

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับสถานะในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน
เพื่อสังเคราะห์สารเสริมสภาพพลาสติกสำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์

นางสาวรัตนภรณ์ มั่นทุ่ง วศ.บ. (วิศวกรรมพอลิเมอร์)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ
คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

(ดร.อนวรรตน์ เกตุคง)

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

(รศ. ดร.จตุพร วุฒิกนกกาญจน์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....

(ดร.นันทน์ ถาวรังกูร)

กรรมการ

.....

(ดร.นนทรี นิมิตศิริวัฒน์)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับสภาวะในการทำปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันเพื่อสังเคราะห์สารเสริมสภาพพลาสติกสำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์
หน่วยกิต	15
ผู้เขียน	นางสาวรัตนภรณ์ มั่นทุ่ง
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวัสดุ
สายวิชา	เทคโนโลยีวัสดุ
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาสารเสริมสภาพพลาสติกสำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์จากผลิตภัณฑ์ระหว่างกลีเซอรอลกับกรดไขมันโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะในการทำปฏิกิริยาเอสเตอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรด 2 ประเภท (กรดโอเลอิกและกรดอะซิติก) ที่มีต่อโครงสร้างอะซิทธิเลทโมโนโอเลอิกและอะซิทธิเลทไดโอเลอิก นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ยังสนใจที่จะศึกษาผลของการใช้กรดไขมันอีพอกซิไดซ์แทนการใช้กรดไขมันแบบปกติในการทำปฏิกิริยาดังกล่าวข้างต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณของอะซิทธิเลทโมโนโอเลอิกและ/หรืออะซิทธิเลทไดโอเลอิก และโครงสร้างทางเคมีของผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคโครมาโตกราฟีสมรรถนะสูงแบบแยกตามขนาด (HPLC) เทคนิคฟูริเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) และเทคนิคโปรตอนนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี ($^1\text{H-NMR}$) ตามลำดับจากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่ให้ปริมาณอะซิทธิเลทโมโนโอเลอิกและ/หรืออะซิทธิเลทไดโอเลอิกสูงสุดร้อยละ 29.45 คือ สัดส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อกรดโอเลอิกและกรดอะซิติกเท่ากับ 10:1:7 ที่เวลา 60 นาที เมื่อนำสารที่ได้ไปใช้เป็นสารเสริมพลาสติกร่วมกับน้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซิไดซ์ที่สัดส่วนผสมต่างๆ เพื่อเตรียมพอลิไวนิลคลอไรด์คอมปาวด์ โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ แล้วทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปแบบใช้ความร้อน โดยจากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าการเติมสารอีพอกซิไดซ์อะซิทธิเลทโอเลอิกที่ได้จากงานวิจัยฯ ไม่มีผลให้ค่าการทนแรงดึงสูงสุดเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าค่ามอดูลัสของพอลิไวนิลคลอไรด์คอมปาวด์ที่มีการเติมอีพอกซิไดซ์อะซิทธิเลทโอเลอิกลงไป จะ

มีแนวโน้มสูงกว่ากรณีที่เคยมีน้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซิไคซ์เพียงชนิดเดียว ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ชี้ให้เห็นว่าสารอีพอกซิไคซ์อะซิติกเลทโพลีเอทที่เตรียมได้ในงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มสภาพพลาสติกสำหรับพอลิไวนิลคลอไรด์ได้ โดยเชื่อว่าอาจจะมีสาเหตุจากสภาพตัวของสารอีพอกซิไคซ์อะซิติกเลทโพลีเอทที่เตรียมได้ยังไม่สูงพอ

คำสำคัญ: กรดไขมัน/พอลิไวนิลคลอไรด์/สารเสริมสภาพพลาสติก/เอสเทอร์ฟิเคชัน/อีพอกซิเคชัน

Thesis Title	A Study on Relationship between Structure and Esterification Conditions for a Synthesis of PVC Plasticizer
Thesis Credits	15
Candidate	Miss Rattanaporn Manthung
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jatuphorn Wootthikanokkhan
Program	Master of Engineering
Field of Study	Materials Technology
Department	Materials Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2555

Abstract

This research work has concerned a feasibility on development of plasticizer for poly (vinyl chloride) from mono- and diglycerides obtained by reacting glycerol with two types of acid namely oleic acid and acetic acid. The aims of this research were to study the effect of reaction conditions on chemical structure and percentage yield of the products. The feasibility of using the epoxidized oleic acid a replacement of the oleic acid is also our interest. The obtained products were characterized by using fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and proton nuclear magnetic resonance spectroscopy (H^1 -NMR) respectively. The content of acetylate monooleate and dioleate were determined by using high performance liquid chromatography (HPLC) technique. From the results, it was found that the optimum glycerol: oleic acid: acetic acid mole ratio and reaction time corresponding to maximum acetylated mono- and dioleate content (29.45 %) are 10:1:7 and 60 minute respectively. After that, the product was blended with epoxidized soy bean oil and PVC powder in order to prepared poly(vinyl chloride) compound, using a twin screws extruder. The extrudate was fabricated into sheets by using a compression moulding technique. It was found that the epoxidized acetylated oleate obtained from this research work did not significantly affect tensile strength of the fabricated poly(vinyl chloride) sheet. On the other hand, modulus of the poly(vinyl chloride) compound containing the epoxidized acetylated oleate increased at the expense of their elongation, as compared to those the poly(vinyl chloride) compound containing epoxidized soybean oil only.

These results indicated that the epoxidized acetylated oleate obtained from this research work cannot function as an effective plasticizer for poly(vinyl chloride). It was believed that this was attributed to an insufficient polarity of the epoxidized acetylated oleate.

Keyword: Esterification/Epoxidation/Fatty acid/Plasticizer/Poly(vinyl chloride)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี โดยได้รับความรู้ คำแนะนำต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหา ระหว่างการดำเนินงานวิจัย รวมถึงการได้รับประสบการณ์ใหม่ๆ ในการทำงานจากอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ รศ. ดร. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านในสาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุที่ให้ คำปรึกษา และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านได้แก่ ดร.อนรรตน์ เกตุคง บริษัทไทย พลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด ดร.นันท์ ถาวรังกูร คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ ดร.นนทรี นิमितศิริวัฒน์ สำนักพัฒนาและฝึกอบรมโรงงาน ดันแบบ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้สละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ ให้ข้อแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ รศ. ดร.คณิต กฤษณังกูร และพี่ๆ จากสาขาวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพ และเทคโนโลยี ที่ให้ใช้เครื่อง HPLC ให้คำปรึกษาแนะนำ และชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ในการใช้เครื่องฯ

ขอขอบทุนวิจัยจากโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ (National Research Universities; NRU รหัส โครงการ 54000278) ที่ให้ทุนสนับสนุนตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณกลุ่มวิจัยและพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์เพื่อการประยุกต์ด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและเทคโนโลยี (PENTEC) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือ สำหรับวิเคราะห์และทดสอบ สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณสมาชิกในครอบครัวของข้าพเจ้าทุกท่าน รวมถึงเพื่อนๆ และพี่ๆ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ สำหรับกำลังใจ และความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๘
กิตติกรรมประกาศ	๙
สารบัญ	๗
รายการตาราง	๑๑
รายการรูปประกอบ	๑๒
รายการสัญลักษณ์	๑๓

บทที่

1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	9
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	10
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	10
2. ทฤษฎี	11
2.1 พอลิไวนิลคลอไรด์	11
2.2 สารเสริมสภาพพลาสติก	12
2.2.1 สารเสริมสภาพพลาสติกสำหรับพีวีซี	14
2.2.2 แอนติพลาสติกไซเซชัน	16
2.3 กรดไขมัน	17
2.4 กลีเซอรอล	19
2.4.1 การสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์	19
2.4.2 การสังเคราะห์อะซิทธิเลทโมโน- และไดกลีเซอไรด์	21

2.5	ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	23
	หน้า	
2.5.1	ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน	23
2.5.2	ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	26
2.6	ปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน	27
3.	การดำเนินงานวิจัย	29
3.1	วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี	29
3.1.1	เครื่องแก้ว	29
3.1.2	วัสดุอุปกรณ์อื่นๆ	30
3.1.3	เครื่องมือในการทดลอง	30
3.1.4	สารเคมี	31
3.2	การทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	33
3.3	การทำปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน	35
3.4	การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์	36
3.4.1	วิเคราะห์หาปริมาณ โมโนไอโอดีเอท ไดไอโอดีเอท อะซิทิเลท โมโนไอโอดีเอทและ อะซิทิเลทไดไอโอดีเอท	36
3.4.2	วิเคราะห์ลักษณะการเข้าทำปฏิกิริยาของกรด	37
3.4.3	วิเคราะห์หามุ่พอกไซค์จากปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน	37
3.4.4	การทดสอบหาค่า Iodine Value	38
3.4.5	การทดสอบหาค่าความหนืด	38
3.5	การเตรียมพอลิไวนิลคลอไรด์คอมปาวด์	39
3.5.1	การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ	39
3.5.2	การทดสอบสมบัติเชิงกล	41
4.	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	43
4.1	ผลของสภาวะในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรดไอโอดีอิก	43
4.1.1	ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา	43
4.1.2	ผลของอุณหภูมิ	45
4.1.3	ผลของปริมาณกรดซัลฟิวริก	46
4.1.4	ผลของสัดส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อกรดไอโอดีอิก	47

4.2	ผลของสภาวะในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรดโอลีนิกและกรดอะซีติก	49
4.3	ผลการเตรียมกรดโอลีนิกอิมพอกซีไดซ์	55
4.4	ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล	62
5.	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	66
5.1	ผลของสภาวะในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	66
5.1.1	ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรดโอลีนิก	66
5.1.2	ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรดโอลีนิกและกรดอะซีติก	67
5.1.3	ปฏิกิริยาอิมพอกซีไดซ์	67
5.2	สมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมปาวด์ที่เติมสารเสริมสภาพพลาสติกที่พัฒนาขึ้น	67
5.3	ข้อเสนอแนะ	68
	เอกสารอ้างอิง	69
	ภาคผนวก	
ก.	ร้อยละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรดโอลีนิก	73
ข.	HPLC โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรดโอลีนิกและกรดอะซีติก ที่สภาวะต่างๆ	86
ค.	สเปกตรัม FTIR ของกรดโอลีนิกอิมพอกซีไดซ์ที่สังเคราะห์ที่เวลาต่างๆ	96
ง.	ค่าสมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมปาวด์ที่เติมสารเสริมสภาพพลาสติกที่สัดส่วนการผสมต่างๆ	103
	ประวัตินักวิจัย	105

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 องค์ประกอบของกรดไขมันที่อยู่ในน้ำมันเมล็ดขางพาราและน้ำมันถั่วเหลือง	4
2.1 สมบัติของพอลิไวนิลคลอไรด์	11
2.2 สมบัติและโครงสร้างของกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัว	18
3.1 รายการอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	30
3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	31
3.3 สภาพะในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรดโอเลอิก เพื่อศึกษาผลของเวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่ง และสัดส่วน โดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อกรดโอเลอิก	34
3.4 สภาพะในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรดโอเลอิก และกรดอะซิติก เพื่อศึกษาผลของสัดส่วน โดยโมลระหว่างกรดอะซิติกต่อ กรดโอเลอิกและเวลาในการทำปฏิกิริยา	34
3.5 สูตรการขึ้นรูปพอลิไวนิลคลอไรด์	39
ก.1 ร้อยละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง กลีเซอรอลกับกรดโอเลอิก ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ	74
ก.2 ร้อยละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง กลีเซอรอลกับกรดโอเลอิก ที่อุณหภูมิต่างๆ	74
ก.3 ร้อยละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง กลีเซอรอลกับกรดโอเลอิก ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ	74
ก.4 แสดงร้อยละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง กลีเซอรอลกับกรดโอเลอิก ที่สัดส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อกรดโอเลอิก ต่างๆ	75
ง.1 ค่าสมบัติเชิงกลของพีวีซีคอมปาวด์ที่เติมสารเสริมสภาพพลาสติกที่สัดส่วนการผสม ต่างๆ	104

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
1.1 โครงสร้างเคมีของสารไดกลีเซอไรด์อีพอกซีไดซ์ที่ได้หลังจากปฏิกิริยา ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (ก) ปฏิกิริยาเอซิลเลชัน (ข) และปฏิกิริยาอีพอกซีเดชัน (ค)	3
1.2 โครงสร้างเคมีของสารไดกลีเซอไรด์อีพอกซีไดซ์ที่ได้หลังจากปฏิกิริยา เอสเทอริฟิเคชัน (ก) และปฏิกิริยาอีพอกซีเดชัน (ข)	4
1.3 ผลของเวลาในการสังเคราะห์ที่มีต่อปริมาณของกรดไขมัน กลีเซอรอล โมโนอัลคิลกลีเซอรอล และสารผสมระหว่างไดอัลคิลกลีเซอรอลกับไตรอัลคิล กลีเซอรอล	5
1.4 ผลของสัดส่วนโดยโมลระหว่างกรดโอลิกต่อกลีเซอรอลที่มีต่อ ไดอัลคิลกลีเซอรอล	6
1.5 สเปกตรัม ¹ H-NMR ของ ก) น้ำมันถั่วเหลือง ข) น้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซีไดซ์	7
1.6 สเปกตรัม ¹ H-NMR ของ a) น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ร้อยละ 20 b) น้ำมันลินสีดอีพอกซีไดซ์ร้อยละ	8
2.1 กลไกการเกิดสารเสริมสภาพพลาสติก	13
2.2 โครงสร้างเคมีของพลาตเอสเทอร์	14
2.3 โครงสร้างเคมีของอดิเพต	15
2.4 โครงสร้างเคมีของฟอสเฟตเอสเทอร์	15
2.5 ปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารเสริมสภาพพลาสติกที่มีหมู่อีพอกซีกับไฮโดรเจนคลอไรด์	16
2.6 โครงสร้างเคมีของกรดไขมัน	17
2.7 ปฏิกิริยาไกลเซอโรไลซิสระหว่างกลีเซอรอลกับไตรกลีเซอไรด์	19
2.8 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรด	20
2.9 โครงสร้างโมเลกุลของอะซิติกเลทโมโน-และไดกลีเซอไรด์	21
2.10 กลไกการเร่งของกรดในปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน	24
2.11 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างไตรกลีเซอไรด์ (ไขมัน) กับน้ำ	26

รูป (ต่อ)	หน้า
2.12 กลไกการเกิดปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน	27
2.13 ปฏิกิริยาการเปิดวงของหมู่อีพอกซิ	27
3.1 ภาพการติดตั้งอุปกรณ์ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน	33
3.2 ภาพการติดตั้งอุปกรณ์ในปฏิกิริยาอีพอกซิเดชัน	35
3.3 เครื่องโครมาโตกราฟีสมรรถนะสูงแบบแยกตามขนาด (HPLC)	36
3.4 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี ($^1\text{H-NMR}$)	37
3.5 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR)	37
3.6 เครื่องปั่นผสมแบบความเร็วสูง (High speed mixer)	40
3.7 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder)	40
3.8 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบใช้ความร้อน (Compression moulding machine)	41
3.9 ชิ้นตัวอย่างทดสอบสมบัติด้านทานแรงดึง	41
3.10 เครื่องทดสอบสมบัติด้านทานแรงดึง (Universal testing machine)	42
4.1 HPLC โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง กลีเซอรอลกับกรดโอลีนิก	43
4.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณ โมโนโอลีโอและไดโอลีโอ	44
4.3 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างไดโอลีโอกับกรดโอลีนิก	45
4.4 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างโมโนโอลีโอกับน้ำ	45
4.5 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณ โมโนโอลีโอและไดโอลีโอ	46
4.6 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณ โมโนโอลีโอและไดโอลีโอ	47
4.7 ผลของสัดส่วนโดยโมลระหว่างกลีเซอรอลต่อกรดโอลีนิกต่อปริมาณ โมโนโอลีโอและไดโอลีโอ	48
4.8 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างไดโอลีโอกับน้ำ	48
4.9 HPLC โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง กลีเซอรอลกับกรดโอลีนิก (ก) และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ระหว่างกลีเซอรอลกับกรดโอลีนิกและกรดอะซิติก (ข)	49
4.10 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ระหว่างกลีเซอรอลกับกรดโอลีนิกและกรดอะซิติก	50
4.11 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างไดโอลีโอกับกรดอะซิติก	51
4.12 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรดโอลีนิก และกรดอะซิติก	52

รูป (ต่อ)	หน้า
4.13 ผลของสัดส่วนโดยโมลระหว่างกรดอะซิติก	52
4.14 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของ อีพอกซีไดซ์อะซิติกเลทโอลีเอท	54
4.15 ปฏิกิริยาอีพอกซีเคชันบนพื้นระอุของกรดโอลีอิก (ก) และ ปฏิกิริยา เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกรดอะซิติกกับหมู่ไฮดรอกซีของอีพอกไซด์ที่เปิดวง (ข)	55
4.16 สเปกตรัม FTIR ของกรดโอลีอิกที่ผ่านการทำปฏิกิริยาอีพอกซีเคชัน	56
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความสูงของพีคของพันธะ C-O และ พีคของ พันธะ O-H เทียบกับพีคของ C-H กับเวลาในการทำปฏิกิริยา	57
4.18 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของกรดโอลีอิก	58
4.19 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ อีพอกซีไดซ์กรดโอลีอิก	59
4.20 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของอะซิติกเลทอีพอกซีไดซ์โอลีเอท	61
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของพีวีซีคอมปาวด์ชนิดต่างๆ	63
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทนแรงดึงของพีวีซีคอมปาวด์ชนิดต่างๆ	63
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสของพีวีซีคอมปาวด์ชนิดต่างๆ	64
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ของพีวีซีคอมปาวด์ชนิดต่างๆ	64
4.25 DSC เทอร์โมแกรมของพีวีซีคอมปาวด์ชนิดต่างๆ	65
ข.1 HPLC โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง กลีเซอรอลกับกรดโอลีอิกและกรดอะซิติก ที่สัดส่วนระหว่างกรดอะซิติกต่อกรด โอลีอิก (3:1) เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที	87
ข.2 HPLC โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง กลีเซอรอลกับกรดโอลีอิกและกรดอะซิติก ที่สัดส่วนระหว่างกรดอะซิติกต่อกรด โอลีอิก (3:1) เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที	88
ข.3 HPLC โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง กลีเซอรอลกับกรดโอลีอิกและกรดอะซิติก ที่สัดส่วนระหว่างกรดอะซิติกต่อกรด โอลีอิก (3:1) เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที	89
ข.4 HPLC โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง กลีเซอรอลกับกรดโอลีอิกและกรดอะซิติก ที่สัดส่วนระหว่างกรดอะซิติกต่อกรด โอลีอิก (5:1) เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที	90
ข.5 HPLC โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่าง กลีเซอรอลกับกรดโอลีอิกและกรดอะซิติก ที่สัดส่วนระหว่างกรดอะซิติกต่อกรด โอลีอิก (5:1) เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที	91

รูป (ต่อ)

หน้า

ข.6	HPLC โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรดโอลีนิกและกรดอะซิติก ที่สัดส่วนระหว่างกรดอะซิติกต่อกรดโอลีนิก (5:1) เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที	92
ข.7	HPLC โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรดโอลีนิกและกรดอะซิติก ที่สัดส่วนระหว่างกรดอะซิติกต่อกรดโอลีนิก (7:1) เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที	93
ข.8	HPLC โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรดโอลีนิกและกรดอะซิติก ที่สัดส่วนระหว่างกรดอะซิติกต่อกรดโอลีนิก (7:1) เวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที	94
ข.9	HPLC โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างกลีเซอรอลกับกรดโอลีนิกและกรดอะซิติก ที่สัดส่วนระหว่างกรดอะซิติกต่อกรดโอลีนิก (7:1) เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที	95
ค.1	สเปกตรัม FTIR ของกรดโอลีนิกอิมพอกซีไดซ์ที่สังเคราะห์ที่เวลา 1 ชั่วโมง	97
ค.2	สเปกตรัม FTIR ของกรดโอลีนิกอิมพอกซีไดซ์ที่สังเคราะห์ที่เวลา 2 ชั่วโมง	98
ค.3	สเปกตรัม FTIR ของกรดโอลีนิกอิมพอกซีไดซ์ที่สังเคราะห์ที่เวลา 3 ชั่วโมง	99
ค.4	สเปกตรัม FTIR ของกรดโอลีนิกอิมพอกซีไดซ์ที่สังเคราะห์ที่เวลา 4 ชั่วโมง	100
ค.5	สเปกตรัม FTIR ของอิมพอกซีไดซ์อะซิติกเลทโอลีนิก	101
ค.6	สเปกตรัม FTIR ของอะซิติกเลทอิมพอกซีไดซ์กรดโอลีนิก	102

รายการสัญลักษณ์

EAO	=	อีพอกซีไดซ์อะซิติกเลทโอสีเอท
ESO	=	น้ำมันถั่วเหลืองอีพอกซีไดซ์
PVC	=	พอลิไวนิลคลอไรด์
Tg	=	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว