L. Hsu, and W. J. MacKnight, "Hydrogen-Bonding Properties

- of Hard-Segment Model Compounds in Polyurethane Block Copolymers,” *Macromolecules*, vol. 15, no. 1, pp. 71–77, 1982, doi: 10.1021/ma00229a014.
- [9] H. Huang *et al.*, “Influence of hard segment content and soft segment length on the microphase structure and mechanical performance of polyurethane-based polymer concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 284, p. 122388, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122388.
- [10] J. H. Li, R. Y. Hong, M. Y. Li, H. Z. Li, Y. Zheng, and J. Ding, “Effects of ZnO nanoparticles on the mechanical and antibacterial properties of polyurethane coatings,” *Prog. Org. Coatings*, vol. 64, no. 4, pp. 504–509, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2008.08.013>.
- [11] T. Jiao *et al.*, “High performance PS-PU-PANI anticorrosive coatings from waste PS foams,” *Chem. Eng. J.*, vol. 519, p. 165060, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.165060>.
- [12] G. Lligadas, J. C. Ronda, M. Galiá, and V. Cádiz, “Plant oils as platform chemicals for polyurethane synthesis: Current state-of-the-art,” *Biomacromolecules*, vol. 11, no. 11, pp. 2825–2835, 2010, doi: 10.1021/bm100839x.
- [13] K. Carvalho, R. M. B. Alves, and L. Kulay, “Environmental performance of alternative green polyol synthesis routes: A proposal for improvement,” *Processes*, vol. 9, no. 7, 2021, doi: 10.3390/pr9071122.
- [14] Y. Lu and R. C. Larock, “Soybean oil-based, aqueous cationic polyurethane dispersions: Synthesis and properties,” *Prog. Org. Coatings*, vol. 69, no. 1, pp. 31–37, 2010, doi: 10.1016/j.porgcoat.2010.04.024.
- [15] M. Ionescu, Z. S. Petrović, and X. Wan, “Ethoxylated soybean polyols for polyurethanes,” *J. Polym. Environ.*, vol. 15, no. 4, pp. 237–243, 2007, doi: 10.1007/s10924-007-0065-4.
- [16] P. Furtwengler and L. Avérous, “Renewable polyols for advanced polyurethane foams from diverse biomass resources,” *Polym. Chem.*, vol. 9,

- no. 32, pp. 4258–4287, 2018, doi: <https://doi.org/10.1039/c8py00827b>.
- [17] N. Mahmood, Z. Yuan, J. Schmidt, and C. Xu, “Production of polyols via direct hydrolysis of kraft lignin: Effect of process parameters,” *Bioresour. Technol.*, vol. 139, pp. 13–20, 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2013.03.199.
- [18] N. Nwachoko, U. Akuru, A. Inyingi, R. Kpaanadee, T.-B. Odinga-Israel, and O. Chukwudi, “Physicochemical properties and fatty acid composition of freshly prepared palm oil,” *African J. Biochem. Res.*, vol. 17, pp. 9–14, Jul. 2023, doi: 10.5897/AJBR2023.1167.
- [19] C. P. P. H, C. Lan, P. Lin, and Y. Kuo, “Effects of cooking method, cooking oil, and food type on aldehyde emissions in cooking oil fumes,” *J. Hazard. Mater.*, 2016, doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.10.045.
- [20] S. Gharby *et al.*, “Vegetable oil oxidation: Mechanisms, impacts on quality, and approaches to enhance shelf life,” *Food Chem. X*, vol. 28, p. 102541, May 2025, doi: 10.1016/j.fochx.2025.102541.
- [21] D. Riyapan, A. Saetung, and N. Saetung, “A Novel Rigid PU Foam Based on Modified Used Palm Oil as Sound Absorbing Material,” *J. Polym. Environ.*, vol. 27, no. 8, pp. 1693–1708, 2019, doi: 10.1007/s10924-019-01460-9.
- [22] N. Sukhawipat, L. Saengdee, P. Pasetto, J. Junthip, and E. Martwong, “Sustainable Rigid Polyurethane Foam from Wasted Palm Oil and Water Hyacinth Fiber Composite—A Green Sound-Absorbing Material,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 1, 2022, doi: 10.3390/polym14010201.
- [23] A. Suwan, N. Sukhawipat, N. Uthaipan, A. Saetung, and N. Saetung, “Some properties of experimental particleboard manufactured from waste bamboo using modified recycled palm oil as adhesive,” *Prog. Org. Coatings*, vol. 149, no. July, p. 105899, 2020, doi: 10.1016/j.porgcoat.2020.105899.
- [24] G. S. Dhaliwal, S. Anandan, K. Chandrashekhara, J. Lees, and P. Nam, “Development and characterization of polyurethane foams with substitution of polyether polyol with soy-based polyol,” *Eur. Polym. J.*, vol. 107, pp. 105–

- 117, 2018, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2018.08.001.
- [25] S. Krishna, B. Karteek, B. Ravi, A. Sashivinay, and K. Gaddam, "Natural fibre reinforced vegetable-oil based polyurethane composites : a review," *J. Polym. Res.*, vol. 30, no. 8, pp. 1–27, 2023, doi: 10.1007/s10965-023-03703-9.
- [26] C. Zhang and M. R. Kessler, "Bio-based polyurethane foam made from compatible blends of vegetable-oil-based polyol and petroleum-based polyol," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 3, no. 4, pp. 743–749, 2015, doi: 10.1021/acssuschemeng.5b00049.
- [27] Y. Tu, G. J. Suppes, and F. Hsieh, "Water-Blown Rigid and Flexible Polyurethane Foams Containing Epoxidized Soybean Oil Triglycerides," vol. 109, pp. 537–544, 2008, doi: 10.1002/app.
- [28] T. W. Pechar *et al.*, "Characterization and comparison of polyurethane networks prepared using soybean-based polyols with varying hydroxyl content and their blends with petroleum-based polyols," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 101, no. 3, pp. 1432–1443, 2006, doi: 10.1002/app.23625.
- [29] F. M. De Souza, P. K. Kahol, and R. K. Gupta, "Introduction to Polyurethane Chemistry," *ACS Symp. Ser.*, vol. 1380, pp. 1–24, 2021, doi: 10.1021/bk-2021-1380.ch001.
- [30] D. Ratna, "Chapter 1 - Chemistry and general applications of thermoset resins," D. B. T.-R. A. and A. of T. R. (Second E. Ratna, Ed., Elsevier, 2022, pp. 1–172. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85664-5.00006-5>.
- [31] R. P. Brannigan, A. Walder, and A. P. Dove, "Application of functional diols derived from pentaerythritol as chain extenders in the synthesis of novel thermoplastic polyester-urethane elastomers¹¹Electronic supplementary information (ESI) available. See DOI: 10.1039/c9py00951e," *Polym. Chem.*, vol. 10, no. 38, pp. 5236–5241, 2019, doi: <https://doi.org/10.1039/c9py00951e>.
- [32] G. Toader *et al.*, "Effect of Aromatic Chain Extenders on Polyurea and Polyurethane Coatings Designed for Defense Applications," *Polymers (Basel).*,

vol. 15, no. 3, p. 756, Feb. 2023, doi: 10.3390/polym15030756.

- [33] A. Iqbal, M. A. Javaid, M. T. Hussain, and Z. A. Raza, "Development of lactic acid based chain extender and soybean oil-derived polyurethanes for ecofriendly sustained drug delivery systems," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 265, p. 130717, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130717>.
- [34] P. Król, Ł. Uram, B. Król, K. Pielichowska, and M. Walczak, "Study of chemical, physico-mechanical and biological properties of 4,4'-methylenebis(cyclohexyl isocyanate)-based polyurethane films," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 93, no. July, pp. 483–494, 2018, doi: 10.1016/j.msec.2018.07.082.
- [35] R. Li, J. A. Ton Loontjens, and Z. Shan, "The varying mass ratios of soft and hard segments in waterborne polyurethane films: Performances of thermal conductivity and adhesive properties," *Eur. Polym. J.*, vol. 112, no. September 2018, pp. 423–432, 2019, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2019.01.025.
- [36] R. E.V., V. K.P., N. Balachandran, D. Mathew, and S. Kumar K.S., "Soft-segment Free Polyurethanes and their Self-healable Films," *Prog. Org. Coatings*, vol. 146, no. January, p. 105709, 2020, doi: 10.1016/j.porgcoat.2020.105709.
- [37] H. Peng, X. Du, X. Cheng, H. Wang, and Z. Du, "Room-temperature self-healable and stretchable waterborne polyurethane film fabricated via multiple hydrogen bonds," *Prog. Org. Coatings*, vol. 151, p. 106081, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.106081>.
- [38] S. Dai *et al.*, "A soft polyurethane foam adhesive with ultra-high and stable adhesion based on chemical coupling and mechanical interlocking," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 723, p. 137350, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.137350>.
- [39] S. Dutta, N. Karak, and T. Jana, "Evaluation of Mesua ferrea L. seed oil modified polyurethane paints," *Prog. Org. Coatings*, vol. 65, no. 1, pp. 131–135, 2009, doi: 10.1016/j.porgcoat.2008.10.008.
- [40] N. Sukhawipat, N. Saetung, J. F. Pilard, S. Bistac, and A. Saetung, "Effects of

molecular weight of hydroxyl telechelic natural rubber on novel cationic waterborne polyurethane: A new approach to water-based adhesives for leather applications,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 99, no. March, p. 102593, 2020, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2020.102593.

- [41] F. Gulmez, A. Yercan, B. Kocaaga, and F. S. Guner, “pH-sensitive castor oil/PEG-based polyurethane films for drug delivery,” *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, vol. 61, p. 102160, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2020.102160>.
- [42] A. El Gharra^k *et al.*, “Tunable physicochemical properties of lignin and rapeseed oil-based polyurethane coatings with tailored release property of coated NPK fertilizer,” *Prog. Org. Coatings*, vol. 170, p. 106982, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106982>.
- [43] W. Wang, W. Zhang, L. Li, W. Deng, M. Liu, and J. Hu, “Biodegradable starch-based packaging films incorporated with polyurethane-encapsulated essential-oil microcapsules for sustained food preservation,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 235, p. 123889, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123889>.
- [44] J. Tengsuthiwat, S. Limrungruengrat, and N. Sukhawipat, “A Green Dual Function Engineering Material—Sound Absorption and Heat Insulation Based on Water Hyacinth Fiber and Waste Palm Oil,” *Fibers Polym.*, 2023, doi: 10.1007/s12221-023-00304-7.
- [45] T. Chotchuangchutchaval, P. Pasetto, S. Limrungruengrat, and N. Sukhawipat, “Conversion of Recycled Palm Oil and Water Hyacinth Fiber into Polyurethane Composite Foam—Noise Reduction Media in Oxygen Concentrator Machine,” *J. Polym. Environ.*, vol. 32, no. 2, pp. 672–687, 2024, doi: 10.1007/s10924-023-03006-6.
- [46] E. Sacher, “A Re-Examination of the Polyurethane Reaction,” *J. Macromol. Sci. Part B*, vol. 16, no. 4, pp. 525–538, 1979, doi: 10.1080/00222347908215180.
- [47] N. Polyurethane, E. Delebecq, J. Pascault, B. Boutevin, and U. De Lyon, “On the Versatility of Urethane / Urea Bonds : Reversibility , Blocked,” 2013.

- [48] N. Sukhawipat, "Synthesis of natural rubber based cationic waterborne polyurethane dispersion for adhesive applications To cite this version : HAL Id : tel-02105401 Nathapong SUKHAWIPAT Synthesis of Natural Rubber Based Cationic Waterborne Polyurethane Dispersion for Adh," 2019.
- [49] V. Athanasiadis, D. Kalompatsios, M. Mantiniotou, and S. I. Lalas, "Investigation into the Reduction of Palm Oil in Foods by Blended Vegetable Oils through Response Surface Methodology and Oxidative Stability Tests," *Antioxidants*, vol. 13, no. 8, p. 929, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/antiox13080929>.
- [50] M. Z. Arniza *et al.*, "Synthesis of transesterified palm olein-based Polyol and rigid polyurethanes from this polyol," *JAOCS, J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 92, no. 2, pp. 243–255, 2015, doi: 10.1007/s11746-015-2592-9.
- [51] I. Palle *et al.*, "Effects of NCO/OH Ratios on Bio-Based Polyurethane Film Properties Made from Acacia mangium Liquefied Wood," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 5, p. 1154, Feb. 2023, doi: 10.3390/polym15051154.
- [52] E. YILGÖR and İ. YILGÖR, "Influence of soft segment structure, hydrogen bonding, and diisocyanate symmetry on morphology and properties of segmented thermoplastic polyurethanes and polyureas," *Turkish J. Chem.*, vol. 47, no. 5, pp. 1007–1017, Oct. 2023, doi: 10.55730/1300-0527.3591.
- [53] H. Pandya and P. Mahanwar, "Fundamental insight into anionic aqueous polyurethane dispersions," *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.*, vol. 3, no. 3, pp. 102–110, 2020, doi: 10.1016/j.aiepr.2020.07.003.
- [54] D. B. Klinedinst, I. Yilgör, E. Yilgör, M. Zhang, and G. L. Wilkes, "The effect of varying soft and hard segment length on the structure–property relationships of segmented polyurethanes based on a linear symmetric diisocyanate, 1,4-butanediol and PTMO soft segments," *Polymer (Guildf)*, vol. 53, no. 23, pp. 5358–5366, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.polymer.2012.08.005.
- [55] A. W. Grzelak, P. Boinard, and J. J. Liggat, "The influence of diol chain extender on morphology and properties of thermally-triggered UV-stable self-healing

- polyurethane coatings,” *Prog. Org. Coatings*, vol. 122, no. January, pp. 1–9, 2018, doi: 10.1016/j.porgcoat.2018.04.032.
- [56] D. Ren and C. E. Frazier, “Structure-property behavior of moisture-cure polyurethane wood adhesives: Influence of hard segment content,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 45, pp. 118–124, 2013, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2013.04.007.
- [57] D. Aoki, A. Miyake, W. Tachaboonyakiat, and H. Ajiro, “Remarkable diastereomeric effect on thermoresponsive behavior of polyurethane based on lysine and tartrate ester derivatives,” *RSC Adv.*, vol. 11, no. 56, pp. 35607–35613, 2021, doi: 10.1039/d1ra05877k.
- [58] T. Ravindran, M. R. G. Nayar, and D. J. Francis, “Segmented block copolymers based on liquid natural rubber,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 42, no. 2, pp. 325–333, 1991, doi: 10.1002/app.1991.070420204.
- [59] Y.-K. Jhon, I.-W. Cheong, and J.-H. Kim, “Chain extension study of aqueous polyurethane dispersions,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 179, no. 1, pp. 71–78, Apr. 2001, doi: 10.1016/S0927-7757(00)00714-7.
- [60] G. Fei, K. Zhu, H. Wang, Y. Shen, J. Zou, and J. Lan, “Morphology, dynamic rheology, and cohesive properties of epoxy-modified polyurethane-acrylate microemulsions prepared by in situ surfactant-free polymerization,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 131, no. 4, pp. 1–8, 2014, doi: 10.1002/app.39886.
- [61] G. C. Liu, Y. S. He, J. B. Zeng, Y. Xu, and Y. Z. Wang, “In situ formed crosslinked polyurethane toughened polylactide,” *Polym. Chem.*, vol. 5, no. 7, pp. 2530–2539, 2014, doi: 10.1039/c3py01649h.
- [62] M. M. Rahman, H. Do Kim, and W. K. Lee, “Properties of waterborne polyurethane adhesives: Effect of chain extender and polyol content,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 23, no. 1, pp. 177–193, 2009, doi: 10.1163/156856108X344667.
- [63] S. Xu, L. Xie, X. Yu, Y. Xiong, and H. Tang, “Synthesis and characterization of phenyl polysiloxane modified polyurea/polyurethanes,” *J. Polym. Sci. Part A*

- Polym. Chem.*, vol. 53, no. 15, pp. 1794–1805, 2015, doi: 10.1002/pola.27627.
- [64] Y. Xiao *et al.*, “Effect of phase separation on water resistance of green waterborne polyurethanes: Unexpected stronger impact compared to hydrophilic segments,” *Adv. Polym. Technol.*, vol. 37, no. 6, pp. 1618–1624, 2018, doi: 10.1002/adv.21818.
- [65] J. Vega-Baudrit, M. Sibaja-Ballester, P. Vázquez, R. Torregrosa-Maciá, and J. Miguel Martín-Martínez, “Properties of thermoplastic polyurethane adhesives containing nanosilicas with different specific surface area and silanol content,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 27, no. 6, pp. 469–479, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2006.08.001.
- [66] J. Carlos Quagliano Amado, “Thermal Resistance Properties of Polyurethanes and Its Composites,” in *Thermosoftening Plastics*, IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.87039.
- [67] S. L. Samuels and G. L. Wilkes, “Comments on the multiple endothermic behavior observed in segmented urethane systems,” *J. Polym. Sci. Polym. Phys. Ed.*, vol. 11, no. 4, pp. 807–811, 1973, doi: 10.1002/pol.1973.180110413.
- [68] Z. S. Petrović, I. Javni, and V. Divjaković, “Structure and physical properties of segmented polyurethane elastomers containing chemical crosslinks in the hard segment,” *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, vol. 36, no. 2, pp. 221–235, 1998, doi: 10.1002/(SICI)1099-0488(19980130)36:2<221::AID-POLB3>3.0.CO;2-U.
- [69] B. W. Chieng, N. A. Ibrahim, W. M. Z. W. Yunus, and M. Z. Hussein, “Plasticized poly(lactic acid) with low molecular weight poly(ethylene glycol): Mechanical, thermal, and morphology properties,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 130, no. 6, pp. 4576–4580, 2013, doi: 10.1002/app.39742.



ภาคผนวก ก.

ตารางคำนวณการใช้สารสำหรับสังเคราะห์พอลิยูรีเทน

ตารางที่ ก-1 คำนวณปริมาณการใช้สารที่เอทิลีนไกลคอล 0 โมล

Ingredient	NCO index	mol	Eq mol	Eq mol x mol	Weight for 5 g	THF (g)
mUPO	100	1	8.196	8.196	0.02	25.26
PEG3,000		1	1500	1500	4.46	
TDI		2	87.07	174.14	0.52	
EG		0	30	0	0.00	

ตารางที่ ก-2 คำนวณปริมาณการใช้สารที่เอทิลีนไกลคอล 1 โมล

Ingredient	NCO index	mol	Eq mol	Eq mol x mol	Weight for 5 g	THF (g)
mUPO	100	1	8.196	8.196	0.02	23.62
PEG3,000		1	1500	1500	4.17	
TDI		3	87.07	261.21	0.73	
EG		1	30	30	0.08	

ตารางที่ ก-3 คำนวณปริมาณการใช้สารที่เอทิลีนไกลคอล 2 โมล

Ingredient	NCO index	mol	Eq mol	Eq mol x mol	Weight for 5 g	THF (g)
mUPO	100	1	8.196	8.196	0.02	22.18
PEG3,000		1	1500	1500	3.91	
TDI		4	87.07	348.28	0.91	
EG		2	30	60	0.16	

ตารางที่ ก-4 คำนวณปริมาณการใช้สารที่เอทิลีนไกลคอล 3 โมล

Ingredient	NCO index	mol	Eq mol	Eq mol x mol	Weight for 5 g	THF (g)
mUPO	100	1	8.196	8.196	0.02	21.83
PEG3,000		1	1500	1500	3.85	
TDI		4	87.07	348.28	0.89	
EG		3	30	90	0.23	

ตารางที่ ก-5 คำนวณปริมาณการใช้สารที่เอทิลีนไกลคอล 4 โมล

Ingredient	NCO index	mol	Eq mol	Eq mol x mol	Weight for 5 g	THF (g)
mUPO	100	1	8.196	8.196	0.02	20.60
PEG3,000		1	1500	1500	3.63	
TDI		5	87.07	435.35	1.05	
EG		4	30	120	0.29	

ตารางที่ ก-6 คำนวณปริมาณการใช้สารที่เอทิลีนไกลคอล 5 โมล

Ingredient	NCO index	mol	Eq mol	Eq mol x mol	Weight for 5 g	THF (g)
mUPO	100	1	8.196	8.196	0.02	19.49
PEG3,000		1	1500	1500	3.44	
TDI		6	87.07	522.42	1.20	
EG		5	30	150	0.34	

ภาคผนวก ข.

การเข้าร่วมงานประชุมวิชาการ The International Polymer Conference of Thailand
ครั้งที่ 15





ภาพที่ ข-1 การเข้าร่วมงานประชุมวิชาการ The International Polymer Conference of Thailand ครั้งที่ 15



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายธนรัช ยิ่งสถาพรอนันต์
ชื่อวิทยานิพนธ์	การเตรียมพอลิยูรีเทนจากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วตัดแปรผสม พอลิเอทิลีนไกลคอลสำหรับการเคลือบผิว
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล
ประวัติ	2564: จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม พอลิเมอร์ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2565-2566: ทำงานตำแหน่ง QA/QC Supervisor บริษัท เทียน โพลีเอสเตอร์ จำกัด 2568: เข้าร่วมประชุมวิชาการ PCT Conference ครั้งที่ 15