

การเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ย่อยสลายทางชีวภาพ  
โดยใช้เจลาตินเป็นตัวเติม



นัชชาพร ประภารัตน์

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0398-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF BIODEGRADABLE LINEAR LOW DENSITY POLYETHYLENE FILMS  
USING GELATIN AS A FILLER



Miss Nutchaporn Praparat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic year 2001

ISBN 974-03-0398-6

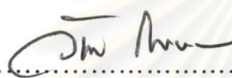
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ย่อยสลาย  
ทางชีวภาพโดยใช้เจลาตินเป็นตัวเติม

โดย นางสาว นัชชาพร ประภารัตน์


สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ

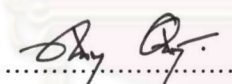
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. ดวงดาว อาจองค์


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต


.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจิตร)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ เสาวรณ ชัยจุลจิตร์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร. ดวงดาว อาจองค์)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ อรุษา สุวารีย์)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์)

นางสาวนัชชาพร ประภารัตน์ : การเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ย่อยสลายทางชีวภาพโดยใช้เจลาตินเป็นตัวเติม. (PREPARATION OF BIODEGRADABLE LINEAR LOW DENSITY POLYETHYLENE FILMS USING GELATIN AS A FILLER) อ.ที่ปรึกษา : อ.ดร. ดวงดาว อาจองค์, 164 หน้า. ISBN 974-03-0398-6.

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มที่สามารถสลายตัวทางชีวภาพชนิดใหม่จากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นและเจลาติน โดยมีพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เป็นสารช่วยผสม ที่ปริมาณ 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเจลาติน จากการวิเคราะห์ทางความร้อนของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมเจลาตินที่เตรียมได้ด้วยเครื่อง DSC และ TGA พบว่าฟิล์มพลาสติกดังกล่าวมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น และเมื่อทดสอบความทนแรงดึงด้วยเครื่อง universal testing machine พบว่าฟิล์มพลาสติกผสมเจลาตินมีความทนแรงดึงและความสามารถในการยืดดึงลดลงอย่างมากเมื่อปริมาณเจลาตินสูงขึ้น แต่เมื่อเติมสารช่วยผสมลงไป สมบัติความทนแรงดึงของฟิล์มพลาสติกลดลงเล็กน้อย หรือกล่าวได้ว่าความทนแรงดึงของฟิล์มที่มีสารช่วยผสมมีค่าสูงกว่าฟิล์มที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสมนั่นเอง

จากการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการใช้ activated sludge และเอนไซม์ พบว่า สมบัติทางกายภาพและสมบัติความทนแรงดึงของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นที่ผสมเจลาตินลดลง ซึ่งสังเกตได้จากน้ำหนักฟิล์มที่ลดลง นอกจากนี้เมื่อตรวจสอบสภาพและลักษณะพื้นผิวภายนอกของฟิล์มด้วย SEM พบว่ามีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปในฟิล์ม ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สมบัติความทนแรงดึงของฟิล์มลดลง โดยพบว่าเมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มมากขึ้น สมบัติต่างๆเหล่านี้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่มีสารช่วยผสมและฟิล์มที่ไม่มีสารช่วยผสมพบว่าฟิล์มที่มี PE-g-MA เป็นสารช่วยผสมมีแนวโน้มที่จะต้านทานหรือสามารถทนทานต่อการสลายตัวทางชีวภาพ กล่าวโดยสรุปฟิล์มพอลิเอทิลีนผสมเจลาติน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีลักษณะทางกายภาพและสมบัติความทนแรงดึงอยู่ในเกณฑ์ดี และยังสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพที่น่าพอใจอีกด้วย

ภาควิชาวัสดุศาสตร์

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์ฯ

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อ..... ทัฬหยา ประภารัตน์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

## 4272314223 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORD: GELATIN/ BIODEGRADATION/ LLDPE

NUTCHAPORN PRAPARAT : PREPARATION OF BIODEGRADABLE LINEAR  
LOW DENSITY POLYETHYLENE FILMS USING GELATIN AS A FILLER.

THESIS ADVISOR : Dr. DUANGDAO AHT-ONG, 164 pp. ISBN 974-03-0398-6

In this research, novel biodegradable films were prepared from linear low density polyethylene (LLDPE) and gelatin using PE-g-MA as a compatibilizer at three different amounts : 5,10, and 15 % by weight of gelatin. Thermal properties of gelatin/LLDPE films were characterized by differential scanning calorimeter (DSC) and thermogravimetric analyzer (TGA) . From the TGA thermograms, the results showed that thermal stability of the LLDPE films increased with the addition of gelatin. In addition, it was clear that both tensile strength and elongation at break of the gelatin/LLDPE films decreased when the amount of gelatin increased. It was observed, however, that as the amount of compatibilizer increased, the aforementioned tensile properties of the gelatin/LLDPE films only slightly decreased. In other words, the tensile properties of the compatibilized gelatin/LLDPE films were greater than those uncompatibilized films.

The biodegradation of gelatin/LLDPE films was investigated by activated sludge and enzymatic degradation methods. It was found that the physical properties and tensile properties of the gelatin/LLDPE films deteriorated upon degradation, as evidenced by the increasing in weight loss of the blend films. Besides, an investigation of surface morphology by SEM revealed many microscopic holes randomly scattering in the film, resulting in the decrease in tensile properties. These properties dramatically decreased with increasing the amount of gelatin. Comparing between the compatibilized and uncompatibilized blend films, films containing PE-g-MA as a compatibilizer had the tendency to resist the biodegradation. In conclusion, the LLDPE film containing 10% gelatin showed desirable physical appearance, good tensile properties, and high capability to biodegradation.

Department Materials Science

Student's signature. *Nutchaporn Praparatt*

Field of study Applied Polymer Science and Textile Technology

Advisor's signature. *Duangdao Aht-ong*

Academic year 2001

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์นั้นเป็นเพราะได้รับคำแนะนำด้านวิชาการ ความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่สำหรับทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือและแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี

ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณ อ.ดร. ดวงดาว อัจจงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหาและแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

นอกจากนี้ ขอขอบพระคุณ รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ. ไพพรรณ สันติสุข รศ. อรุษา สรวารี และอ.ดร. วิมลวรรณ พิมพพันธุ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ขอขอบคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่จากสถาบันต่างๆทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคุณกัญญา บุญยืนวิทย์ บริษัทไทยนามพลาสติก จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องผสม 2 ลูกกลิ้งในการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติก และคุณพิชัย อุตมาภินันท์ กรรมการผู้จัดการ บริษัท ยูไนเต็ด เทกซ์ไทล์ มิลล์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำจากบ่อบำบัดน้ำเสียเพื่อใช้ในการย่อยสลายฟิล์มพลาสติกในงานวิจัยนี้

และขอขอบคุณบริษัท ไทยโพลีเอททีลีน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เม็ดพลาสติกที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งบริษัท โกดัก ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่ให้ความอนุเคราะห์เจลาติน และบริษัท ดูปองต์ ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่ให้ความอนุเคราะห์สารช่วยผสมพอลิเอททีลีนกราฟต์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์ ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา ขอขอบคุณเพื่อนๆ นิสิตภาควิชาวัสดุศาสตร์ และวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมีที่ให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังกายกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 วารสารปริทัศน์.....	4
2.1 พอลิพลาสติกในงานบรรจุภัณฑ์.....	4
2.1.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น.....	5
2.2 กระบวนการย่อยสลาย.....	8
2.3 พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้.....	14
2.3.1 แป้ง.....	15
2.3.2 เจลาติน.....	16
2.4 กระบวนการและความสามารถในการสลายตัว.....	21
2.5 การปรับปรุงความสามารถในการเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์ 2 ชนิด.....	24
2.6 กระบวนการผสมและขึ้นรูป.....	26
2.5.1 การผสม Blending.....	27
2.5.2 การผสม Compounding.....	28
3 การทดลอง.....	30
3.1 ขอบเขตการทดลอง.....	30
3.2 การเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นผสมเจลาติน.....	32

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.2.1 การเตรียมเจลาติน.....	32
3.2.2 การผสมและขึ้นรูปฟิล์มพลาสติก.....	33
3.3 การเตรียมฟิล์มพลาสติกระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เชิงเส้นกับเจลาตินที่ผ่านการดัดแปรทางเคมีโดยใช้เอสเทอร์ของ กรดไขมัน .....	33
3.3.1 การสังเคราะห์ N-Hydroxysuccinimide Ester ของกรดลอริก.....	34
3.3.2 การดัดแปรทางเคมีของเจลาตินด้วยเอสเทอร์ของกรดลอริก .....	35
3.3.3 การขึ้นรูปฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาตินที่ผ่านการดัดแปร ทางเคมีด้วยเอสเทอร์ของกรดลอริก .....	36
3.4 การวิเคราะห์สมบัติของเจลาติน .....	37
3.4.1 การวิเคราะห์สมบัติของเจลาตินภายหลังการอบ .....	38
3.4.1.1 การตรวจสอบลักษณะ รูปร่าง และขนาดอนุภาคของ เจลาตินด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	37
3.4.1.2 การทดสอบหาความหนาแน่น.....	38
3.4.1.3 การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR.....	39
3.4.1.4 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของเจลาติน.....	39
3.4.1.4.1 การตรวจสอบด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก แอนาไลเซอร์.....	39
3.4.1.4.2 การตรวจสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง คาลอริมิเตอร์.....	40
3.4.2 การวิเคราะห์สมบัติของเจลาตินที่ผ่านการดัดแปรทางเคมี ด้วยเอสเทอร์ของกรดไขมัน.....	40
3.4.2.1 การตรวจสอบด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์... ..	40
3.4.2.2 การตรวจสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง คาลอริมิเตอร์.....	40



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.5 การตรวจสอบและวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาติน ...	40
3.5.1 การตรวจสอบความสามารถในการเข้ากันได้ของ LLDPE และเจลาตินด้วย SEM .....	41
3.5.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน.....	41
3.5.2.1 การตรวจสอบด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์.	41
3.5.2.2 การตรวจสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง คาลอริมิเตอร์ .....	41
3.5.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพลาสติก .....	42
3.6 การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาติน.....	42
3.6.1 การย่อยสลายด้วยวิธีการใช้น้ำจากบ่อบำบัดน้ำเสีย ระบบตะกอนเร่ง.....	42
3.6.2 การย่อยสลายด้วยวิธีการใช้เอนไซม์ .....	43
3.7 การตรวจสอบความสามารถในการย่อยสลายด้วยวิธี การใช้ activated sludge และวิธีการใช้เอนไซม์ .....	44
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล .....	46
4.1 สมบัติของเจลาติน .....	46
4.1.1 สมบัติทางกายภาพของเจลาติน .....	46
4.1.2 โครงสร้างทางเคมีของเจลาติน.....	48
4.1.3 สมบัติทางความร้อนของเจลาติน.....	50
4.1.3.1 Thermogravimetric Analysis .....	50
4.1.3.2 Differential Scanning Calorimeter.....	51
4.2 สมบัติของเจลาตินที่ผ่านการดัดแปรทางเคมีด้วยเอสเทอร์ของกรดลอริก.....	52
4.2.1 โครงสร้างของเอสเทอร์ของกรดลอริก.....	52
4.2.2 สมบัติทางความร้อน .....	53
4.2.2.1 Thermogravimetric Analysis .....	53
4.2.2.2 Differential Scanning Calorimeter.....	54

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.3 สมบัติของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาติน .....	56
4.3.1 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มพลาสติกด้วย SEM .....	56
4.3.2 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาติน .....	62
4.3.2.1 Thermogravimetric Analysis .....	62
4.3.2.2 Differential Scanning Calorimeter.....	67
4.3.3 ผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง .....	72
4.4 ผลการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาติน .....	79
4.4.1 ความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพลาสติก โดยวิธีการใช้ activated sludge .....	79
4.4.1.1 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม .....	80
4.4.1.2 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสียไปของฟิล์มพลาสติก .....	86
4.4.1.3 สมบัติความทนต่อแรงดึง .....	90
4.4.2 ความสามารถในการย่อยสลายของฟิล์มพลาสติก โดยวิธีการใช้เอนไซม์ .....	97
4.4.2.1 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม .....	97
4.4.2.2 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่สูญเสียไปของฟิล์มพลาสติก .....	103
4.4.2.3 สมบัติความทนต่อแรงดึง .....	107
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	113
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	113
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	116
รายการอ้างอิง.....	117
ภาคผนวก.....	120
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	164

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความหนาแน่นของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ.....	7
ตารางที่ 2.2 สมบัติของ LLDPE เปรียบเทียบกับ LDPE.....	7
ตารางที่ 2.3 พลังงานที่ใช้สลายพันธะต่างๆ.....	9
ตารางที่ 2.4 ความไวต่อแสงของพอลิเมอร์แต่ละชนิด.....	12
ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการสลายตัวและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%)ของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาตินที่ปริมาณต่างๆกัน.....	63
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัวและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%)ของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาติน 10%โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกัน.....	66
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ของฟิล์มพลาสติก LLDPE ที่ปริมาณเจลาตินต่างๆกัน.....	69
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาติน 10% โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกัน.....	70

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ปริมาณการใช้พลาสติกในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ของประเทศไทย ตั้งแต่ปี 2541-2543.....	4
รูปที่ 2.2	โครงสร้างจำลองแสดงกิ่งก้านสาขาของพอลิเอทิลีนต่างๆ A. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) B. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) C. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE).....	6
รูปที่ 2.3	การขาดของพันธะในโครงสร้างหลักของโมเลกุลขนาดใหญ่.....	8
รูปที่ 2.4	กลไกการสลายตัวโดยใช้แสง .....	13
รูปที่ 2.5	โครงสร้างทางเคมีของแป้ง.....	15
รูปที่ 2.6	โครงสร้างของพันธะเปปไทด์.....	17
รูปที่ 2.7	โครงสร้างของกรดอะมิโน.....	17
รูปที่ 2.8	ขั้นตอนการย่อยสลาย .....	22
รูปที่ 2.9	หม้ออบผสม .....	27
รูปที่ 2.10	เครื่องผสม 2 ลูกกลิ้ง .....	28
รูปที่ 3.1	แผนภาพขอบเขตการทดลอง .....	31
รูปที่ 4.1	ภาพเปรียบเทียบระหว่างเจลาตินก่อนบดและหลังบด.....	47
รูปที่ 4.2	ภาพถ่ายด้วย SEM ของเจลาตินที่ผ่านการบดแล้ว ที่กำลังขยาย 100 และ 600 เท่า .....	47
รูปที่ 4.3	ไดอะแกรมแสดงโครงสร้างทางเคมีของเจลาตินด้วย FTIR .....	48
รูปที่ 4.4	โครงสร้างของกรดอะมิโน 18 ชนิด.....	47
รูปที่ 4.5	ไดอะแกรมแสดงผลการตรวจสอบเจลาตินด้วยเทคนิค TGA .....	50
รูปที่ 4.6	ไดอะแกรมแสดงผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC.....	51
รูปที่ 4.7	โครงสร้างทางเคมีของ N-Hydroxysuccinimide Ester of Lactic Acid .....	53
รูปที่ 4.8	ไดอะแกรมแสดงผลการวิเคราะห์ N-Hydroxysuccinimide Ester of Lactic Acid ด้วยเทคนิค FT-IR .....	53
รูปที่ 4.9	ไดอะแกรมแสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเจลาตินที่ผ่าน การดัดแปรทางเคมี ด้วยเทคนิค TGA .....	54

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 ไดอะแกรมแสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเจลาตินที่ผ่านการตัดแปรทางเคมีด้วย เทคนิค DSC .....	55
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายด้วย SEM ของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาตินที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสม (ก) 0% เจลาติน (ข) 5% เจลาติน (ค) 10% เจลาติน (ง) 15% เจลาติน (จ) 20% เจลาติน .....	58
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาตินที่ปริมาณ 5% และ 20% โดยน้ำหนัก .....	59
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายด้วย SEM ของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาตินที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ที่เติมสารช่วยผสมปริมาณต่างๆกัน (ก) 0% PE-g-MA (ข) 5% PE-g-MA (ค) 10% PE-g-MA (ง) 15% PE-g-MA.....	61
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์มพลาสติกผสมเจลาติน 10% โดยน้ำหนักที่เติมสารช่วยผสม PE-g-MA 15%โดยน้ำหนักของเจลาติน.....	61
รูปที่ 4.15 ปฏิกริยาระหว่างพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์กับเจลาติน .....	62
รูปที่ 4.16 ไดอะแกรมแสดงผลการตรวจสอบอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มพลาสติกด้วยเทคนิค TGA ที่ปริมาณเจลาตินต่างๆกัน .....	63
รูปที่ 4.17 ไดอะแกรมแสดงผลการตรวจสอบอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มพลาสติกด้วยเทคนิค TGA ที่ปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกัน .....	65
รูปที่ 4.18 ไดอะแกรมแสดงอุณหภูมิการหลอมเหลวของฟิล์มพลาสติกที่ปริมาณเจลาตินต่างๆกัน .....	68
รูปที่ 4.19 ไดอะแกรมแสดงอุณหภูมิการเกิดผลึกของฟิล์มพลาสติกผสมเจลาตินที่ปริมาณต่างๆกัน .....	68
รูปที่ 4.20 อุณหภูมิการหลอมเหลวของฟิล์มพลาสติกผสมเจลาติน 10% โดยน้ำหนักที่ปริมาณสารช่วยผสมต่างๆ กัน 5 10 และ 15% โดยน้ำหนักของเจลาติน .....	69
รูปที่ 4.21 อุณหภูมิการเกิดผลึกของฟิล์มพลาสติกผสมเจลาติน 10% โดยน้ำหนักที่ปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกัน 5 10 และ 15% โดยน้ำหนักของเจลาติน .....	70
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของฟิล์มพลาสติกที่ปริมาณเจลาตินต่างๆกัน (ก) 0% (ข) 5% (ค) 10% (ง) 20%.....	73
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงผลของปริมาณของเจลาตินที่มีต่อค่าความทนแรงดึง .....	75

## สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงผลของปริมาณของเจลาตินที่มีต่อความสามารถในการยึดติด.....	75
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงผลของปริมาณของเจลาตินที่มีต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่น.....	76
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงผลของปริมาณสารช่วยผสมที่มีต่อค่าความทนแรงดึง.....	77
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงผลของปริมาณสารช่วยผสมที่มีต่อค่าความสามารถในการยึดติด.....	77
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสามารถในการยึดติดของสารช่วยผสมชนิดต่างๆ.....	78
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงผลของปริมาณสารช่วยผสมที่มีต่อค่ามอดูลัสยืดหยุ่น.....	78
รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายฟิล์มพลาสติกที่ปริมาณเจลาตินต่างๆกันภายหลังการย่อยสลาย ด้วยวิธีการใช้ activated sludge เป็นเวลา 4 สัปดาห์.....	80
รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายด้วย SEM ของฟิล์มพลาสติกผสมเจลาติน 10% ภายหลังการย่อย สลายด้วยวิธีการใช้ activated sludge เป็นระยะเวลา (ก) 5%เจลาติน (ข) 10% เจลาติน (ค) 20% เจลาติน.....	82
รูปที่ 4.32 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มพลาสติกผสมเจลาติน 10% ที่มีปริมาณสารช่วยผสม ต่างๆกัน ภายหลังการย่อยสลายด้วยวิธี Activated Sludge เป็นเวลา 4 สัปดาห์ (ก) 5% PE-g-MA (ข) 10% PE-g-MA (ค) 15% PE-g-MA.....	83
รูปที่ 4.33 ภาพถ่ายด้วย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มพลาสติกผสมเจลาติน ภายหลังการย่อยสลายด้วยวิธีการใช้ activated sludge ที่ระยะเวลาต่างๆกัน (ก) 0 สัปดาห์ (ข) 2 สัปดาห์ (ค) 4 สัปดาห์.....	85
รูปที่ 4.34 เปอร์เซ็นน้ำหนักที่สูญเสียไปของฟิล์มพลาสติกภายหลังการย่อยสลาย ด้วยวิธีการใช้ activated sludge ที่ปริมาณเจลาตินและระยะเวลาต่างๆกัน.....	87
รูปที่ 4.35 ไดอะแกรมแสดงผลของปริมาณสารช่วยผสมที่มีต่อน้ำหนักที่สูญเสียไป ของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาติน .....	88
รูปที่ 4.36 ไดอะแกรมแสดงผลของระยะเวลาที่มีต่อน้ำหนักที่สูญเสียไป (%) ภายหลังการย่อยสลายด้วยวิธีการใช้ activated sludge .....	89
รูปที่ 4.37 ไดอะแกรมแสดงอิทธิพลของปริมาณเจลาตินที่มีต่อค่าความทนแรงดึง ของฟิล์มพลาสติกผสมเจลาตินภายหลังการย่อยสลายด้วยวิธี activated sludge .....	91
รูปที่ 4.38 ไดอะแกรมแสดงค่าความสามารถในการยึดติดที่จุดขาดของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาตินภายหลังการย่อยสลายด้วยวิธี activated sludge.....	92

## สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.39	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของฟิล์มพลาสติกผสมเจลาตินปริมาณต่างๆกัน ภายหลังจากย่อยสลายด้วยวิธี activated sludge (ก) 5% เจลาติน (ข) 20% เจลาติน .....	92
รูปที่ 4.40	ไดอะแกรมแสดงค่ามอดุลัสของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาตินปริมาณต่างๆกันภายหลังจากย่อยสลายด้วยวิธี activated sludge .....	93
รูปที่ 4.41	ไดอะแกรมแสดงผลของปริมาณสารช่วยผสมที่มีต่อค่าความทนแรงดึงของฟิล์มพลาสติกภายหลังจากย่อยด้วยวิธี activated sludge.....	95
รูปที่ 4.42	ไดอะแกรมแสดงผลของปริมาณสารช่วยผสมที่มีต่อความสามารถในการยึดติดที่จุดขาดของฟิล์มพลาสติกภายหลังจากย่อยด้วยวิธี activated sludge .....	95
รูปที่ 4.43	ไดอะแกรมแสดงผลของปริมาณสารช่วยผสมที่มีต่อค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของฟิล์มพลาสติกภายหลังจากย่อยด้วยวิธี activated sludge.....	96
รูปที่ 4.44	ภาพถ่ายฟิล์มพลาสติกภายหลังจากการย่อยสลายด้วยวิธีการใช้เอนไซม์ที่ระยะเวลาต่างๆกัน 0 ถึง 6 ชั่วโมง เรียงลำดับจากซ้ายไปขวา .....	98
รูปที่ 4.45	ภาพถ่ายด้วย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มพลาสติกผสมเจลาตินที่ปริมาณต่างๆภายหลังจากย่อยสลายด้วยวิธีการใช้เอนไซม์เป็นเวลา 6 ชม. (ก) 5% เจลาติน (ข) 10% เจลาติน (ค) 20% เจลาติน .....	99
รูปที่ 4.46	ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มพลาสติกผสมเจลาติน 10% ที่เติมปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกัน (ก) 0% PE-g-MA (ข) 5% PE-g-MA (ค) 10% PE-g-MA (ง) 15% PE-g-MA .....	101
รูปที่ 4.47	ภาพถ่าย SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาติน 10% โดนน้ำหนัก ที่ผ่านการย่อยสลายด้วยวิธีการใช้เอนไซม์ที่ระยะเวลาต่างๆกัน (ก) 0 ชม. (ข) 2 ชม. (ค) 4 ชม. (ง) 6 ชม. ....	102
รูปที่ 4.48	ไดอะแกรมแสดงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียไปภายหลังจากย่อยด้วยวิธีการใช้เอนไซม์ของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาตินปริมาณต่างๆกัน.....	104
รูปที่ 4.49	ไดอะแกรมแสดงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสียไปภายหลังจากย่อยด้วยวิธีการใช้เอนไซม์ของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาติน ที่ปริมาณสารช่วยผสมต่างๆกัน.....	105

## สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.50	ไดอะแกรมแสดงผลของระยะเวลาในการย่อยสลายด้วยวิธีการใช้เอนไซม์ ของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาติน ที่ปริมาณต่างๆกัน .....	106
รูปที่ 4.51	ไดอะแกรมแสดงผลของปริมาณเจลาตินที่มีต่อค่าความทนแรงดึงของฟิล์ม พลาสติก LLDPE ผสมเจลาตินภายหลังการย่อยสลายด้วยวิธีการใช้เอนไซม์..	108
รูปที่ 4.52	ไดอะแกรมแสดงความสามารถในการยึดดึงที่จุดขาดของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาตินที่ปริมาณต่างๆกัน ภายหลังการย่อยสลายด้วย วิธีการใช้เอนไซม์ .....	109
รูปที่ 4.53	ไดอะแกรมแสดงค่ามอดูลัสของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาตินที่ปริมาณ ต่างๆกันภายหลังการย่อยสลายด้วยวิธีการใช้เอนไซม์ .....	109
รูปที่ 4.54	ไดอะแกรมแสดงผลของปริมาณสารช่วยผสมที่มีต่อค่าความทนแรงดึง ของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาติน 10% โดยน้ำหนัก ภายหลังการย่อยสลายด้วยวิธีการใช้เอนไซม์.....	111
รูปที่ 4.55	ไดอะแกรมแสดงผลของปริมาณสารช่วยผสมที่มีต่อความสามารถในการ ยึดดึงที่จุดขาดของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาติน 10% โดยน้ำหนัก ภายหลังการย่อยสลายด้วยวิธีการใช้เอนไซม์.....	111
รูปที่ 4.56	ไดอะแกรมแสดงผลของปริมาณสารช่วยผสมที่มีต่อค่ามอดูลัสยืดหยุ่น ของฟิล์มพลาสติก LLDPE ผสมเจลาติน 10% โดยน้ำหนัก ภายหลังการย่อยสลายด้วยวิธีการใช้เอนไซม์.....	112

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย