

การเตรียมและการทดสอบคุณสมบัติของฟิล์มผสมระหว่าง  
พอลิ(แอล-แลคไทด์)/พอลิ(บิวทิลีน อดิเพท-โค-เทอเรฟทาเลท)  
โดยวิธีหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย

วรปรัชญ์ ชัยคำ

กมลวรรณ ทองชนะเศรษฐ์

การศึกษาอิสระ เสนอเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

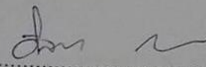
สาขาวิชาเคมี

มกราคม 2561

มหาวิทยาลัยพะเยา

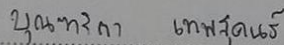
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

คณะกรรมการสอบการศึกษาอิสระ อาจารย์ที่ปรึกษา และคณบดี คณะ  
วิทยาศาสตร์ได้พิจารณาการศึกษาเรื่อง “การเตรียมและการทดสอบคุณสมบัติของ  
ฟิล์มผสมระหว่างพอลิ(แอล-แลคไทด์)/พอลิ(บิวทิลีน อดิเพท-โค-เทอเรพทาเลท)  
โดยวิธีหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย” เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี ของมหาวิทยาลัยพะเยา



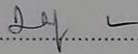
(ดร.วิไลวรรณ ภาคทอง)

ประธานกรรมการ



(ดร.บุณทริกา เทพสุคนธ์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา



(ดร.บัลวี ยศน้อย)

กรรมการ



(รองศาสตราจารย์ปรียานันท์ แสนโชนัน)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

มกราคม 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยพะเยา

## กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ดร.บุญพริกา เทพสุคนธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำในการค้นคว้าหาความรู้ ขั้นตอนในการทำการทดลอง และการสนับสนุนงบประมาณในการศึกษาครั้งนี้ รวมไปถึงเป็นผู้ตรวจสอบ ชี้แนะ และแก้ไขข้อบกพร่องตลอดระยะเวลาการดำเนินการศึกษา ส่งผลให้การศึกษาคณะผู้ศึกษาสำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร.วิไลวรรณ ภาคทอง และดร.บัลวี ยศน้อย ที่ได้สละเวลามาเป็นกรรมการสำหรับการสอบในครั้งนี้ ตลอดจนให้ความรู้ ข้อเสนอแนะ และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ในทุกรายวิชาที่ได้มาปรับใช้กับการศึกษาอิสระครั้งนี้ และขอขอบคุณสำหรับคำปรึกษาในระหว่างการศึกษาเพื่อผลการศึกษาที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสาขาเคมี และสาขาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ทุกท่านที่คอยอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยรายวิชาการศึกษาอิสระ ในด้านอุปกรณ์ เครื่องมือ สารเคมี ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ในระหว่างการเรียน ส่งผลให้การศึกษาคณะผู้ศึกษาสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวเป็นอย่างสูงที่คอยให้กำลังใจที่ดีเสมอมา ตลอดจนสนับสนุนในด้านการศึกษามาเป็นอย่างดี อีกทั้งยังให้ความรัก ความเข้าใจและความปรารถนาดีมาโดยตลอด

วรปรัชญ์ ชัยคำ

กมลวรรณ ทองชนะเศรษฐ์

<b>ชื่อเรื่อง</b>	การเตรียมและการทดสอบคุณสมบัติของฟิล์มผสมระหว่างพอลิ (แอล-แลคไทด์)/พอลิ(บิวทิลีน อดิเพท-โค-เทอแรพทาเลท) โดยวิธี หล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย
<b>ผู้ศึกษาค้นคว้า</b>	นายวรปรัชญ์ ชัยคำ นางสาวกมลวรรณ ทองชนะเศรษฐ์
<b>ที่ปรึกษา</b>	ดร.บุญทริกา เทพสุคนธ์
<b>วิทยาศาสตร์บัณฑิต</b>	สาขาวิชาเคมี
<b>คำสำคัญ</b>	ฟิล์มผสม, พลาสติไซเซอร์, พอลิ(แอล-แลคไทด์), พอลิ(บิวทิลีน อดิเพท-โค-เทอแรพทาเลท), หล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย

### บทคัดย่อ

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ เตรียมจากพอลิ(แอล-แลคไทด์) ผสมกับพอลิ(บิวทิลีน อดิเพท-โค-เทอแรพทาเลท) โดยวิธีการหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย ทำการศึกษาผลของสัดส่วนของพอลิเมอร์ น้ำหนักโมเลกุลและปริมาณของพลาสติไซเซอร์ต่อ ฟิล์มผสม พลาสติไซเซอร์ที่ใช้ คือ พอลิ(เอสเทอร์ อดิเพท) (พาราเพล็กซ์จี40) และพอลิ(เอทิลีน ไกลคอล) น้ำหนักโมเลกุล 1500, 8000 และ 20000 ความเข้มข้น 1, 2, 3, 4 และ 5 phr จาก ผลการศึกษาพบว่าพลาสติไซเซอร์ทั้งสองชนิดที่เติมลงไปไม่พ่นตะกาศเคมีต่อพอลิเมอร์ ความ โปร่งแสงของฟิล์มผสมลดลง เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นพลาสติไซเซอร์เพิ่มขึ้น และ ฟิล์มผสมทุกอัตราส่วนสามารถป้องกันรังสียูวี ได้ นอกจากนี้ฟิล์มผสมยังมีค่าความต้านทาน ต่อแรงดึงลดลง และมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นพลาสติไซ เซอร์เพิ่มขึ้น ฟิล์มผสม PLL/PBAT/ParaplexG40 ความเข้มข้น 1 phr ให้ค่าร้อยละการยืด ณ จุด ขาด สูงถึง  $191.90 \pm 30.50\%$  และมีคุณสมบัติการป้องกันรังสียูวี ได้ดีซึ่งเหมาะสมในการนำไป ประยุกต์ใช้เป็นถุงบรรจุภัณฑ์

<b>Title</b>	Preparation and properties testing of poly(L-lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend films by solvent casting method
<b>Author</b>	Mr. Woraprat Chaikham Miss Kamonwan Thongthanaset
<b>Advisor</b>	Dr. Boontharika Thapsukhon
<b>Bachelor of science</b>	Program in Chemistry
<b>Keywords</b>	Blend film, Plasticizer, Poly(L-lactide), Poly(butylene adipate-co-terephthalate), Solvent casting

### Abstract

Biodegradable packaging films can be prepared from poly(L-lactide) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) by a solvent casting method. The effects of polymer composition, molecular weight and concentration of plasticizers on blend films were studied. Poly(ester adipate) (ParaplexG40) and poly(ethylene glycol) which molecular weight 1500, 8000 and 20000 and the concentration in 1, 2, 3, 4 and 5 phr, were used as plasticizers. From the results, it can be concluded that the adding plasticizers weren't be chemical interaction with polymers. When the molecular weight and concentration of plasticizer increased in blend films cause the transparence of blend films decreased, but all of films can be absorbed UV. Moreover, the tensile strength and elasticity of blend films have a tendency decreased and increased respectively with increasing molecular weight and concentrations of plasticizer. PLL/PBAT/ParaplexG40 blend film in ratio 90/10/1 was presented the highest %elongation at break at  $191.90 \pm 30.50\%$  and was shown good UV barrier property that suitable for use as bag packaging.

## สารบัญ

	หน้า
หน้าอนุมัติ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
บทคัดย่อ	ค
Abstract	ง
สารบัญเรื่อง	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 สมมติฐาน	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	4
2.1.1 กลไกการย่อยสลายของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	4
2.1.2 การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้	6
2.2 พอลิ(แลคติก แอซิด) (PLA)	7
2.3 พอลิ(บิวทิลีน อดิเพท-โค-เทอแรพทาเลท) (PBAT)	10
2.4 พลาสติกไซเซออร์	13
2.4.1 หลักในการเลือกใช้พลาสติกไซเซออร์ที่เหมาะสม	14
2.5 พอลิ(เอทิลีน ไกลคอล) (PEG)	14
2.6 พอลิ(เอสเทอร์ อดิเพท) (ParaplexG40)	16
2.7 พอลิเมออร์เบลนด์	16

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	23
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	23
3.3 วัสดุดิบ	23
3.4 การเตรียมฟิล์ม	24
3.4.1 การเตรียมฟิล์มโดยไม่เติมพลาสติกไซเซออร์	24
3.4.2 การเตรียมฟิล์มโดยเติมพลาสติกไซเซออร์	25
3.5 เครื่องมือและการวิเคราะห์	25
3.5.1 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของฟิล์ม	25
3.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฟิล์ม	26
3.5.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม	27
<b>บทที่ 4 ผลงานวิจัย</b>	
4.1 ผลการผสมฟิล์มระหว่างพอลิ(แอล-แลคไทด์), พอลิ(บิวทิลีน อดิเพทโค-เทอเรพทาเลท) และพลาสติกไซเซออร์โดยวิธีการหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย	29
4.1.1 ฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์	29
4.1.2 ฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซออร์	30
4.2 เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบฟูเรียร์ทรานซ์ฟอร์ม	35
4.3 ทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงของฟิล์มผสม	46
4.3.1 ฟิล์มผสมเมื่อไม่เติมพลาสติกไซเซออร์	46
4.3.2 ฟิล์มผสมเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ PEG	49
4.3.2.1 สมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงของฟิล์มผสมเมื่อเติม PEG1500 เป็นพลาสติกไซเซออร์	49

**สารบัญ (ต่อ)**

	<b>หน้า</b>
4.3.2.2 สมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงของฟิล์มผสมเมื่อเติม PEG8000 เป็นพลาสติกไซเซออร์	53
4.3.2.3 สมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงของฟิล์มผสมเมื่อเติม PEG20000 เป็นพลาสติกไซเซออร์	55
4.3.2.4 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงเมื่อน้ำหนัก โมเลกุลของ PEG เพิ่มมากขึ้น	58
4.3.2.5 สมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงของฟิล์มผสมเมื่อ ParaplexG40 เป็นพลาสติกไซเซออร์	70
<b>บทที่ 5 สรุป</b>	
5.1 สรุปผล	74
5.2 ข้อเสนอแนะ	75
<b>บรรณานุกรม</b>	78
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก	83
ภาคผนวก ข	92
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	99



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า	
2.1	สมบัติของ PLA ที่ผลิตเพื่อการคาของ NatureWorks® PLA	9
2.2	สมบัติของ PBAT ที่ผลิตเพื่อการคา	12
2.3	เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเคมี PEG1500, PEG8000 และ PEG20000	15
2.4	สมบัติเชิงกลของ ParaplexG40	16
3.1	แสดงปริมาณของสารละลายพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนต่างๆ	24
4.1	ภาพถ่ายฟิล์มผสมที่ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์	29
4.2	ภาพถ่ายฟิล์มผสมที่เติมพลาสติกไซเซออร์ PEG1500	31
4.3	ภาพถ่ายฟิล์มผสมที่เติมพลาสติกไซเซออร์ PEG8000	32
4.4	ภาพถ่ายฟิล์มผสมที่เติมพลาสติกไซเซออร์ PEG20000	33
4.5	ภาพถ่ายฟิล์มผสมที่เติมพลาสติกไซเซออร์ ParaplexG40	34
4.6	ผลการวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL, PBAT, PEG, PLL/PBAT และ PLL/PBAT ที่เติม PEG	37
4.7	ผลการวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL, PBAT, PLL/PBAT และ PLL/PBAT ที่เติม ParaplexG40	43
4.8	สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสมที่ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์	47
4.9	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์	47
4.10	สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสมเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ PEG1500	49
4.11	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มผสมเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ PEG1500	51
4.12	สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสมเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ PEG8000	53
4.13	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซออร์ PEG8000	54
4.14	สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสมเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ PEG20000	56
4.15	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซออร์ PEG20000	57
4.16	สมบัติเชิงกลเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มมากขึ้นที่อัตราส่วน PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>	59

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
4.17	สมบัติเชิงกลเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มมากขึ้นที่อัตราส่วน PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub>	62
4.18	สมบัติเชิงกลเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มมากขึ้นที่อัตราส่วน PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub>	64
4.19	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มมากขึ้นที่อัตราส่วน PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>	66
4.20	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มมากขึ้นที่อัตราส่วน PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub>	67
4.21	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มมากขึ้นที่อัตราส่วน PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub>	69
4.22	สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสมเมื่อเติม ParaplexG40	71
4.23	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซออร์ ParaplexG40	72
ก.1	การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ในย่าน 4000–600 cm <sup>-1</sup>	86

## สารบัญรูปภาพ

ภาพ	หน้า	
2.1	กระบวนการผลิตและการย่อยสลายของ PLA	8
2.2	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์จากกรดแลคติกเป็นแลคไทด์	8
2.3	โครงสร้างไอโซเมอร์ของแลคไทด์มอนอเมอร์ชนิดต่างๆ	9
2.4	การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์จาก adipic acid และ 1,4-butanediol	11
2.5	การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ของ dimethyl terephthalate (DMT) โดยใช้ 1,4-butanediol	11
2.6	ปฏิกิริยาการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ของพอลิเอสเทอร์ของ adipic acid และ DMT โดยใช้ TBOT	12
2.7	โครงสร้างทางเคมีของ poly(ester adipate) หรือ ParaplexG40	16
4.1	อินฟราเรดสเปกตรัมของ PLL	35
4.2	อินฟราเรดสเปกตรัมของ PBAT	36
4.3	อินฟราเรดสเปกตรัมของ PEG	36
4.4	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub> เติม PEG1500 ความเข้มข้น 0-5 phr	38
4.5	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub> เติม PEG8000 ความเข้มข้น 0-5 phr	38
4.6	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub> เติม PEG20000 ความเข้มข้น 0-5 phr	39
4.7	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub> เติม PEG1500 ความเข้มข้น 0-5 phr	39
4.8	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub> เติม PEG8000 ความเข้มข้น 0-5 phr	40
4.9	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub> เติม PEG20000 ความเข้มข้น 0-5 phr	40
4.10	อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub> เติม PEG1500 ความเข้มข้น 0-5 phr	41

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub> เต็ม PEG8000 ความเข้มข้น 0-5 phr	41
4.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub> เต็ม PEG20000 ความเข้มข้น 0-5 phr	42
4.13 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม ParaplexG40	42
4.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub> เต็ม ParaplexG40 ความเข้มข้น 0-5 phr	44
4.15 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub> เต็ม ParaplexG40 ความเข้มข้น 0-5 phr	44
4.16 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub> เต็ม ParaplexG40 ความเข้มข้น 0-5 phr	45
4.17 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL, PBAT, PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub> , PEG1500, ParaplexG40, PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub> /PEG1500 และ PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub> /G40	45
4.18 เปรอ์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์ม PLL และฟิล์มผสม PLL/PBAT	48
4.19 เปรอ์เซ็นต์การส่องผ่านแสงแต่ละอัตราส่วนของฟิล์มผสม PLL/PBAT	48
4.20 เปรอ์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มผสมอัตราส่วน PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub> เมื่อเติม PEG1500	52
4.21 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง T <sub>660</sub> ของฟิล์ม PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub> , PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub> และ PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub> ที่เติมพลาสติกไซเซอ์ PEG1500 0-5 phr	52
4.22 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง T <sub>660</sub> ของฟิล์ม PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub> , PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub> และ PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub> ที่เติมพลาสติกไซเซอ์ PEG8000 0-5 phr	55
4.23 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง T <sub>660</sub> ของฟิล์ม PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub> , PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub> และ PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub> ที่เติมพลาสติกไซเซอ์ PEG20000 0-5 phr	58
4.24 เปรียบเทียบค่า tensile strength ของฟิล์มผสม PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub> ที่น้ำหนัก โมเลกุลของ PEG ต่างกัน	60

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.25 เปรียบเทียบค่า %elongation at break ของฟิล์มผสม PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub> ที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่างกัน	61
4.26 เปรียบเทียบค่า tensile strength ของฟิล์มผสม PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub> ที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่างกัน	63
4.27 เปรียบเทียบค่า %elongation at break ของฟิล์มผสม PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub> ที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่างกัน	63
4.28 เปรียบเทียบค่า tensile strength ของฟิล์มผสม PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub> ที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่างกัน	65
4.29 เปรียบเทียบค่า %elongation at break ของฟิล์มผสม PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub> ที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่างกัน	65
4.30 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง T <sub>660</sub> ของฟิล์ม PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub> ที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่างกัน	67
4.31 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง T <sub>660</sub> ของฟิล์ม PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub> ที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่างกัน	68
4.32 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง T <sub>660</sub> ของฟิล์ม PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub> ที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่างกัน	70
4.33 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง T <sub>660</sub> ของฟิล์ม PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub> , PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub> และ PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub> ที่เติม PEG และ ParaplexG40 ความเข้มข้น 1 phr	73
ก.1 เครื่อง Furrier Transform–Infrared Spectrometer (FT–IR)	84
ก.2 การทำงานของเครื่อง Fourier transform–infrared spectroscopy (FT–IR)	84
ก.3 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง Fourier transform–infrared spectroscopy (FT–IR)	85
ก.4 เครื่อง UV–Visible spectrophotometer	88
ก.5 องค์ประกอบของเครื่อง UV–Visible spectrophotometer	89
ก.6 เครื่อง Universal testing machine (UTM)	90

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
ก.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain)	91

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา [1-3]

ในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าพลาสติกที่ใช้ทั่วไปมีผลโดยรวมต่อสิ่งแวดล้อม และสิ่งมีชีวิตอย่างต่อเนื่อง เราใช้ถุงพลาสติกมากกว่า 5000 ล้านถุงในแต่ละปี การนำถุงพลาสติกไปใช้เป็นจำนวนมาก ซึ่งถุงพลาสติกไม่สามารถย่อยสลายหรือใช้เวลาในการย่อยสลายเป็นเวลานาน (ประมาณ 450-500 ปี) อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการใช้ถุงพลาสติกที่ใส่ขยะมูลฝอยจะทำให้เกิดการแปรสภาพมูลฝอยในภาวะที่ขาดออกซิเจนเป็นผลให้เกิดแก๊สชีวภาพคือ แก๊สมีเทน ซึ่งเป็นผลนำไปสู่การเกิดภาวะโลกร้อน อีกทั้งพลาสติกยังอาจปนเปื้อนสู่ห่วงโซ่อาหาร และเป็นอันตรายต่อสุขภาพ เช่น พลาสติกบางชนิดเมื่อหมดอายุการใช้งานจะถูกย่อยสลายกลายเป็นขยะชิ้นเล็กๆ ซึ่งสามารถแทรกไปในชั้นดินหรือปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ พลาสติกบางชนิดหากเกิดการเผาไหม้จะทำให้เกิดควันพิษในอากาศหรือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นต้นเหตุของการเกิดภาวะเรือนกระจก และทำให้โลกร้อนจึงมีการคิดค้นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ คือ พลาสติกชีวภาพ

การผลิตพลาสติกชีวภาพเริ่มในปี ค.ศ. 1869 โดย John Wesley Hyatt, Jr. ซึ่งจดสิทธิบัตรการผลิตอนุพันธ์ของเซลลูโลสเพื่อใช้เคลือบผิวลูกบิลเลียดที่ไม่ได้ทำจากงาช้าง แต่สารที่ได้ติดไฟง่ายจึงไม่เป็นที่นิยม John Wesley Hyatt, Jr. จึงพัฒนากระบวนการผลิตต่อไปจนได้เซลลูโลสอยด์ซึ่งใช้เป็นฟิล์มถ่ายภาพ และภาพยนตร์ที่ใช้กันจนถึงปัจจุบัน ในปี ค.ศ. 1890 มีการค้นพบ พอลิ(แลคติก แอซิด) (Poly(lactic acid), PLA) แต่ไม่ได้นำมาใช้เพราะการผลิตพลาสติกจากน้ำมันปิโตรเลียมสามารถทำได้สะดวกกว่า แต่ในช่วงปี ค.ศ. 1970 น้ำมันมีราคาสูงขึ้น การผลิตพลาสติกจากปิโตรเลียมจึงแพงขึ้นตามไปด้วย การผลิตพลาสติกจากวัตถุดิบอื่นจึงกลับมาได้รับความสนใจและพัฒนาขึ้นมาอีก ในช่วงปี ค.ศ. 1980 มีการผลิตพลาสติกจากพืชอย่างหลากหลาย แต่ในปัจจุบันพลาสติกส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรุนแรง พลาสติกชีวภาพจึงกลับมาเป็นที่สนใจอีกครั้ง [1] ซึ่งพอลิเมอร์ที่สนใจนำมาผลิตเป็นพลาสติกคือ PLA

พอลิ(แลคติก แอซิด) หรือ PLA มีลักษณะแข็งค่อนข้างเปราะ ไม่ทนความร้อน ความแข็งแรง (Melt strength) ของ PLA ขณะอยู่ในรูปของพอลิเมอร์หลอม จะมีค่าต่ำทำให้มีปัญหาในการนำไปผลิตขึ้นรูป จึงเป็นข้อจำกัดในการนำ PLA ไปใช้ในงานบางด้าน เช่น ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการการยึดตัว ดังนั้นในการใช้งานจึงนิยมเติมสารพลาสติกไซเซอร์ลงไปเพื่อ

ปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น ในกรณีที่ต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์ฟิล์ม PLA สำหรับใช้งานด้านที่ต้องสัมผัสกับอาหารจะต้องเน้นเลือกใช้สารพลาสติกไซเซอร์ที่ไม่มีความเป็นพิษ และเป็นชนิดที่ใช้กับงานที่สัมผัสกับอาหารได้ (Food grade plasticizers) เช่น พอลิบิวทีน ไดโอบอล (Polybutene diol, PBOH), ไดบิวทิล เซบาแคต (Dibutyl sebacate, DBS), พอลิ(เอทิลีน ไกลคอล) (Poly(ethylene glycol), PEG), ไดเอทิลเฮกซิล อดิเพท (Diethylhexyl adipate, DOA) เป็นต้น หรือผสม PLA กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีความเหนียว และการยึดตัวที่ดีกว่า ซึ่งพอลิเมอร์ที่สนใจจะนำมาปรับปรุงคุณสมบัติของ PLA คือ พอลิ(บิวทิลีน อดิเพท-โค-เทเรพทาเลท) (Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) [2]

พอลิ(บิวทิลีน อดิเพท-โค-เทเรพทาเลท) หรือ PBAT สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เนื่องจากมีองค์ประกอบของ butylene adipate groups เช่น การนำไปฝังดิน จุลินทรีย์ในดินจะช่วยให้การย่อยสลายยังมีคุณสมบัติเชิงกลและความคงตัวสูงจากส่วนของ terephthalate จากการทดลองสามารถย่อยสลายได้ 90% หลังระยะเวลาทดลอง 80 วันจึงนำไปประยุกต์ใช้ในการห่อหุ้มสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารที่ย่อยสลายได้ การนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตรและเป็นสารเคลือบกันน้ำสำหรับวัสดุอื่นๆ เช่น ถ้วยกระดาษจากการที่มีความยืดหยุ่นสูงและย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ PBAT ในท้องตลาดจึงถูกนำไปเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพลาสติกแข็งที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เช่น PLA เป็นต้น นอกจากนี้ PBAT ยังนำไปเป็นองค์ประกอบในฟิล์มด้านจุลินทรีย์โดยฟิล์มด้านจุลินทรีย์นี้ได้ถูกพัฒนาไปสู่บรรจุภัณฑ์อาหารเพื่อยับยั้งการเติบโตของจุลินทรีย์ช่วยเก็บรักษาอาหารให้ปลอดภัย [3]

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของการผสมกันระหว่าง PLL กับ PBAT และปริมาณที่เหมาะสมของสารเติมแต่ง (Plasticizers) PEG1500, PEG8000, PEG20000 และ ParaplexG40 ในการขึ้นรูปฟิล์ม
2. ศึกษาและทดสอบคุณสมบัติทางแสง สมบัติการป้องกันรังสียูวี ทดสอบความทนต่อแรงดึง ทดสอบความยืดหยุ่น ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปแล้ว เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นถุงบรรจุภัณฑ์



### 1.3 สมมติฐาน

PLL และ PBAT เป็นพลาสติกชีวภาพ (Biodegradable plastic) ที่สร้างด้วยวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนได้ที่ผ่านการหมักทางชีวภาพ หลังจากใช้งานจะสลายตัวได้ จึงได้ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสม และการใส่สารเติมแต่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับฟิล์ม และทดสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพื่อนำไปประยุกต์เป็นถุงบรรจุภัณฑ์ต่อไป

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ผสม PLL และ PBAT ด้วยอัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80, 10/90 และ 0/100 และเติมสารเติมแต่งด้วย PEG1500, PEG8000, PEG20000 และ ParaplexG40 ปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5 phr

2. ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด และฟิล์มผสมโดยใช้เครื่องฟูเรียร์ทรานซ์ฟอร์ม-อินฟราเรด สเปกโทรมิเตอร์ (Furrier transform-infrared spectrometer, FT-IR)

3. ศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟิล์มที่ขึ้นรูปแล้วในแต่ละอัตราส่วนโดยทดสอบความโปร่งแสงและการดูดกลืนรังสียูวีโดยใช้เครื่องยูวี-วิซิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer) และทดสอบความทนต่อแรงดึง ทดสอบความยืดหยุ่นโดยใช้เครื่องดึงเทนไซด์ (Universal testing machine, UTM)

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผสม PLL และ PBAT ได้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติความยืดหยุ่นสูง และดูดกลืนรังสียูวี

2. นำข้อมูลที่ได้ไปเป็นแนวในการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของฟิล์มกับพลาสติก-ไซเซอ์ต่อไป

3. ช่วยส่งเสริมการใช้วัสดุที่สามารถย่อยสลายได้และสามารถลดปัญหาในการกำจัดขยะที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) [4-7]

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพคือ พลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบชีวมวล (Biomass) ที่มีแหล่งกำเนิดจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ (Bio-based materials หรือ Renewable) หรือจากปิโตรเคมี (Petro-based materials หรือ Non-renewable) ที่ผ่านกระบวนการหมักทางชีวภาพ (Composting) หลังการใช้งานจะสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Degradable) เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารประกอบอินทรีย์ และมวลชีวภาพ ตัวอย่างของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นพลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน (Starch based plastics) เช่น พอลิ(แลคติก แอซิด) (Poly(lactic acid), PLA), พอลิไฮดรอกซีอัลคานอยด์ (Polyhydroxyalkanoate, PHAs), พอลิ(บิวทิลีน ซัคซิเนต) (Poly(butylene succinate), PBS), พอลิ(บิวทิลีน อดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต) (Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT)

##### 2.1.1 กลไกการย่อยสลายของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [4]

###### 1) การย่อยสลายทางแสง (Photo degradation)

การย่อยสลายทางแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติก หรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสียูวี (Ultraviolet radiation, UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะหรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มี

###### 2) การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation)

การย่อยสลายทางกลเป็นการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ

###### 3) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน ความร้อน และแสงยูวีหรือแรงทางกล เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดเป็นสารประกอบ

ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydro peroxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive)

#### 4) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis degradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์ เช่น แป้ง (Starch), พอลิเอสเทอร์ (Polyester), พอลิแอนไฮไดรด์ (Polyanhydrides), พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate), และพอลิยูรีเทน (Polyurethane) ผ่านปฏิกิริยา ก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกแบ่งออกเป็น 2 แบบคือแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิดคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น depolymerase, lipase, esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non enzyme) เช่น โลหะอัลคาไลด์ (Alkaline metal) เบสและกรดที่มีอยู่ในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้น ใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) หมู่เอสเทอร์ (Ester group) หรือหมู่เอไมด์ (Amide group) บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

#### 5) การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

การย่อยสลายทางชีวภาพเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่ และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอ จะเกิดการแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ

(Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (Biomass)

## 2.1.2 การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ [5]

### 1) การใช้งานทางการแพทย์ (Medical applications)

พลาสติกย่อยสลายได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุทางการแพทย์ เช่น ยาที่ถูกออกแบบมาให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยตัวยาวอย่างช้า ๆ ภายในร่างกายในช่วงระยะเวลาหนึ่งหรือใหม่ละลาย ที่สามารถย่อยสลายได้เองภายหลังจากการทำหน้าที่ตามที่ได้รับ การออกแบบไว้แล้วเสร็จสิ้นเช่น กลุ่มของพอลิเอสเทอร์ (Polyesters), พอลิ(เอปซีลอน-คาโพรแลคโตน) (Poly( $\epsilon$ -caprolactone), PCL), พอลิไดออกซาโนน (Polydioxanone, PDO) [6]

### 2) สารเคลือบกระดาษหรือโฟม (Primary packaging)

ปัจจุบันมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้งานเป็นสารเคลือบกระดาษสำหรับห่อขนมปังหรือถ้วยน้ำชนิดใช้แล้วทิ้ง พิล์มที่ใช้ในการเคลือบส่วนใหญ่จะใช้ฟิล์มจากคาร์โบไฮเดรต เช่น แป้ง (Starch) และฟิล์มจากโปรตีน เช่น คอลลาเจน (Collagen)

### 3) พิล์มคลุมดิน (Mulch film)

ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตรเป็นอุปกรณ์ทางการเกษตรที่สำคัญ ซึ่งแผ่นฟิล์มจะช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืชและรักษาความชื้นในดินการใช้ฟิล์มสามารถผลิตได้จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น พอลิ(บิวทิลีน ซัคซิเนต) (Poly(butylene succinate), PBS) จะช่วยลดขั้นตอนการเก็บ และกำจัดฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน

### 4) ถุงสำหรับใส่ของ (Shopping bag)

ถุงพลาสติกและฟิล์มพลาสติกสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้นในปัจจุบันส่งผลให้มีสัดส่วนขยะอยู่ในปริมาณสูง พลาสติกย่อยสลายได้จึงเป็นพลาสติกที่มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนพลาสติกทั่วไป เช่น พอลิ(แลคติก แอซิด) (Poly(lactic acid), PLA)

### 5) พิล์มและถุงสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร (Food waste film and bags)

ฟิล์มและถุงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหารเหมาะสำหรับสถานที่ที่มีระบบการกำจัดขยะอินทรีย์ด้วยวิธีการคอมโพสท์ ซึ่งเป็นวิธีที่กำลังได้รับความนิยมในต่างประเทศ เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการนำมาทำคอมโพสท์พร้อมขยะอินทรีย์อื่น ๆ ทำให้เกิดความสะดวก ไม่ต้องแยกทิ้งฟิล์มสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในปัจจุบัน เช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low-density polyethylene, LDPE) ควรมีความต้านทานแรงดึง (Tensile strength, TS) ประมาณ 8–10 MPa [7]

## 6) บรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค (Consumer packaging materials)

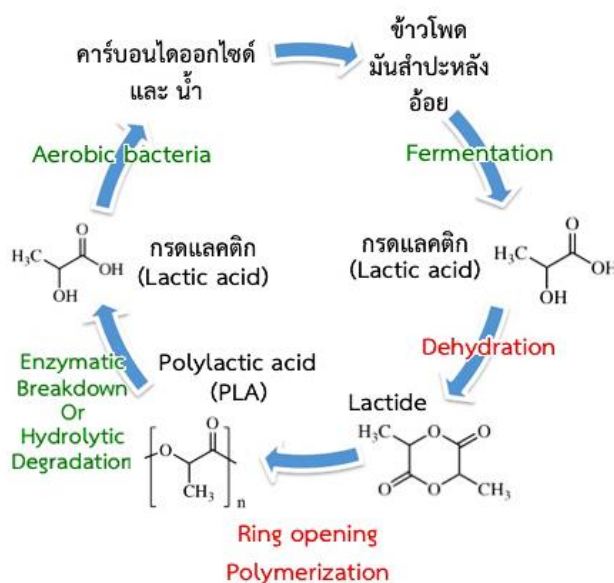
ตามปกติการใช้บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากพลาสติกทั่วไปมักไม่ได้รับความนิยมน่ากลับมารีไซเคิลมากนัก เนื่องจากมีการปนเปื้อนสูง ทำให้ไม่สะดวกต่อการเก็บและทำความสะอาด การนำพลาสติกย่อยสลายได้มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เช่น ถาดย่อยสลายได้สำหรับอาหารสำเร็จรูป และอาหารจานด่วน จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาด้านการจัดการขยะบรรจุภัณฑ์ลงได้ สำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในปัจจุบัน เช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-density polyethylene, HDPE) ควรมี TS ประมาณ 19–31 MPa [7]

## 2.2 พอลิ(แลคติก แอซิด) (Poly(lactic acid), PLA) [2, 8–11]

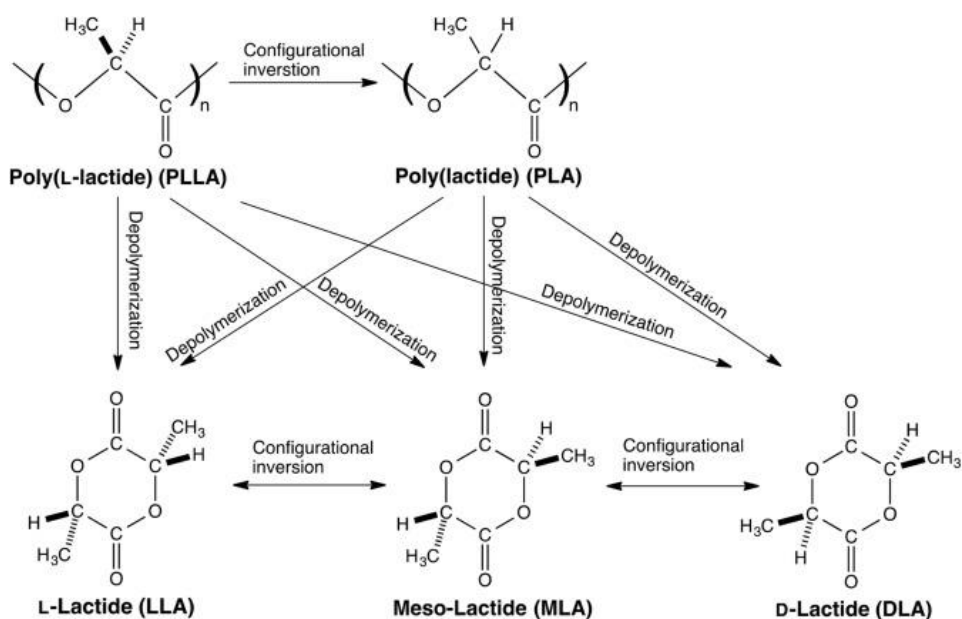
พอลิ(แลคติก แอซิด) หรือ PLA มีชื่อทางการค้า เช่น NatureWorks® PLA (ผลิตโดย NatureWork LLC) และ Biomer® (ผลิตโดย Biomer) เป็นต้น เป็นเทอร์โมพลาสติกคือ พลาสติกที่เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัว หลอมเหลว และจะแข็งตัวเมื่อเย็นลง โดยทั่วไป PLA จะมีความแข็งแต่เปราะ มีค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength, TS) และเปอร์เซ็นต์ระยะการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break, EB) ประมาณ 45.5–61.4 MPa และ 3.1–5.8% ตามลำดับ [8] ผลิตจากทรัพยากรที่สามารถทดแทนได้ และง่ายต่อการนำไปใช้เป็นพลาสติกจำพวกฟิล์มหรือไฟเบอร์ จึงนำไปใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์หรืออุตสาหกรรมเครื่องมือทางชีวภาพได้ PLA เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างทางเคมีที่ง่ายต่อการดัดแปลงหรือควบคุม สามารถสัมผัสกับอาหารได้ และได้การรับรองว่าเป็น generally recognized as safe (GRAS) สามารถย่อยสลายได้โดยการไฮโดรไลซิสของพันธะเอสเทอร์ ไม่จำเป็นต้องมีเอนไซม์เพื่อมากระตุ้นการย่อยสลาย อัตราการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับขนาดรูปร่าง อัตราส่วนไอโซเมอร์ และอุณหภูมิ

PLA เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ ที่ได้มาจากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์-ไรเซชันของกรดแลคติก ซึ่งได้จากการหมักคาร์โบไฮเดรต เช่น แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลังดังภาพที่ 2.1 การสังเคราะห์ PLA สามารถทำได้หลายวิธี เช่น สังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอะซิโตรีปิต (Azeotropic dehydration condensation) ซึ่งจะได้ PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประมาณ 100,000 กรัมต่อโมล หรือปฏิกิริยาการควบแน่นโดยตรง (Direct condensation polymerization) จะได้เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ประมาณ 1,000–5,000 กรัมต่อโมล บางครั้งเรียกว่าพรีพอลิเมอร์ น้ำหนักโมเลกุลจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของ PLA ที่สังเคราะห์ได้ เช่น สมบัติเชิงกล ความหนืด ความแข็งแรง

ขณะหลอม สมบัติด้านการไหล และคุณสมบัติในการเปลี่ยนสถานะ PLA ที่ใช้ในทางการค้าจะเป็น พอลิ(แอล-แลคติก แอซิด) (Poly(L-lactic acid), PLLA) ที่มีพอลิ(ดี,แอล-แลคติก แอซิด) (Poly(D,L-lactic acid), PDLLA) เจือปนอยู่เล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการสังเคราะห์ผ่านการเกิดแลคไทด์ (Lactide formation) หรือการสังเคราะห์โดยผ่านกลไกแบบปฏิกิริยาเปิดวงของ L-lactide และ L,D-lactide [2] ดังภาพที่ 2.1 และมีคุณสมบัติดังที่แสดงในตารางที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตและการย่อยสลายของ PLA [10]

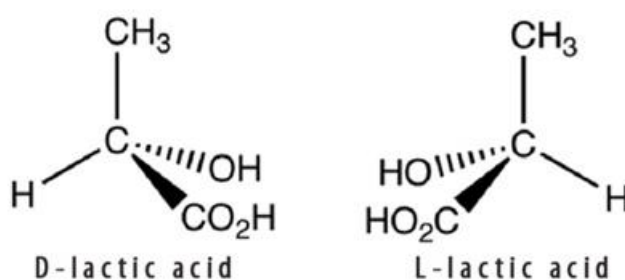


ภาพที่ 2.2 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์จากกรดแลคติกเป็นแลคไทด์ [12]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของ PLA ที่ผลิตเพื่อการคาของ NatureWorks® PLA [11]

สมบัติ	PLA
Density (g/mL)	1.24
T <sub>g</sub> (°C)	55–60
T <sub>m</sub> (°C)	155–170
Heat distortion temperature, HDT (°C)	55
Tensile strength (MPa)	62
Elongation at break (%)	3.5
Flexural Modulus (MPa)	108

กรดแลคติกมีไอโซเมอร์ 2 รูปแบบ คือ แบบดีและแบบแอล ซึ่งเป็นอแนนทิโอเมอร์ (Enantiomer) มีสูตรเคมีที่เหมือนกันแต่จัดเรียงตัวในสามมิติต่างกัน และมีการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (Optically inactive) ในทิศทางต่างกัน ดังที่แสดงในภาพที่ 2.3 ส่วนใหญ่จะพบในรูปแบบแอล-ไอโซเมอร์หรือพบในรูปแบบของการผสมระหว่างแอล และดี-ไอโซเมอร์เรียกว่าของผสมราซีมิก (Racemic mixture) ในอัตราส่วน 1:1 หรือสารประกอบมีโซ (Meso compound) ซึ่งไม่มีสมบัติบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ ปัจจุบันการกรดแลคติกผลิตมาจากพืช เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น โดยการบดพืชให้ละเอียดเป็นแป้ง แล้วใช้เอนไซม์ย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลกลูโคสผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation) โดยใช้แบคทีเรีย เนื่องจากกรดแลคติกมี 2 ไอโซเมอร์ สายโซ่หลักของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดแอล-ไอโซเมอร์เกือบทั้งหมดหรือเกิดจากมอนอเมอร์ที่ประกอบไปด้วยของผสมราซีมิก (Racemic mixture) ในปัจจุบันการผลิตดี-ไอโซเมอร์ของกรดแลคติกทำได้ยาก ดังนั้นการผลิตพอลิเมอร์ที่สายโซ่หลักจะประกอบไปด้วยมอนอเมอร์ชนิดดี หรือพอลิ(ดี-แลคติก แอซิด) (Poly(D-lactic acid), PDLA) ในเชิงพาณิชย์จึงยังไม่สามารถพบเห็นได้ [9]



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างไอโซเมอร์ของแลคไทด์มอนอเมอร์ชนิดต่างๆ [13]

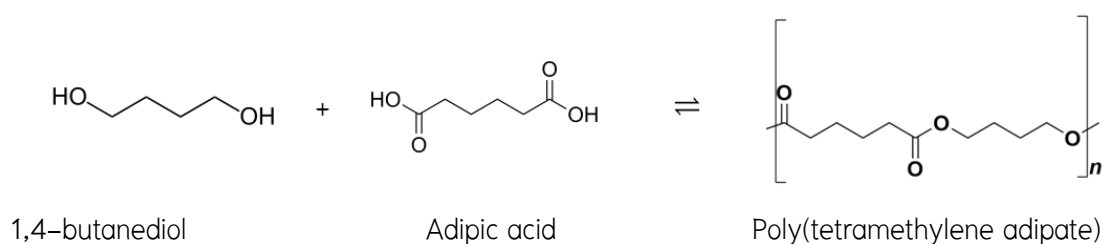
คุณสมบัติการละลายของ PLA จะขึ้นอยู่กับความยาวสายโซ่ของพอลิเมอร์ และความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) โดย PLA จะไม่ละลายน้ำ แอลกอฮอล์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีหมู่แทนที่ เช่น เฮกเซน (Hexane) และ เฮปเทน (Heptane) ดังนั้นตัวทำละลายที่ดีสำหรับ PLA คือ ตัวทำละลายในกลุ่มของคลอริเนต และฟลูออริเนต (Chlorinated or fluorinated organic solvents) PLA มีช่วงการหลอมเหลว (Melting range) 173–178 °C มีปริมาณความเป็นผลึก (Crystallinity) ประมาณ 37% และอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) อยู่ระหว่าง 60–65 °C มีสมบัติการต้านการซึมผ่านของแก๊ส และของเหลว (Barrier properties) ที่ดี เข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (Biocompatibility) คุณสมบัติพิเศษ คือ มีความใส ย่อยสลายในสภาพแวดล้อมทั่วไป เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ทั้งทางชีวภาพและกายภาพ การย่อยสลายของ PLA ส่วนใหญ่เกิดจากการขาดของสายโซ่หลักหรือสายโซ่ด้านข้างของโมเลกุลในธรรมชาติการย่อยสลายอาจเกิดจากอุณหภูมิปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) หรือทางชีวภาพ เช่น เอนไซม์หรือจุลินทรีย์ที่อยู่ในดินปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) การย่อยสลายด้วยแสง (Photolysis) และย่อยสลายด้วยตัวรังสี (Radiolysis) การขึ้นรูปสามารถทำได้ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกทั่วไป เช่น กระบวนการการอัดรีด (Extrusion) กระบวนการฉีด (Injection molding) เป็นต้น

### 2.3 พอลิ(บิวทิลีน อะดิเพต-โค-เทอเรพทาเลท) (Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) [3, 14]

พอลิ(บิวทิลีน อะดิเพต-โค-เทอเรพทาเลท) หรือ PBAT มีชื่อทางการค้า เช่น EnPol® (ผลิตโดย IRE Chemical Ltd.) และ Ecoflex® (ผลิตโดย BASF) เป็นต้น เป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ PBAT ของกรดอะดิพิค (Adipic acid), 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) และไดเมทิล เทอเรพทาเลท (Dimethyl terephthalate, DMT) PBAT สามารถละลายได้ใน ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane), คลอโรฟอร์ม (Chloroform) และเตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran, THF) นิยมนำ PBAT มาทดแทนการใช้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low-density polyethylene, LDPE) โดยพอลิเมอร์ทั้งสองมีคุณสมบัติที่คล้ายกัน รวมถึงความยืดหยุ่นและการคืนรูป จึงสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตที่เหมือนกัน เช่น ถุงพลาสติกหรือพลาสติกที่ใช้ในการห่อหุ้ม เป็นต้น โครงสร้างของพอลิเมอร์ PBAT มีลักษณะเป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ได้มาจากการสร้างพันธะเชื่อมกันระหว่างบล็อกโคพอลิเมอร์ 2 บล็อกเข้าด้วยกันแต่ยังมีโครงสร้างที่เป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มของหลายบล็อกมาเกิดพันธะกันซึ่งมีกระบวนการสังเคราะห์ ดังนี้

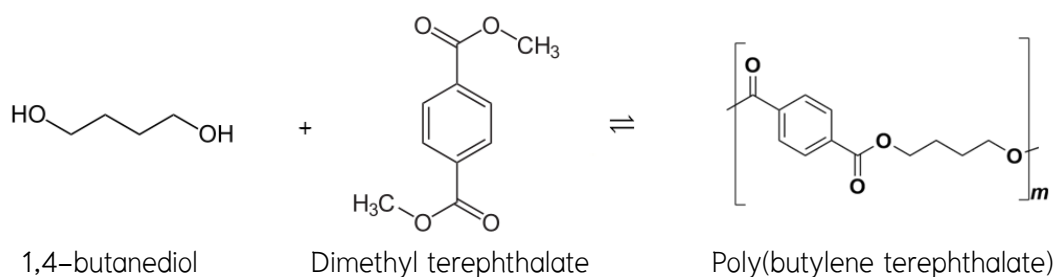


ขั้นที่ 1 เป็นการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์จาก adipic acid และ 1,4-butanediol ความยาวของสายโซ่จะทำให้สั้นลงโดยการเติม 1,4-butanediol ที่มากเกินไปลงในปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์ คือ พอลิ(เตตระเมทริลีน อะดิเพท) (Poly(tetramethylene adipate), PTMA)



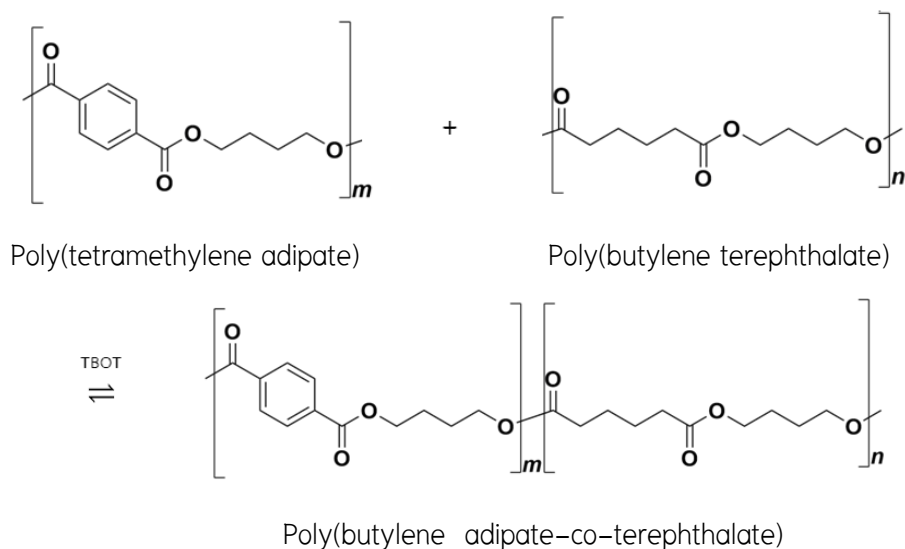
#### ภาพที่ 2.4 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์จาก adipic acid และ 1,4-butanediol [3]

ขั้นที่ 2 พอลิเอสเทอร์ของ dimethyl terephthalate (DMT) ถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยใช้ 1,4-butanediol ได้ผลิตภัณฑ์ คือ พอลิ(บิวทิลีน เทอเรพทาเลท) (Poly(butylene terephthalate), PBT)



#### ภาพที่ 2.5 การสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ของ dimethyl terephthalate (DMT) โดยใช้ 1,4-butanediol [3]

ขั้นที่ 3 tetrabutylorthotitanate (TBOT) ถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ของพอลิเอสเทอร์ของ adipic acid และ DMT เพื่อใช้ในการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ PBAT แบบสุ่ม



**ภาพที่ 2.6** ปฏิกิริยาการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) ของพอลิเอสเทอร์ของ adipic acid และ DMT โดยใช้ TBOT เป็นตัวเร่ง [3]

PBAT ถูกจำแนกเป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มที่มีลักษณะโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึกที่แน่นอน เนื่องจากขาดความเป็นระเบียบของโครงสร้าง จึงนำไปสู่คุณสมบัติทางกายภาพที่หลากหลาย เช่น จุดหลอมเหลวมีช่วงกว้าง มีค่าความแข็งต่ำแต่มีความเหนียว และความยืดหยุ่นสูง ดังที่แสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งโดยส่วนมากจะนำพอลิเมอร์ชนิดนี้ผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีความแข็งและไม่ยืดหยุ่น

**ตารางที่ 2.2** สมบัติของ PBAT ที่ผลิตเพื่อการค้า [14]

สมบัติ	PBAT
Density (g/mL)	1.25
$T_m$ (°C)	150–160
Tensile load (N)	4.23 <sup>a</sup> , 5.93 <sup>b</sup>
Tensile strength (MPa)	7.84 <sup>a</sup> , 10.98 <sup>b</sup>
Elongation at break (%)	396.95 <sup>a</sup> , 486.78 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> ตามแนวขวางกับเครื่องอัดรีด (Transverse direction, TD)

<sup>b</sup> ตามแนวขนานกับเครื่อง (Machine direction, MD)

## 2.4 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) [15]

พลาสติไซเซอร์ หรือสารเพิ่มความยืดหยุ่น ที่ใช้ในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์โดยใช้เป็นสารเติมแต่ง ผู้ที่เริ่มใช้พลาสติไซเซอร์ในทางอุตสาหกรรมคนแรก คือ Hyatt Brothers ประมาณ ค.ศ.1870 ได้ทำการผสมการบูร (Camphor) กับไนโตรเซลลูโลส (Nitrocellulose) และในเวลาต่อมา ไตรครีซิล ฟอสเฟต (Tricresyl phosphate) ก็ถูกนำมาใช้เป็นพลาสติไซเซอร์ ตามด้วยพทาเลท เอสเทอร์ (Phthalate esters) ซึ่งสารดังกล่าวมีหน้าที่เข้าไปปรับความยืดหยุ่นและการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ โดย IUPAC (International union of pure and applied chemistry) กำหนดให้สาร พลาสติไซเซอร์เป็นสารหรือวัสดุผสมในวัสดุ โดยสารเหล่านี้จะไม่ทำปฏิกิริยากับพลาสติกแต่จะไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของพลาสติก ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอ่อนลง และมีผลทำให้  $T_g$  ลดลง เพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานและการยืดขยายของวัสดุ สารเหล่านี้จะช่วยลดการเสียรูป ความแข็ง ความหนาแน่น ความหนืด และประจุไฟฟ้าสถิตของพอลิเมอร์ ในขณะเดียวกันก็จะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์ และต้านทานการแตกหักเป็นฉนวนกันไฟฟ้า พลาสติไซเซอร์ยังมีผลกับคุณสมบัติอย่างอื่นอีกด้วย เช่น ระดับความเป็นผลึก ความต้านทานต่อสภาวะความเป็นกรด-เบส ความต้านทานต่ออุณหภูมิสูง ความต้านทานต่อการสลายตัวทางชีวภาพ และคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย ทั้งในอุตสาหกรรมอาหารและยา เครื่องมือทางการแพทย์ ของเล่นสำหรับเด็ก เป็นต้น

### 2.4.1 หลักในการเลือกใช้พลาสติไซเซอร์ที่เหมาะสม มีดังนี้

- 1) มวลโมเลกุลมีค่าสูง ซึ่งโดยปกติมีค่าสูงกว่าตัวทำละลาย เพื่อให้การระเหยเป็นไปได้ยาก (Low volatility)
- 2) มีความคงตัวสูง (Permanence) ทั้งระหว่างการขึ้นรูป และขณะใช้งาน พลาสติไซเซอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะมีความคงตัวสูง
- 3) มีความทนทาน และมีอัตราการแพร่ที่ต่ำ (Low extractability)
- 4) สามารถเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ที่ผสมในระดับโมเลกุล โดยต้องมีหมู่หรือส่วนที่จะเกิดพันธะทุติยภูมิ (Secondary bond) คือพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) กับพอลิเมอร์ได้ดีและแข็งแรง (High compatibility)
- 5) มีประสิทธิภาพ (Efficiency) ของการเป็นพลาสติไซเซอร์ที่ดี โครงสร้างแบบอะลิฟาติก (Aliphatic) จะมีประสิทธิภาพสูงสุด พลาสติไซเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงจะต้องลด  $T_g$  ของพอลิเมอร์ได้ดี

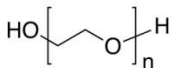
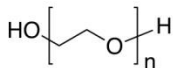
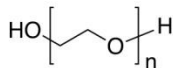
- 6) มีความเป็นพิษน้อย หรือ ไม่มีความเป็นพิษเลย (Low or non-toxicity)
- 7) เสถียร (Stability) ไม่ติดไฟ ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ
- 8) ราคาถูก (Low cost)

## 2.5 พอลิ(เอทิลีน ไกลคอล) (Poly(ethylene glycol), PEG) [16–19]

พอลิ(เอทิลีน ไกลคอล) หรือ PEG เป็นสารเคมีที่ได้จากการสังเคราะห์ โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างโพรพิลีน ออกไซด์ (Propylene oxide, PO) กับน้ำ เนื่องจาก PEG มีสมบัติที่ดี เช่น มีความชอบน้ำสูง (Hydrophilic) มีความสามารถในการละลาย (Solubility) และการเข้ากันได้ (Compatibility) ที่ดี ทำให้สามารถนำไปผสมกับสารอื่นๆ ให้เพิ่มความชอบน้ำได้ โดย PEG มีหลายชนิดแตกต่างกันไปตามน้ำหนักโมเลกุล เช่น PEG200, PEG300, PEG400 และ PEG600 เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลน้อยจึงทำให้มีลักษณะที่ใส เปรียบเทียบกับ PEG3350, PEG4500 และ PEG8000 ซึ่งมีลักษณะขุ่นคล้ายแว็กซ์ (Wax) น้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลทำให้คุณสมบัติของความสามารถในการละลายน้ำ และการดูดความชื้นลดลงแต่มีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น โดยจะเปรียบเทียบสมบัติของ PEG โดยมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกัน คือ PEG1500, PEG8000 และ PEG20000 ดังแสดงในตารางที่ 2.3

PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำนั้นได้รับการรายงานว่าเป็น plasticizer ที่มีประสิทธิภาพมาก เนื่องจาก PEG มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ จะมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ยาวจึงเกิดการเกี่ยวพันกับสายโซ่ของ PLL ได้ดี PEG สามารถละลายได้ในน้ำ และตัวทำละลายหลายชนิด เช่น เบนซีน (Benzene), เมทานอล (Methanol), อะซีโตน (Acetone) และ โทลูอีน (Toluene) เป็นต้น เนื่องจาก PEG ไม่มีความเป็นพิษ จึงมีการนำไปใช้ประโยชน์มากมาย โดยอาศัยสมบัติการละลายน้ำได้ในรูปของฟิล์มและแคปซูล ใช้สำหรับห่อใส่ผงซักฟอก หรือยาเม็ด เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเคมี PEG1500, PEG8000 และ PEG20000 [15-17]

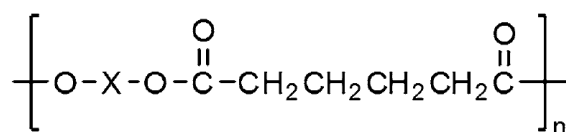
สมบัติ	PEG1500 [17]	PEG8000 [18]	PEG20000 [19]
สูตรโมเลกุล	$\text{HO}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n\text{H}$	$\text{HO}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n\text{H}$	$\text{HO}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n\text{H}$
ชื่อทางวิทยาศาสตร์	Poly(ethylene glycol) 1500	Poly(ethylene glycol) 8000	Poly(ethylene glycol) 20000
ชื่อ IUPAC	Poly(ethylene oxide) 1500	Poly(ethylene oxide) 8000	Poly(ethylene oxide) 20000
สูตรโครงสร้าง			
สมบัติทางกายภาพ			
- สถานะ	ผง	เกล็ดผลึก	เกล็ดผลึก
- สี	ขาว	ขาว	ขาว
- การละลาย	500 g/l	500 g/l	500 g/l
สมบัติทางเคมี			
- จุดเดือด	มากกว่า 250 °C	มากกว่า 250 °C	มากกว่า 250 °C
- จุดหลอมเหลว	44-48 °C	55-62 °C	68-63 °C
- ความหนาแน่น	1.20 g/cm <sup>3</sup> (20°C)	1.09 g/cm <sup>3</sup> (70°C)	1.20 g/cm <sup>3</sup> (20°C)

รูป



## 2.6 พอลิ(เอสเทอร์ อดิเพท) (Poly(ester adipate), ParaplexG40) [20, 29]

พอลิ(เอสเทอร์ อดิเพท) หรือ ParaplexG40 มีโครงสร้างทางเคมีดังภาพที่ 2.7 เป็นพลาสติกไซเซออร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ระบายได้ยาก ไม่สามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์ แต่ละลายในอะซิโตน มีความต้านทานต่อการกัดด้วยตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน เหมาะสำหรับการใช้งานที่เพิ่มความยืดหยุ่น (Elastomer) และลดค่ามอดูลัส เช่น การผลิตพีวีซี (Poly(vinyl chloride), PVC) เป็นต้นแสดงสมบัติเชิงกลของ ParaplexG40 ในตารางที่ 2.4



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของ poly(ester adipate) หรือ ParaplexG40 [29]

## ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของ ParaplexG40 [20]

สมบัติ	ParaplexG40
Tensile strength (MPa)	16.9
Elongation at break (%)	420

## 2.7 พอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blend) [21]

การเบลนด์ (Blending) เป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรม อาจจะเป็นการเบลนด์กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆหรือเบลนด์กับสารเติมแต่ง (Additive) ซึ่งอยู่ในสถานะของไหล โดยอาจอยู่ในรูปของสารละลาย (Solution) หรือสารหลอมเหลว (Melt) ซึ่งจะเป็นการนำสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกันเพื่อให้ได้สมบัติตามความต้องการ และสามารถนำไปใช้งานได้หลายด้าน แต่อย่างไรก็ตามการผสมพอลิเมอร์ต่างชนิดกันให้เป็นเนื้อเดียวกันนั้นโดยทั่วไปแล้วนั้นทำได้ยาก จึงต้องพิจารณาถึงสภาพเข้ากันได้ (Compatibility) คือ พอลิเมอร์ที่ไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันแต่มีการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส (Interfacial adhesion) ขอบ่งชี้เบื้องต้นที่แสดงถึงความเข้ากันได้ คือ การเกิดเป็นแผ่นฟิล์มที่โปร่งใส เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์มีการกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งโดยมีขนาดของบริเวณที่กระจาย (Disperse phase) เล็กกว่าความยาวคลื่นของแสง อีกหนึ่งข้อบ่งชี้ที่แสดงถึงความเข้ากันได้ คือ การปรากฏอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) ของพอลิเมอร์เบลนด์เพียงค่าเดียว โดยสามารถ

วิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น Differential Scanning Calorimetry (DSC), Dynamic Mechanical Spectra (DMS), Thermo-Mechanical Analysis (TMA) เป็นต้น

การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ แบ่งหลักๆ เป็น 2 วิธี คือ

1) การเตรียมในสถานะสารละลาย (Solution blending) โดยละลายพอลิเมอร์ต่างชนิดกันในตัวทำละลายที่เหมาะสม ทิ้งไว้จนตัวทำละลายระเหยออกจนหมด จะได้พอลิเมอร์ผสมเป็นของแข็ง ซึ่งวิธีการนี้เหมาะสมกับการศึกษาในห้องปฏิบัติการ ข้อดีคือเหมาะสมในการทำการศึกษาเบื้องต้นเนื่องจากใช้วัสดุในปริมาณน้อยและไม่ต้องลงทุนด้านเครื่องมือซึ่งมีราคาสูง

2) การเตรียมโดยการหลอมผสม (Melt blending) โดยการให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์ในอุณหภูมิที่สูงกว่า  $T_m$  ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ณ อุณหภูมิดังกล่าวพอลิเมอร์จะอยู่ในสถานะที่อ่อนนุ่มทำให้สามารถผสมพอลิเมอร์เข้าด้วยกันได้ วิธีนี้มักทำโดยใช้เครื่องมือ ซึ่งวิธีการเตรียมพอลิเมอร์ผสมแบบหลอมสามารถเตรียมพอลิเมอร์ผสมในปริมาณมาก ๆ โดยปราศจากตัวทำละลายดังนั้นในทางอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้วิธีนี้ในการขึ้นรูปพอลิเมอร์เบลนด์แบบหลอม

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [22–32]

ในปี ค.ศ. 1988 Younes, H. และ Cohn, D. [22] ได้ทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิ(เอทิลีน ไกลคอล) (Poly(ethylene glycol), PEG) และพอลิ(แลคติก แอซิด) (Poly(lactic acid), PLA) เตรียมตัวอย่างโดยการผสม PLA 10–90 wt% กับ PEG (น้ำหนักโมเลกุล 1500, 3400, 6000 และ 35,000) ด้วยวิธีการหล่อด้วยตัวทำละลาย ตัวทำละลายที่ใช้คือ คลอโรฟอร์ม ความสามารถในการเข้ากันได้ (Miscibility) วิเคราะห์ได้จากเทคนิคที่หลากหลาย รวมถึงการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน การวัดความหนาแน่นและการประเมินด้วยสายตา การผสม PEG/PLA มีความทึบแสงเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ที่เพิ่มขึ้น จะได้ฟิล์มที่โปร่งแสงเฉพาะสำหรับการผสมที่มีความเข้มข้นของ PEG ต่ำมาก จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย IR สเปกตรัมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีความเข้มข้นของ PEG ต่ำ แต่สเปกตรัมจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อความเข้มข้นของ PEG สูงขึ้น สามารถอธิบายได้ว่า เฟสอสังฐานของ PLA สามารถรองรับสายโซ่ PEG บางส่วนได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการจัดเรียงผลึกของพอลิเมอร์ แต่หากการผสมมีปริมาณ PEG มากกว่า 20 %wt จะสามารถเกิดผลึกได้ เช่น การผสมที่ประกอบด้วย semi-miscible crystalline 2 เฟส กระจายตัวใน amorphous matrix

ในปี ค.ศ. 2006 Rhim, J. W. [23] และคณะได้ทำการศึกษาฟิล์มแบบหลายชั้น (Multilayer film) โดยชั้นในเป็นโปรตีนถั่วเหลือง (Soy protein isolate, SPI) และชั้นนอกเป็นพอลิ(แลคติก แอซิด) (Poly(lactic acid), PLA) เตรียมฟิล์มโดยวิธีการหล่อด้วยตัวทำละลายแบบง่าย โดยทั่วไป PLA มีความแข็งและเปราะ โดยมีค่าความต้านทานแรงดึงประมาณ 45.6–61.4 MPa และมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดประมาณ 3.1–5.8 % ซึ่งภายหลังจากผสมฟิล์มแล้ว ค่าความต้านทานแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มแบบหลายชั้นมีค่าเท่ากับ  $17.0 \pm 0.3$  MPa และ  $176.9 \pm 27.9$  % ตามลำดับ โดยเฉพาะค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มแบบหลายชั้นเพิ่มขึ้นมากกว่า 5 เท่า เมื่อเทียบกับฟิล์ม SPI เนื่องจากน้ำในชั้นฟิล์ม SPI และตัวทำละลายในชั้นของ PLA ทำงานควบคู่ไปกับการเป็นพลาสติกไซเซอร์ และเนื่องจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุล (Intermolecular forces) ระหว่างสายพอลิเมอร์ที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดของฟิล์ม การเคลือบฟิล์ม SPI ด้วยฟิล์ม PLA ยังทำให้สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeability, WVP) ลดลง 40 เท่า เมื่อเทียบกับฟิล์ม SPI สมบัติการซึมผ่านของออกซิเจน (Oxygen permeability, OP) ลดลงมากกว่า 26 เท่า เมื่อเทียบกับฟิล์ม PLA คุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมดนี้อาจเกิดจากการยึดติดกันระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่ใช้คือ SPI และ PLA ฟิล์มแบบหลายชั้นที่ประกอบด้วยชั้น SPI และ PLA สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ มีศักยภาพในการทดแทนฟิล์มพอลิเมอร์อื่นที่มีราคาแพง และไม่สามารถย่อยสลายได้ เช่น เอทิลีน ไวนิล แอลกอฮอล์ (Ethylene vinyl alcohol, EVOH) ไนลอน (Nylon) และพอลิเอสเตอร์ (Polyester)

ในปี ค.ศ. 2008 Gu, S. Y. [24] และคณะได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการหลอม และการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิ(แลคติก แอซิด) (Poly(lactic acid), PLA) และพอลิ(บิวทิลีน อะดิเพท-โค-เทอราฟทาเลท) (Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) โดยใช้อัตราส่วนในการผสมกันคือ 100/0, 95/5, 90/10, 85/5, 80/20 และ 70/30 ทำการผสมกันด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ภายหลังจากการผสมแล้วนำมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากลักษณะสัญญาณวิทยาศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 70/30 พบว่า PBAT กระจายอยู่ระหว่างเมทริกซ์ (Matrix) ของ PLA ได้ไม่สม่ำเสมอ แต่การผสมกันของ PLA/PBAT จะเกิดการหลอมเข้ากันได้เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ PBAT เพิ่มมากขึ้น รวมทั้งค่ามอดูลัสก็จะลดลงด้วย และเวลาในการผสมเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการเข้ากันได้มากขึ้น

ในปี ค.ศ. 2011 สมหมาย ผิวสะอาด และคณะ [25] ได้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิ(แลคติก แอซิด) (Poly(lactic acid), PLA), พอลิ(บิวทิลีน อะดิเพท-โค-



เทอเรฟทาเลท) (Poly(butylene adipate-co-teraphthalate), PBAT) และ พอลิ(บิวทิลีน ซัคซิเนต-โค-อดิเพท) (Poly(butylene succinate-co-adipate), PBSA) เพื่อการประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เทอร์โมแกรมแสดงสมบัติทางความร้อน แสดงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ และเมื่อทำการผสมพอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิดปรากฏอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกเป็น 3 พีค แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์นั้นเข้ากันได้บางส่วน แต่ในฟิล์ม PLA/PBAT เฟสของ PBAT พบการหลอมเหลวผลึกลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับฟิล์ม PLA/PBSA แสดงว่า PLA สามารถเข้ากันได้ดีกว่า PBAT มากกว่า PBSA การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสมระหว่าง PLA/PBAT/PBSA พบว่าความทนทานต่อแรงดึง ค่ายังสัมมอดูลัส และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดลดลงตามปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง PLA/PBAT/PBSA ที่เตรียมโดยใช้เครื่องอัดรีดสกรูคู่คือ 80/20/10 wt% เนื่องจากมีความทนทานต่อแรงดึงสูง แต่เมื่อปรับเปลี่ยนกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มโดยใช้เครื่องอัดรีดสกรูคู่ต่อกับเครื่องเป่าฟิล์มพบว่า ที่อัตราส่วน 60/40/40 wt% สามารถขึ้นรูปฟิล์มได้ดีเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน และมีความทนทานต่อแรงดึงสูง เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับภาคอุตสาหกรรมการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ฟิล์ม

ในปี 2011 Hughes, J. [26] ได้ทำการศึกษาผลของตัวทำละลายต่อความสามารถในการเกิดผลึก และเสถียรภาพการขยายตัวทางความร้อนของฟิล์ม PLA 3 ชนิดที่ใช้ตัวทำละลายแตกต่างกันดังนี้ PLA ในคลอโรฟอร์ม (PLA-C), PLA ในเมทิลีนคลอไรด์ (PLA-M) และ PLA ในเมทิลีนคลอไรด์:อะซิโตนไธล (50:50) (PLA-MA) พบว่า PLA-MA มีความเป็นผลึก 46.15% ซึ่งมากกว่า PLA-C 24.03 % และ PLA-M 14.25 % ด้วยความสามารถในการเกิดผลึกที่เพิ่มขึ้นนี้ PLA-MA จึงมีเสถียรภาพในการขยายตัวทางความร้อนที่ดีขึ้น เทคนิคการกระจายตัวของรังสีเอกซ์ในมุมกว้างระบุดโครงสร้างผลึกหลายแบบสำหรับฟิล์ม PLA-MA การซึมผ่านของออกซิเจน (Oxygen permeability, OP) ของฟิล์ม PLA-MA มีค่าต่ำที่สุดแต่ อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor permeability, WVP) ของฟิล์มทั้ง 3 ชนิด มีค่าไม่แตกต่างกัน การทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า PLA-C และ PLA-M มีความเหนียว เนื่องจากมีผลึกน้อยลง ในขณะที่ PLA-MA มีความเปราะ และค่อนข้างไม่โปร่งใส แสดงให้เห็นว่า PLA-MA มีความสามารถในการเกิดผลึกเพิ่มขึ้น และเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนมากขึ้น สรุปได้ว่าสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PLA สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ของผลึก ดังนั้นจึงอาจทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น

ในปี ค.ศ. 2013 Weng, Y. X. และคณะ [27] ได้ทำการเตรียมฟิล์ม PLA, PBAT และ PLA/PBAT (40/60) โดยกระบวนการรีดขึ้นรูปและการหล่อ และศึกษาการย่อยสลายของฟิล์ม

โดยการฝังตัวอย่างฟิล์มไว้ใต้ดินแล้วทำการวิเคราะห์ตัวอย่างฟิล์มด้วย SEM, DSC, TGA, IR และการวิเคราะห์ธาตุ ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างฟิล์มด้วย IR พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งพีคน้อยมากของตัวอย่างก่อนและหลังจากการย่อยสลาย ผลจาก SEM แสดงให้เห็นว่าอัตราการย่อยสลายของ PLA และ PBAT ในฟิล์มผสม PBAT/PLA แตกต่างจากอัตราการย่อยสลายของฟิล์มที่เป็นพอลิเมอร์เดี่ยว ๆ เนื่องจากมีความแตกต่างกันในสถานะของดิน เป็นผลให้สภาพผิวของฟิล์มหลังจากการย่อยสลายไม่เหมือนกัน ตัวอย่างฟิล์มหลังการย่อยสลายมีอุณหภูมิหลอมเหลว และจุดหลอมเหลวที่เพิ่มขึ้น การวิเคราะห์ธาตุจะเห็นได้ว่าปริมาณอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุลโครงสร้างของตัวอย่างของ PBAT, PLA และ PBAT/PLA ลดลง ในขณะที่ปริมาณอะตอมของออกซิเจนเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างมีการย่อยสลายของฟิล์ม

ในปี ค.ศ. 2013 Patrício, T. และ Bartolo, P. [28] ได้ทำการเตรียมฟิล์มผสมระหว่างพอลิ(เอปซีลอน-คาโปรแลคโตน) (Poly( $\epsilon$ -caprolactone), PCL) กับ พอลิ(แลคติก แอซิด) (Poly(lactic acid), PLA) ในส่วนผสมที่มีเปอร์เซ็นต์แตกต่างกัน ผสม PCL/PLA (70/30 wt% และ 50/50 wt%) โดยการผสมด้วยวิธีทางกายภาพที่เรียกว่าการหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลายสรุปได้ว่า PCL และ PLA เป็นพอลิเมอร์ผสมแบบแยกเฟส เนื่องจากการเพิ่มของ PLA จะแสดงให้เห็นอนุภาคที่มากขึ้นซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ coalescence โดยทั่วไปปรากฏการณ์ coalescence เป็นกระบวนการที่อนุภาคสองอย่างหรือมากกว่ารวมตัวเป็นหนึ่งอนุภาคทางกายภาพซึ่งแสดงให้เห็นโดยการทดสอบทางสัณฐานวิทยา เสถียรภาพทางความร้อน และการทดสอบทางรีโอโลยีแสดงให้เห็นว่า ฟิล์ม PCL ฟิล์ม PLA และฟิล์มผสมมีพฤติกรรมความยืดหยุ่นเหนียวแน่น นั่นคือมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญต่อพอลิเมอร์ในกระบวนการอัดขึ้นรูป

ในปี ค.ศ. 2014 Kunthadong P. และคณะ [29] ได้ทำการเตรียมฟิล์มพอลิ(แอล-แลคไทด์) (Poly(L-lactide), PLL) และเซลลูโลส อะซิเตท บิวทิลเลท (Cellulose acetate butyrate, CAB) ซึ่งมีสมบัติที่แข็ง และเหนียว เตรียมฟิล์มในรูปสารละลายโดยใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย ฟิล์มหนา 40–60 ไมโครเมตร ใช้พอลิเอทิลีน ไกลคอล (Poly(ethylene glycol), PEG) และพอลิเอสเทอร์ อะดิเพท (Poly(ester adipate), ParaplexG40) เป็นพลาสติไซเซอร์ในฟิล์ม PLL/CAB เพื่อลดอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และเพิ่มความยืดหยุ่น จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) พบว่าทั้ง PEG และ ParaplexG40 สามารถลดอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) เป็นสถานะคล้ายยางของ

PLL/CAB ทำให้ได้พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีความยืดหยุ่น การผสมฟิล์ม PLL/CAB/PEG มีความเข้ากันได้เพียงบางส่วน เนื่องจากมีการเหนียวทำให้เกิดผลึกใหม่ในพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้เกิดการแยกเฟส ในทางตรงกันข้ามเมื่อใช้ ParaplexG40 เป็นพลาสติกไซเซออร์ทำให้ฟิล์ม PLL/CAB/ParaplexG40 มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาเสถียรมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ฟิล์มผสม PLL/CAB/Plasticizer ทั้งหมดสลายตัวทางชีวภาพได้ โดยปริมาณ PLL ลดลงมากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ฟิล์มผสมที่ใช้พลาสติกไซเซออร์เป็น PEG มีความสามารถในการย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ที่  $PLL \geq 70$  และ  $CAB \leq 30$  wt% ผลการวิจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าสามารถใช้ CAB และชนิดของพลาสติกไซเซออร์เพื่อปรับแต่งความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ โดยพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้มีความยืดหยุ่นและมีความอ่อนนุ่มเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับ PLL เริ่มต้น และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ โดยมีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม

ในปี ค.ศ. 2015 Girdthep, S. และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาอนุภาคโดยเปรียบเทียบระหว่าง montmorillonite (mMMT) ที่มีการดัดแปลง และ graphene nano-platelets (GNPs) ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์มผสมระหว่าง พอลิ(แลคติก แอซิด) (Poly(lactic acid), PLA) กับพอลิ(บิวทิลีน อดิเพท-โค-เทอแรพทาเลท) (Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) เตรียมฟิล์มผสม PLA/PBAT และ PLA/PBAT/filler ด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลายที่อัตราส่วน 70/30 และ 70/30/5 มีคลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย การอภิปรายผลเกี่ยวกับการเกิดผลึกที่ศึกษาโดย DSC สอดคล้องกับค่า WVP ที่ลดลงของฟิล์มเนื่องจาก GNPs สามารถทำให้การจัดเรียงของโซ่พอลิเมอร์เป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งฟิล์ม PGC มีการเกิดผลึกสูงกว่าฟิล์ม PCC ฟิล์มที่มีการเติมฟิลเลอร์อาจนำไปสู่การประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มต้านจุลชีพที่มีประสิทธิภาพ

ในปี ค.ศ. 2016 Wang, L. F. และคณะ [31] ได้ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มผสมระหว่าง พอลิ(แลคติก แอซิด) (Poly(lactic acid), PLA) กับพอลิ(บิวทิลีน อดิเพท-โค-เทอแรพทาเลท) (Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) โดยวิธีการหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย เตรียม PLA/PBAT ในอัตราส่วน 3.96/0.04, 3.92/0.08, 3.6/0.2, และ 3.6/0.4 กรัมละลายลงในคลอโรฟอร์ม 100 มิลลิลิตร จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล ฟิล์ม PLA เป็นฟิล์มที่แข็งและเปราะ มีค่า TS เท่ากับ 62.0 MPa ฟิล์ม PBAT มีความอ่อนและเหนียว มีค่า TS เท่ากับ 9.4 MPa ส่วนค่า TS ของฟิล์ม PLA/PBAT ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณ PBAT แสดงว่าการผสม PBAT ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น และปรับปรุงคุณสมบัติของ PLA โดยลดความเปราะซึ่งเป็นหนึ่งในปัญหาใหญ่ของฟิล์ม PLA สำหรับการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมฟิล์มผสมที่มี PLA 3.92 กรัม/PBAT 0.08 กรัม

(PLA<sub>98</sub>/PBAT<sub>2</sub>) ให้ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิชิเบิลโดยการผสม PBAT เพียงเล็กน้อย ไม่ทำให้เสียความโปร่งใสของฟิล์ม การทดสอบ FT-IR ของฟิล์มผสม PLA/PBAT ได้ดำเนินการเพื่อศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่าง PLA กับ PBAT ซึ่งตำแหน่งพีคของ PBAT และ PLA ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งหลังจากผสม แสดงว่าไม่มีปฏิสัมพันธ์ทางเคมีระหว่าง PBAT กับ PLA การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PLA/PBAT ด้วย DSC T<sub>g</sub> ของ PBAT ในฟิล์ม PLA/PBAT ไม่มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งแสดงให้เห็นว่า PLA และ PBAT ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน หากพอลิเมอร์ทั้งสองผสมเป็นเนื้อเดียวกัน T<sub>g</sub> ของ PLA และ PBAT จะย้ายไปรวมกัน และ T<sub>g</sub> ควรจะต่ำลงและกว้างขึ้นหลังจากที่ผสมฟิล์มผสม ในงานวิจัยนี้สามารถผลิตได้ในอุตสาหกรรมโดยใช้เทคโนโลยีการอัดขึ้นรูป ฟิล์มผสมที่ปรับปรุงคุณสมบัติแล้วมีศักยภาพสูงสำหรับการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร ใช้บรรจุผลไม้ และผักสดเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา

ในปี ค.ศ. 2016 สกาวรัตน์ นพคุณ และรุ่งลาวัลย์ สมสุนันท์ [32] ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ งานวิจัยนี้เน้นคุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสมจาก พอลิ (แลคติก แอซิด) (Poly(lactic acid), PLA), พอลิ(บิวทิลีน ซัคซิเนต) (Poly(butylene succinate), PBS) และใช้พอลิ(เอสเทอร์ อะดิเพต) (Polyester adipate, ParaplexG40) เป็น plasticizer สำหรับใช้เป็นพลาสติกชีวภาพผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ PBS พอลิเมอร์ผสมจะมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น และไม่มีความแตกต่างของอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T<sub>g</sub>) นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาผลของ ParaplexG40 ในรูปของ plasticizer (0-15 phr) ในพอลิเมอร์ผสม ในขณะที่อุณหภูมิ ParaplexG40 เพิ่มขึ้นอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วลดลง อุณหภูมิการตกผลึกลดลง เสถียรภาพทางความร้อนลดลง การกระจายตัวของ PBS ใน PLA จะเพิ่มขึ้น ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำไม่แตกต่าง ความโปร่งใสเพิ่มขึ้น ความเค้น ณ จุดขาด และเปอร์เซ็นต์ระยะการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง อย่างไรก็ตามแสดงให้เห็นว่าความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยการเพิ่ม plasticizer จากผลการทดสอบทั้งหมดสามารถยืนยันได้ว่าคุณสมบัติของพอลิเมอร์ผสมสามารถควบคุมได้โดยการเปลี่ยนแปลงส่วนผสม สรุปได้ว่าการผสม PLA/PBS/ParaplexG40 แสดงถึงความมีศักยภาพสำหรับใช้เป็นพลาสติกชีวภาพ

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. Beaker 250 ml
2. Beaker 50 ml
3. Magnetic stirrer และ magnetic bar ขนาด 2 cm
4. Spatula
5. Cylinder ขนาด 10 ml, 25 ml และ 50 ml
6. Dropper
7. Foil paper
8. Petri dish ขนาด 90 × 15 mm
9. Teflon™ (Polytetrafluoroethylene, PTFE)
10. Zippered bag (Polyethylene, PE) ขนาด 12 × 17 cm
11. Desiccator

#### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. Chloroform (CHCl<sub>3</sub>), 99.8%, ACI Labscan, Thailand

#### 3.3 วัสดุดิบ

1. Poly(L-lactide), PLL (C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>)<sub>n</sub>
2. Poly(butylene adipate-co-terephthalate) PBAT, (C<sub>12</sub>H<sub>12</sub>O<sub>4</sub>)<sub>m</sub>(C<sub>10</sub>H<sub>8</sub>O<sub>4</sub>)<sub>n</sub>
3. Poly(ethylene glycol), PEG1500 (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O)<sub>n</sub>
4. Poly(ethylene glycol), PEG8000 (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O)<sub>n</sub>
5. Poly(ethylene glycol), PEG20000 (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O)<sub>n</sub>
6. Poly(ester adipate), ParaplexG40 (C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>O<sub>4</sub>X)<sub>n</sub>

### 3.4 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์

การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูป โดยใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ การเตรียมฟิล์มโดยไม่เติมพลาสติกไซเซออร์ และการเตรียมฟิล์มโดยเติมพลาสติกไซเซออร์ (PEG1500, PEG8000, PEG20000 และ ParaplexG40)

#### 3.4.1 การเตรียมฟิล์มโดยไม่เติมพลาสติกไซเซออร์

1. เตรียมสารละลาย PLL โดยชั่ง PLL 6.0 g ละลายด้วยคลอโรฟอร์ม 120 ml ใน ปีกเกอร์ 250 ml คนสารละลายด้วย magnetic bar เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. เตรียมสารละลาย PBAT โดยชั่ง PBAT 6.0 g ละลายด้วยคลอโรฟอร์ม 120 ml ในปีกเกอร์ 250 ml คนสารละลายด้วย magnetic bar เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. ผสมสารละลาย PLL และ PBAT ตามอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.1 แล้วคนสารละลายด้วย magnetic bar เป็นเวลา 30 นาที
4. เทสารละลายผสมลงใน petri dish ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 3 วัน เพื่อระเหยตัวทำละลาย ลอกตัวอย่างออก เก็บใน zippered bag แล้วเก็บใน desiccator เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณของสารละลายพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนต่างๆ

PLL (%)	PBAT (%)	Volume (ml)	
		PLL	PBAT
100	0	20	0
90	10	18	2
80	20	16	4
70	30	14	6
60	40	12	8
50	50	10	10
40	60	8	12
30	70	6	14
20	80	4	16
10	90	2	18
0	100	0	20

### 3.4.2 การเตรียมฟิล์มโดยเติมพลาสติกไฮเซออร์ (PEG1500, PEG8000, PEG20000 และ paraplexG40)

1. เตรียมสารละลาย PLL โดยชั่ง PLL 5.0 g ละลายด้วยคลอโรฟอร์ม 100 ml เติมพลาสติกไฮเซออร์ 1 phr (0.1000 g), 2 phr (0.2000 g), 3 phr (0.3000 g), 4 phr (0.4000 g) และ 5 phr (0.5000 g) (phr คือ หน่วยการผสมยางโดยคิดสัดส่วนปริมาณสารต่างๆ เมื่อเทียบกับยาง 100 ส่วน (โดยน้ำหนัก) เรียกเป็น phr หรือ pphr) คนสารละลายด้วย magnetic bar เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2. เตรียมสารละลาย PBAT โดยชั่ง PBAT 5.0 g ละลายด้วยคลอโรฟอร์ม 100 ml คนสารละลายด้วย magnetic bar เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3. ผสมสารละลาย PLL และ PBAT ตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1 โดยยกเว้นอัตราส่วน 100/0 และ 0/100 แล้วคนสารละลายด้วย magnetic bar เป็นเวลา 30 นาที

4. เทสารละลายผสมลงใน petri dish ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 3 วันเพื่อระเหยตัวทำละลาย ลอกตัวอย่างออก เก็บใน zippered bag แล้วเก็บใน desiccator เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

### 3.5 เครื่องมือและการวิเคราะห์

ฟิล์มที่เตรียมได้จะถูกนำมาทำการวิเคราะห์ โดยวิเคราะห์สมบัติทางแสง โครงสร้างทางเคมี และการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม

#### 3.5.1 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของฟิล์ม

วิเคราะห์สมบัติทางแสงของฟิล์ม โดยใช้เครื่อง UV-Visible spectrophotometer (Jasco V-530, JASCO International Co. Ltd., Tokyo, Japan) โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณ และชนิดของสาร ทำการเตรียมตัวอย่างฟิล์มที่จะนำมาวิเคราะห์ โดยการตัดฟิล์มให้มีความกว้าง 1 cm พอดีกับ quart cell วิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิด และปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ในการทดลองนี้จะทำการทดสอบในช่วงความยาวคลื่น 200-800 nm โดยวิเคราะห์สมบัติการป้องกันรังสียูวี และความโปร่งแสงที่ความยาวคลื่น 280 และ 660 nm ตามลำดับ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ซึ่งเรียกว่า spectrum

จากกฎของ Beer-Lambert ค่า transmittance (T) เป็นสัดส่วนปริมาณแสงที่ผ่านออกมา (I) ต่อปริมาณแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่าง ( $I_0$ ) เขียนสมการได้ว่า

$$T = \frac{I}{I_0}$$

absorbance (A) นิยามสมการได้เป็น

$$A = \log \frac{I_0}{I} = -\log T$$

โดยทั่วไปจะรายงานค่า transmittance เป็นเปอร์เซ็นต์ (%T) จะได้

$$\%T = 100 \frac{I}{I_0}$$

$$\log \%T = \log 100 \frac{I}{I_0}$$

$$\log \%T = 2 + \log \frac{I}{I_0}$$

$$\log \%T = 2 - A \text{ หรือ } A = 2 - \log \%T$$

ดังนั้น ค่า T มีค่าอยู่ในช่วง 0-1 และ %T มีค่าตั้งแต่ 0-100 ส่วน  $A = 0$  เมื่อแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างไม่ถูกดูดกลืนไว้และผ่านออกมา 100 %,  $A = 1$  เมื่อแสงผ่านออกมาเพียง 10 % และ  $A = 2$  ถ้าแสงผ่านออกมาน้อยมากเพียง 1 %

### 3.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฟิล์ม

วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสมด้วย Fourier Transform-Infrared Spectrometer (FT-IR) (Nicolet iS5, Thermo Fisher Scientific, Madison, USA) ที่ความละเอียด  $1 \text{ cm}^{-1}$  ในช่วง  $4000\text{--}500 \text{ cm}^{-1}$  ใช้เทคนิค Attenuated total reflectance spectroscopy (ATR) โดยใช้ diamond crystal วัดซ้ำ 32 รอบในหนึ่งการวิเคราะห์ นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ เนื่องจากตัวอย่างฟิล์มเป็นแผ่นของแข็งจึงสามารถทำการวิเคราะห์ได้เลย เมื่อโมเลกุลของสารเกิดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดช่วง middle infrared



(4000–200  $\text{cm}^{-1}$ ) จะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่น ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีความถี่ของการสั่นที่แตกต่างกันไป ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง และชนิดของสารได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง wavenumber กับ transmittance ซึ่งเรียกว่า infrared spectrum

### 3.5.3 การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม

ทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม โดยการทดสอบหาค่า tensile strength (TS), modulus (E) และ %elongation at break (EB) ด้วย Universal testing machine (Model QC-506B1, Cometech, Taiwan) เตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มขนาด  $10 \times 50 \text{ mm}^2$  วัดความหนาของแต่ละชิ้นงานอยู่ที่ประมาณ 0.1–0.2 mm โดยใช้ Thickness gauge ทำการทดสอบตัวอย่างละ 5 ซ้ำ ที่อุณหภูมิห้อง โดยมีสภาวะที่ใช้ทดสอบ ดังนี้

น้ำหนักสูงสุดที่รับแรง (Load cell)	100 N
ระยะห่างตัวจับชิ้นงาน (Gauge length, $L_0$ )	30 mm
อัตราความเร็วในการดึง (Cross head speed)	30 mm/min

การวิเคราะห์ค่า tensile strength (TS)

$$TS = \frac{F}{A}$$

เมื่อ F คือ แรงที่มากระทำต่อวัสดุ (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัสดุ ( $\text{mm}^2$ )

การวิเคราะห์ค่า modulus (E)

$$E = \frac{\sigma_x - \sigma_0}{\epsilon_x - \epsilon_0}$$

เมื่อ  $\sigma_0$  คือ ความเค้น ณ จุดเริ่มต้น (MPa,  $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$\sigma_x$  คือ ความเค้น ณ จุดใดๆ (MPa,  $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$\epsilon_0$  คือ ความเครียดเริ่มต้นของตัวอย่าง

$\epsilon_x$  คือ ความเครียด ณ จุดใดๆ ของตัวอย่าง

การวิเคราะห์หา %elongation at break (EB)

$$EB = \frac{(L_f - L_0)}{L_0} \times 100$$

เมื่อ  $L_f$  คือ ความยาวของตัวอย่าง ณ จุดขาด (mm)

$L_0$  คือ ความยาวเริ่มต้นของตัวอย่าง (mm)

## บทที่ 4





### ผลงานวิจัย

4.1 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มผสมระหว่างพอลิ(แลค-แลคไทด์) (PLL), พอลิ(บิวทิลีน อดิเพท-โค-เทอแรพทาเลท) (PBAT) จากภาพถ่ายดิจิทัลโดยวิธีการหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย (Solvent casting method)


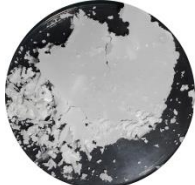


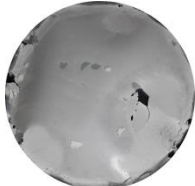

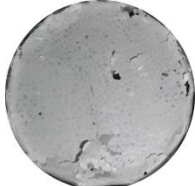
#### 4.1.1 ฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์

การขึ้นรูปโดยวิธีการหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลายของฟิล์มผสม PLL/PBAT ที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์เพื่อดูความเข้ากัน และลักษณะทางกายภาพของฟิล์มผสมในแต่ละอัตราส่วน ที่อัตราส่วน 100/0 จะมีความใสมากเนื่องจากเป็นฟิล์มที่มีแต่ PLL เพียงอย่างเดียว โดย PLL เป็นพอลิเมอร์แบบเส้นที่มี  $-CH_3$  เป็นหมู่แทนที่ เกิดความเกาะกันจึงมีการผลึกสายโซ่หลักให้อยู่ห่างกันทำให้เกิดความใส อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 เริ่มมีความขุ่นมากขึ้นเนื่องจากการเติม PBAT เข้าไป โดย PBAT เป็นโคพอลิเมอร์ที่เรียงกันแบบเส้น และเป็นพอลิเมอร์ที่สายโซ่เรียงชิดกันจึงมีความแข็ง มีสีขุ่น และเหนียว ในอัตราส่วน 60/40, 50/50, 40/60 และ 30/70 ยังสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้แต่จะเห็นความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ส่วนอัตราส่วน 20/80, 10/90 และ 0/100 ไม่สามารถขึ้นรูปฟิล์มได้ เนื่องจาก PBAT มีความแข็ง เมื่อปริมาณมากขึ้นทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ ชิ้นงานมีความเปราะแตกหักได้ง่าย ดังที่แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ภาพถ่ายฟิล์มผสมที่ไม่เติมพลาสติกไซเซอร์

Sample code	Film picture	Sample code	Film picture
PLL		PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub>	
PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>		PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub>	

ตารางที่ 4.1 ภาพถ่ายฟิล์มผสมที่ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์ (ต่อ)

Sample code	Film picture	Sample code	Film picture
PLL <sub>60</sub> /PBAT <sub>40</sub>		PLL <sub>20</sub> /PBAT <sub>80</sub>	
PLL <sub>50</sub> /PBAT <sub>50</sub>		PLL <sub>10</sub> /PBAT <sub>90</sub>	
PLL <sub>40</sub> /PBAT <sub>60</sub>		PLL <sub>0</sub> /PBAT <sub>100</sub>	
PLL <sub>30</sub> /PBAT <sub>70</sub>			














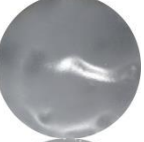














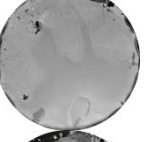



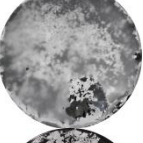



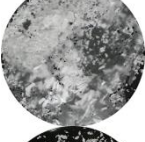
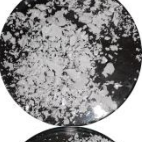

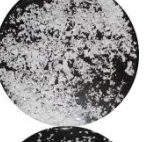
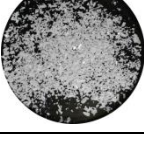
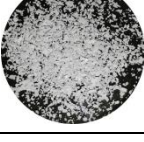


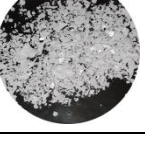
#### 4.1.2 ฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซออร์

การขึ้นรูปโดยวิธีการขึ้นรูปด้วยตัวทำละลายของฟิล์มผสม PLL/PBAT โดยเติมพลาสติกไซเซออร์ทั้งหมด 4 ตัวคือ PEG1500, PEG8000, PEG20000 และ ParaplexG40 ความเข้มข้น 1, 2, 3, 4 และ 5 phr ฟิล์มผสม PLL/PBAT ในอัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 ที่เติมพลาสติกไซเซออร์ทุกตัวและทุกความเข้มข้น สามารถขึ้นรูปได้และมีความเข้ากันที่อัตราส่วน 60/40 และ 50/50 สามารถขึ้นรูปฟิล์มได้ แต่เกิดความไม่เข้ากันของฟิล์มผสมเนื่องจากเริ่มสังเกตเห็นเฟสของ PLL และ PBAT แยกออกจากกันอย่างชัดเจน ในขณะที่อัตราส่วน 40/60 และ 30/70 ขึ้นรูปฟิล์มได้ แต่มีการแตกหักบางส่วน และในอัตราส่วน 20/80 และ 10/90 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากมีปริมาณ PBAT มาก ดังที่แสดงในตารางที่ 4.2-4.5






















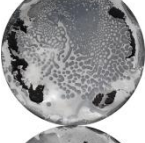



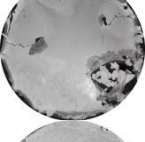

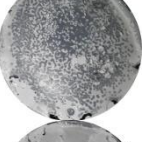


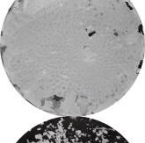
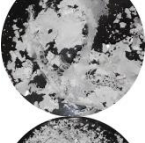
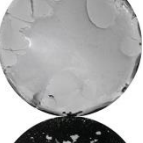
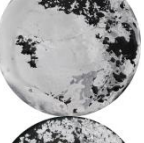
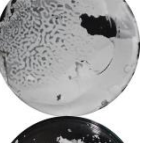

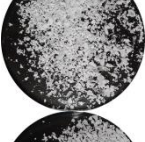
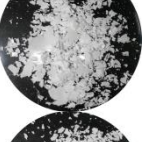
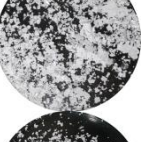
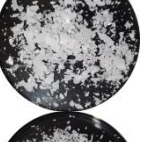





ตารางที่ 4.2 ภาพถ่ายฟิล์มผสมที่เติมพลาสติกไซเซอร์ PEG1500

Film	Concentration of Plasticizer (phr)				
	1	2	3	4	5
PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>					
PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub>					
PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub>					
PLL <sub>60</sub> /PBAT <sub>40</sub>					
PLL <sub>50</sub> /PBAT <sub>50</sub>					
PLL <sub>40</sub> /PBAT <sub>60</sub>					
PLL <sub>30</sub> /PBAT <sub>70</sub>					
PLL <sub>20</sub> /PBAT <sub>80</sub>					
PLL <sub>10</sub> /PBAT <sub>90</sub>					































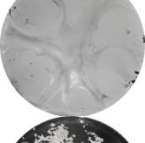



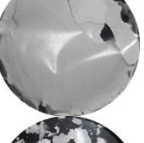
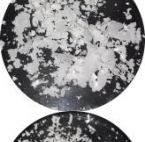

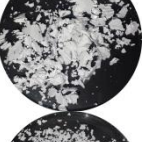

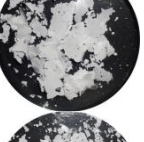





ตารางที่ 4.3 ภาพถ่ายฟิล์มผสมที่เติมพลาสติกไซเซอร์ PEG8000

Film	Concentration of Plasticizer (phr)				
	1	2	3	4	5
PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>					
PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub>					
PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub>					
PLL <sub>60</sub> /PBAT <sub>40</sub>					
PLL <sub>50</sub> /PBAT <sub>50</sub>					
PLL <sub>40</sub> /PBAT <sub>60</sub>					
PLL <sub>30</sub> /PBAT <sub>70</sub>					
PLL <sub>20</sub> /PBAT <sub>80</sub>					
PLL <sub>10</sub> /PBAT <sub>90</sub>					

ตารางที่ 4.4 ภาพถ่ายฟิล์มผสมที่เติมพลาสติกไซเซอร์ PEG20000

Film	Concentration of Plasticizer (phr)				
	1	2	3	4	5
PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>					
PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub>					
PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub>					
PLL <sub>60</sub> /PBAT <sub>40</sub>					
PLL <sub>50</sub> /PBAT <sub>50</sub>					
PLL <sub>40</sub> /PBAT <sub>60</sub>					
PLL <sub>30</sub> /PBAT <sub>70</sub>					
PLL <sub>20</sub> /PBAT <sub>80</sub>					
PLL <sub>10</sub> /PBAT <sub>90</sub>					

ตารางที่ 4.5 ภาพถ่ายฟิล์มผสมที่เติมพลาสติกไซเซอร์ ParaplexG40

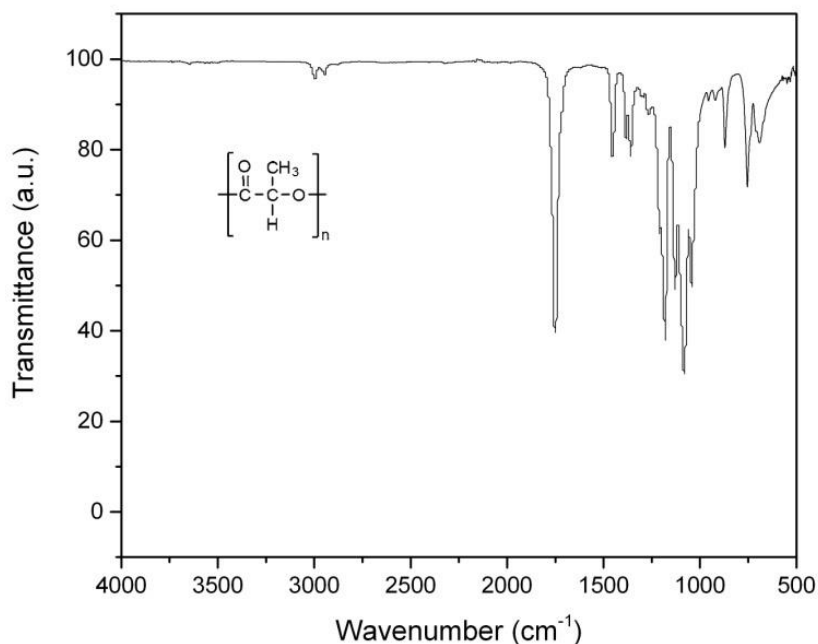
Film	Concentration of Plasticizer (phr)				
	1	2	3	4	5
PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>					
PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub>					
PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub>					
PLL <sub>60</sub> /PBAT <sub>40</sub>					
PLL <sub>50</sub> /PBAT <sub>50</sub>					
PLL <sub>40</sub> /PBAT <sub>60</sub>					
PLL <sub>30</sub> /PBAT <sub>70</sub>					
PLL <sub>20</sub> /PBAT <sub>80</sub>					
PLL <sub>10</sub> /PBAT <sub>90</sub>					



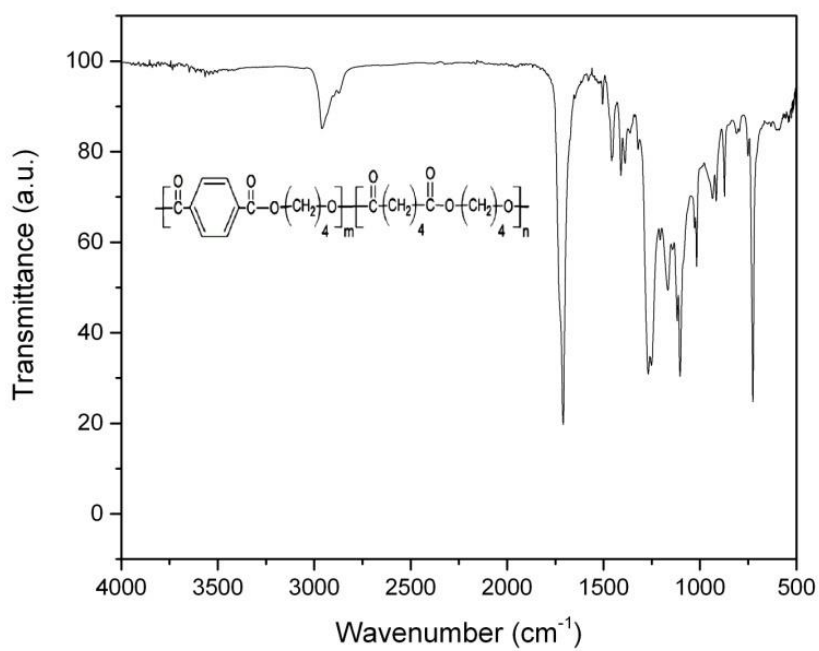
## 4.2 ผลการวิเคราะห์ทางโครงสร้างทางเคมีของฟิล์มผสมโดยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบฟูเรียร์ทรานซ์ฟอร์ม (Fourier Transform–Infrared Spectroscopy)

เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบฟูเรียร์ทรานซ์ฟอร์มเป็นการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสาร เพื่อเป็นการยืนยันโครงสร้างและบ่งบอกลักษณะการเชื่อมของโมเลกุลในโครงสร้าง โดยการวิเคราะห์สเปกตรัมอินฟราเรดของฟิล์ม PLL, PBAT, PEG และ ParaplexG40 ในช่วงเลขคลื่น 4000–500  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงให้เห็นดังภาพที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.11 ตามลำดับ รวมไปถึงแสดงรายละเอียดการแปลผลสเปกตรัมดังตารางที่ 4.6 และ 4.7

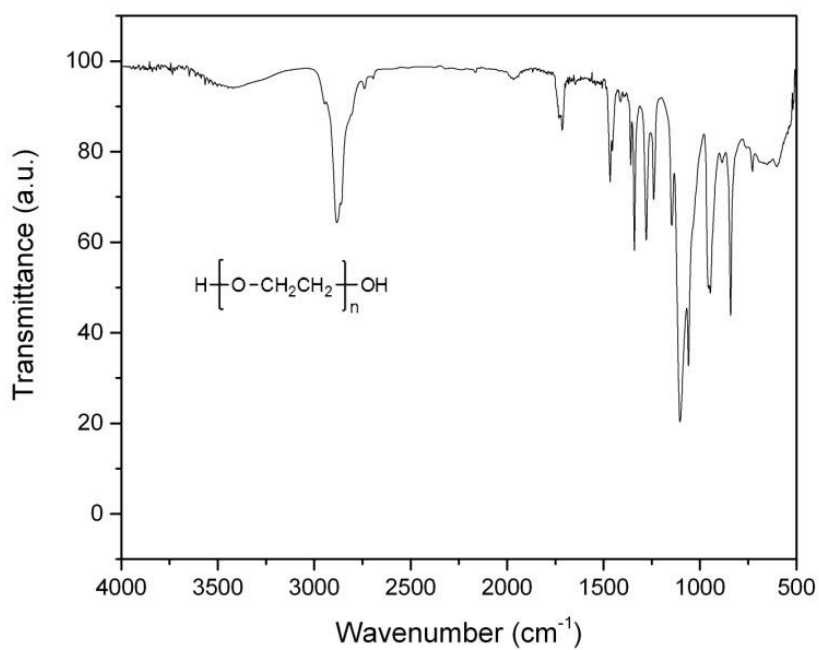
การวิเคราะห์สเปกตรัมอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของฟิล์มผสม PLL/PBAT อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 ที่เติมพลาสติกไซเซออร์ PEG1500, PEG8000, PEG20000 และ ParaplexG40 ความเข้มข้น 0–5 phr ดังแสดงในภาพที่ 4.4–4.12 และ 4.14–4.16 เพื่อดูความเข้ากันของฟิล์มในทางเคมี โดยวิเคราะห์ในช่วงเลขคลื่น 4000–500  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงอินฟราเรดสเปกตรัมดังภาพที่ 4.17 และเปรียบเทียบฟิล์ม PLL, PBAT, PEG, ParaplexG40 และ PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub> ที่ใส่พลาสติกไซเซออร์ PEG และ ParaplexG40



ภาพที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PLL



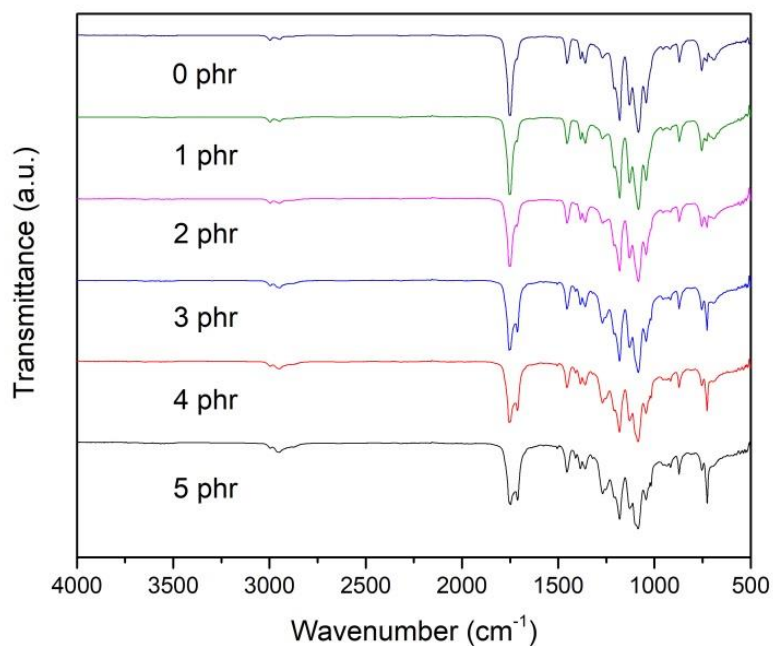
ภาพที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PBAT



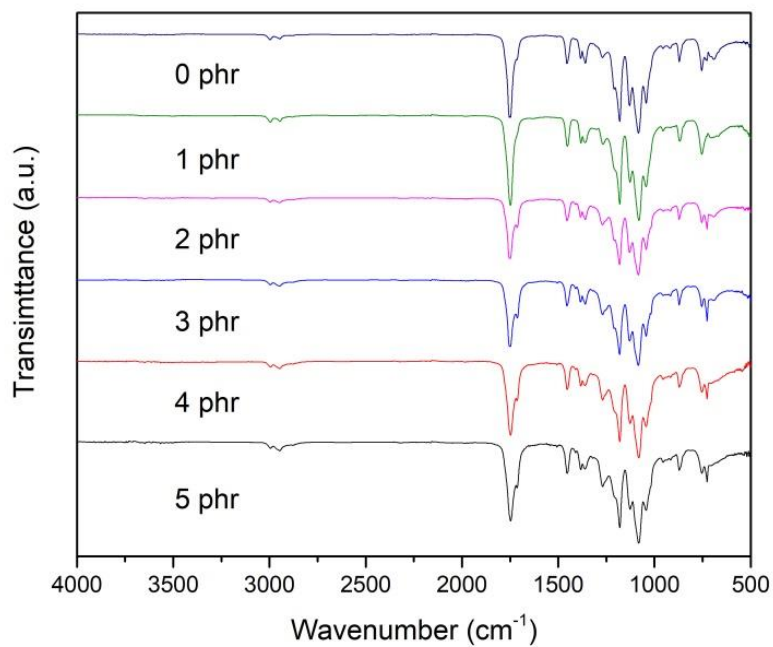
ภาพที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PEG

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL, PBAT, PEG, PLL/PBAT และ PLL/PBAT ที่เติม PEG

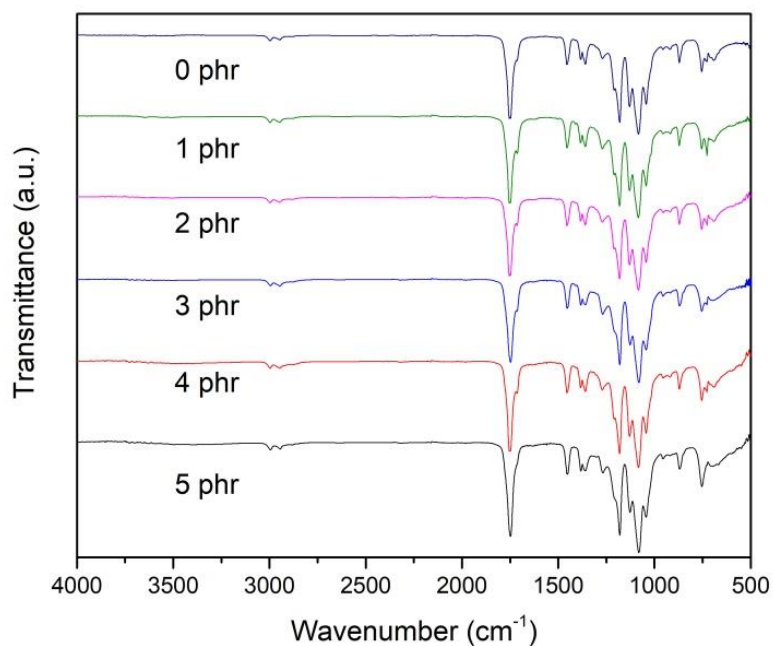
พันธะและชนิด การสั่น	Wavelength (cm <sup>-1</sup> )						
	PLL	PBAT	PEG 1500	PEG 8000	PEG 20000	PLL <sub>90</sub> / PBAT <sub>10</sub>	PLL/PBAT/ PEG1500
O-H stretching			3420	3566	3566		
-CH <sub>3</sub> stretching	2996 2945					2994	2996
-CH <sub>2</sub> - stretching		2959	2882	2880	2880	2950	2947
C=O stretching	1747	1709	1714		1715	1748	1747
C-O stretching						1711	1712
Benzene ring		1505				1506	
-CH <sub>3</sub> bending	1455					1455	1455
-CH <sub>2</sub> - bending		1410	1440	1440	1440	1410	
		1388	1359	1359	1359	1385	
-CH- bending	1382 1359					1360	1384 1359
C-O stretching		1268	1278	1278	1278	1269	1269
C-O-C stretching	1180 1082 1043		1146 1103 1059	1145 1094 1059	1145 1095 1059	1180 1084 1043	1181, 1129 1084 1043
C-O left-right stretching		1103					
-H phenyl ring		1017				1018	
Trans C-O stretching		935					
O-CH-CH <sub>3</sub>	870					872	871
-CH <sub>3</sub> bending	754					753	754
-CH- benzene		725				726	726



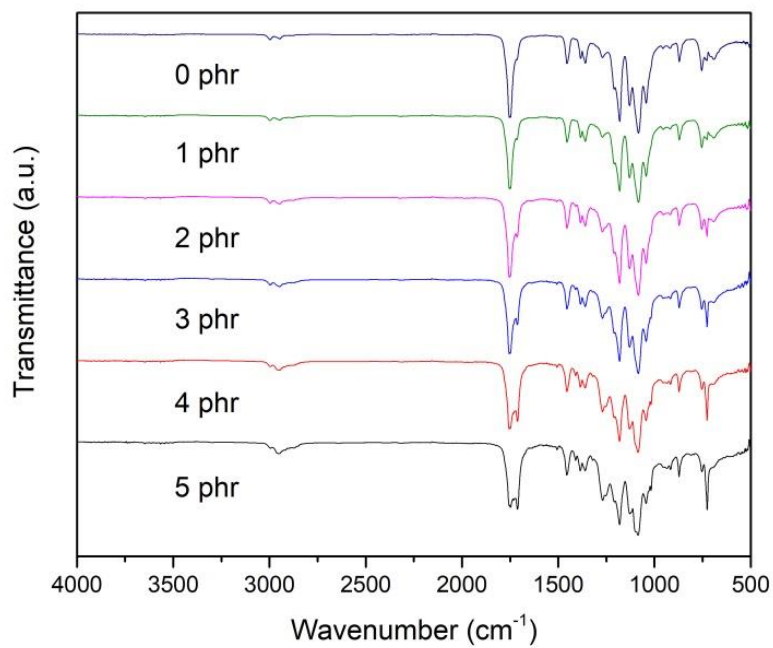
ภาพที่ 4.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub> เต็ม PEG1500 ความเข้มข้น 0-5 phr



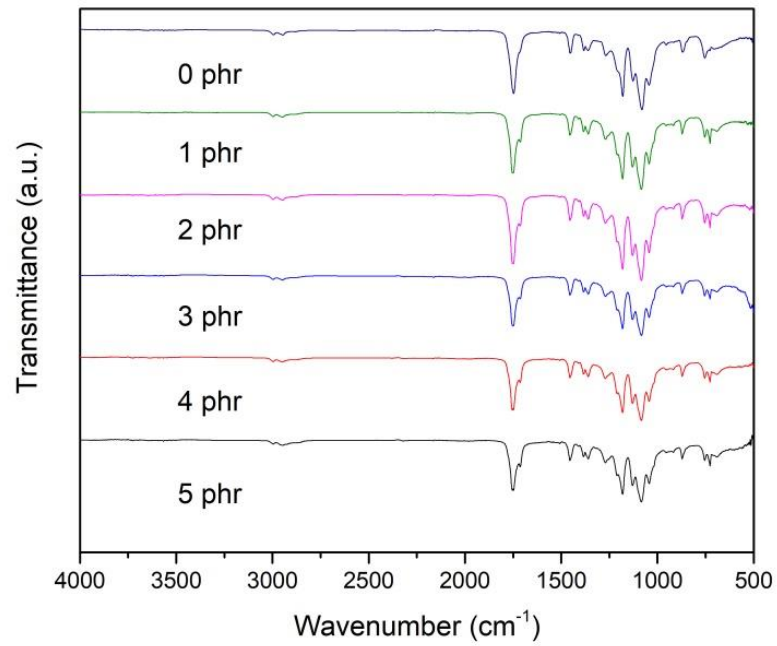
ภาพที่ 4.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub> เต็ม PEG8000 ความเข้มข้น 0-5 phr



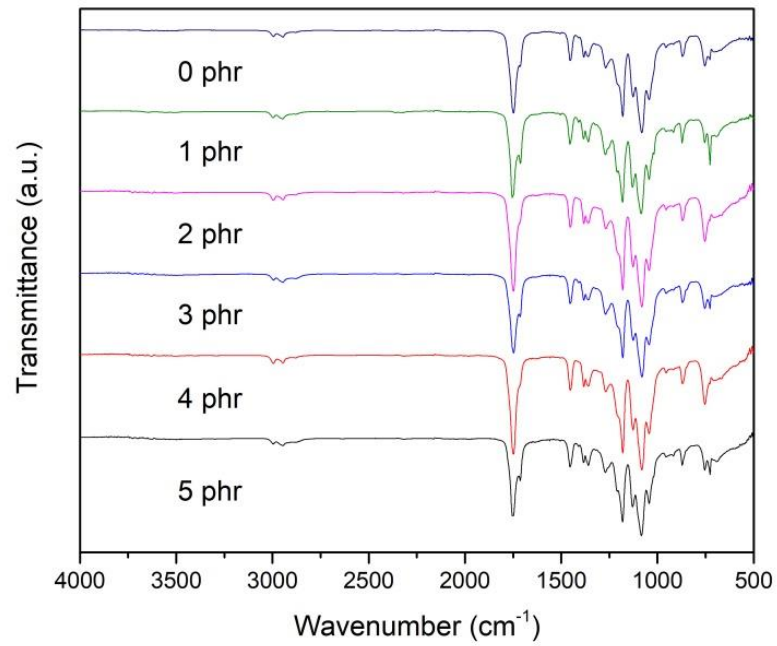
ภาพที่ 4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub> เต็ม PEG20000 ความเข้มข้น 0-5 phr



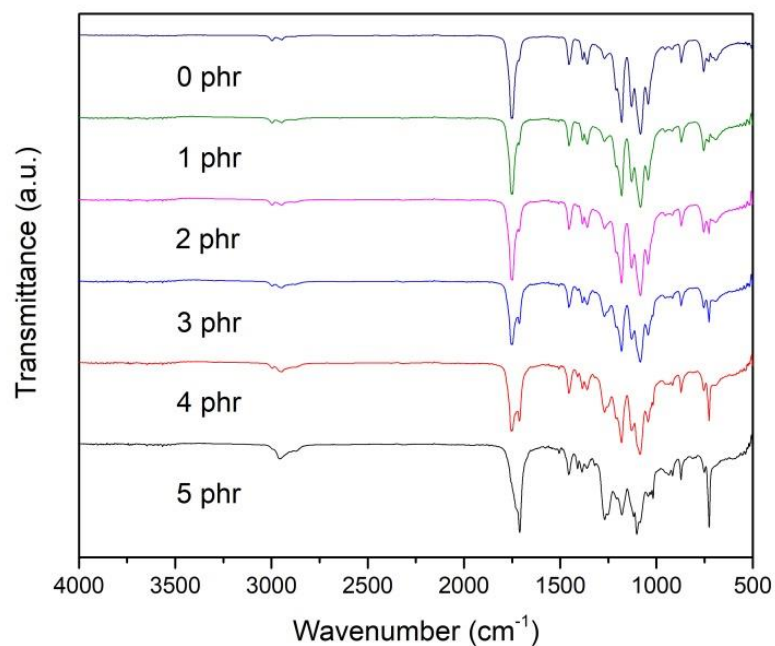
ภาพที่ 4.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL<sub>80</sub>/PBAT<sub>20</sub> เต็ม PEG1500 ความเข้มข้น 0-5 phr



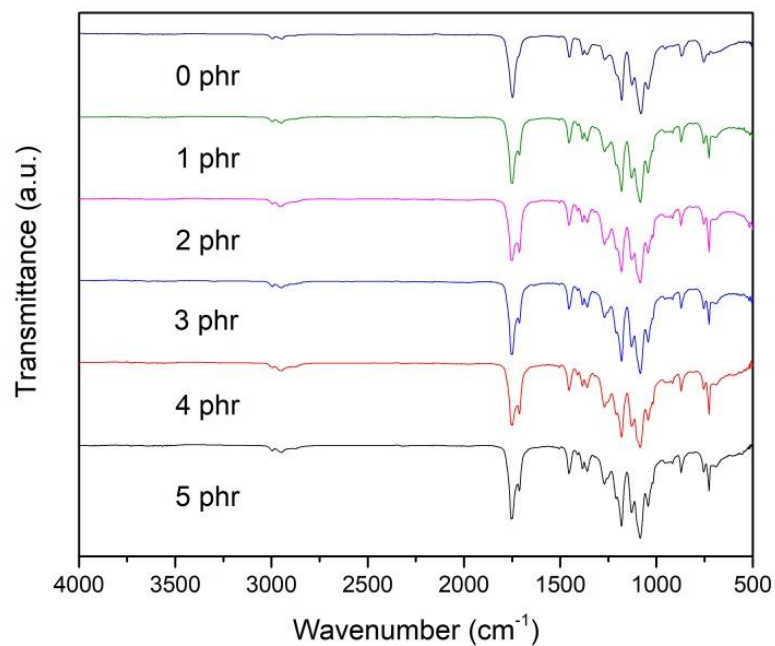
ภาพที่ 4.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL<sub>80</sub>/PBAT<sub>20</sub> เต็ม PEG8000 ความเข้มข้น 0-5 phr



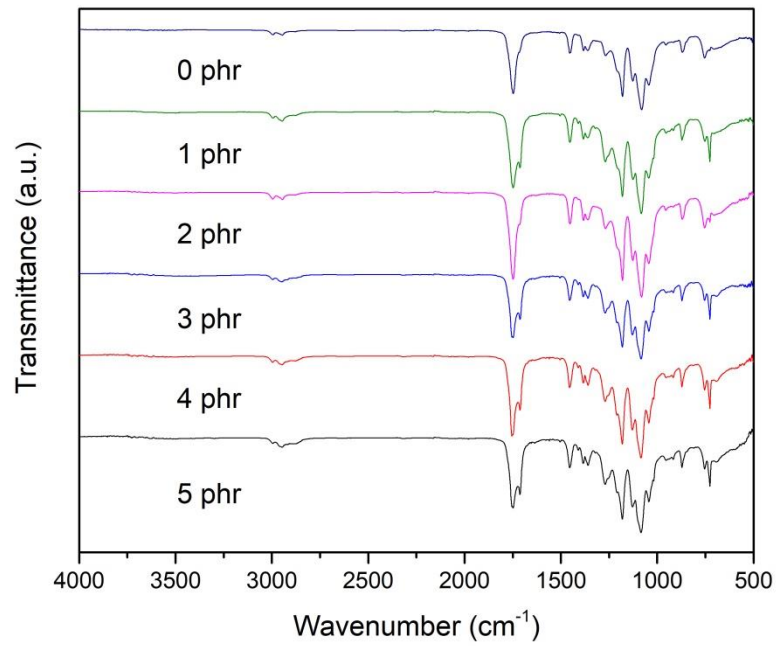
ภาพที่ 4.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL<sub>80</sub>/PBAT<sub>20</sub> เต็ม PEG20000 ความเข้มข้น 0-5 phr



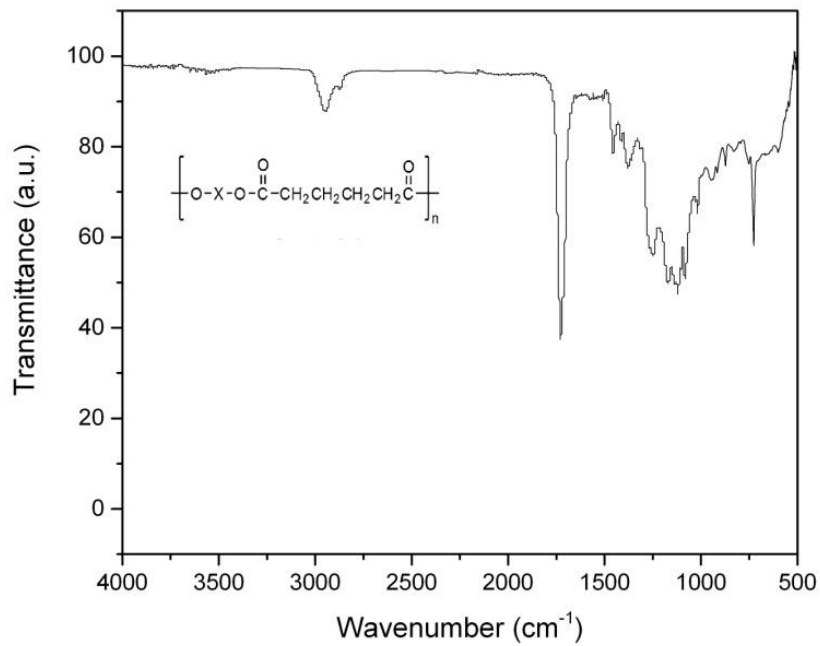
ภาพที่ 4.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL<sub>70</sub>/PBAT<sub>30</sub> เต็ม PEG1500 ความเข้มข้น 0-5 phr



ภาพที่ 4.11 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL<sub>70</sub>/PBAT<sub>30</sub> เต็ม PEG8000 ความเข้มข้น 0-5 phr



ภาพที่ 4.12 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL<sub>70</sub>/PBAT<sub>30</sub> เติม PEG20000 ความเข้มข้น 0-5 phr

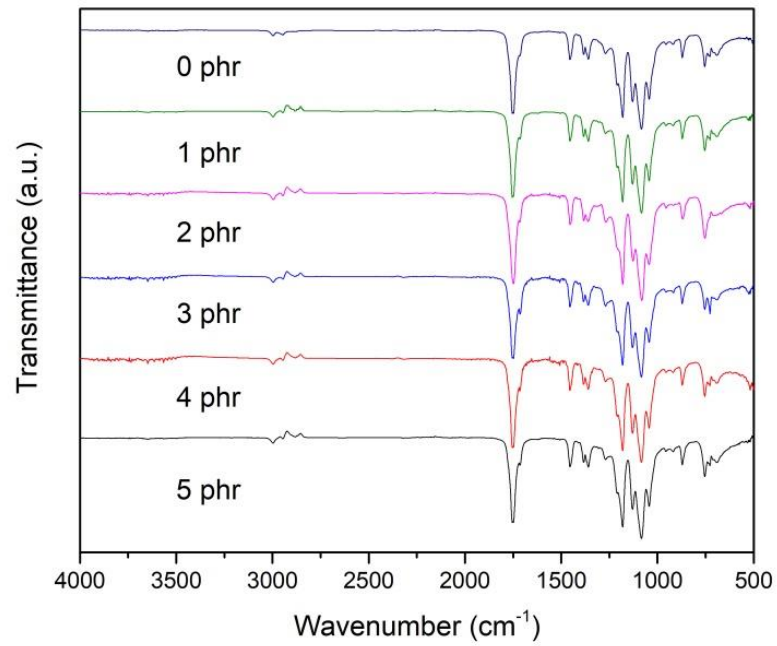


ภาพที่ 4.13 อินฟราเรดสเปกตรัมของ ParaplexG40

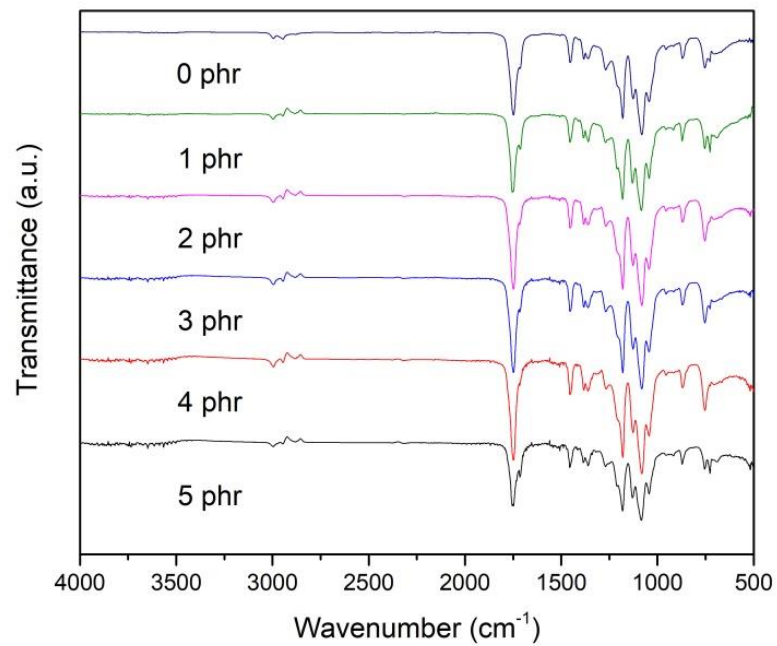


ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL, PBAT, PLL/PBAT และ PLL/PBAT ที่เติม ParaplexG40

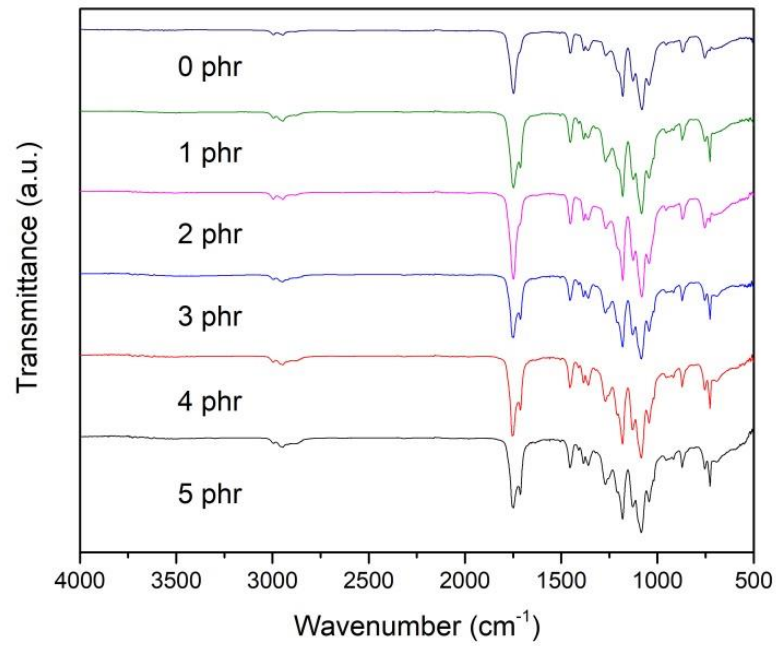
พันธะและชนิดการสั่น	Wavelength (cm <sup>-1</sup> )				
	PLL	PBAT	G40	PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>	PLL/PBAT/G40
O-H stretching					
-CH <sub>3</sub> stretching	2996			2994	2995
	2945				
-CH <sub>2</sub> - stretching		2959	2942	2950	2947
C=O stretching	1747	1709	1728	1748	1747
C-O stretching				1711	
Benzene ring		1505		1506	
-CH <sub>3</sub> bending	1455			1455	1453
-CH <sub>2</sub> - bending		1410	1417	1410	
		1388	1377	1385	
-CH- bending	1382			1360	1382
	1359				1360
C-O stretching		1268	1250	1269	
C-O-C stretching	1180		1170	1180	1180, 1127
	1082		1082	1084	1081
	1043			1043	1043
C-O left-right stretching		1103			
-H phenyl ring bending		1017		1018	
Trans C-O stretching		935			955
O-CH-CH <sub>3</sub>	870			872	870
-CH <sub>3</sub> bending	754			753	753
-CH- benzene		725		726	



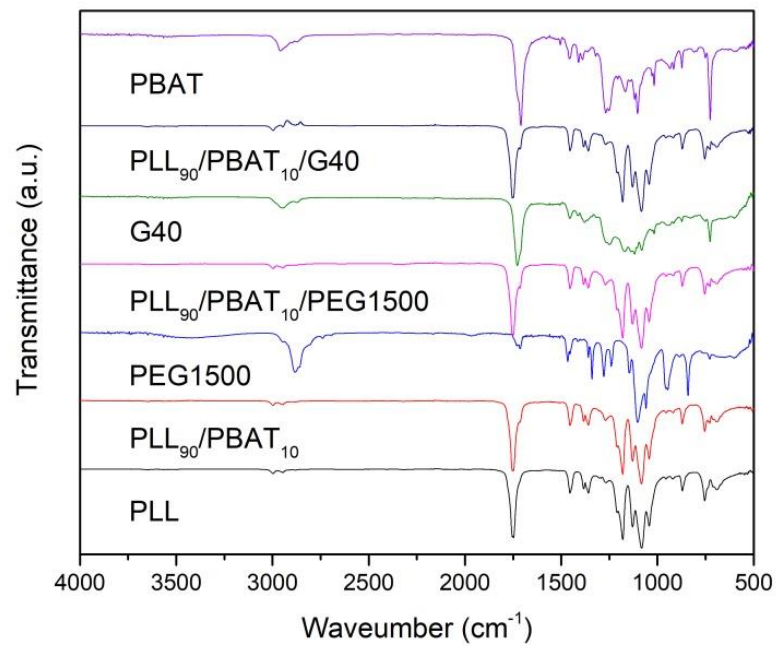
ภาพที่ 4.14 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub> เต็ม ParaplexG40 ความเข้มข้น 0-5 phr



ภาพที่ 4.15 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL<sub>80</sub>/PBAT<sub>20</sub> เต็ม ParaplexG40 ความเข้มข้น 0-5 phr



ภาพที่ 4.16 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL<sub>70</sub>/PBAT<sub>30</sub> เต็ม ParaplexG40 ความเข้มข้น 0-5 phr



ภาพที่ 4.17 อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PLL, PBAT, PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub>, PEG1500, ParaplexG40, PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub>/PEG1500 และ PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub>/G40

จากผลการวิเคราะห์สเปกตรอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของฟิล์ม PLL, PBAT, PEG, ParaplexG40, ฟิล์มผสม PLL/PBAT ที่ทำการเติมพลาสติกไซเซออร์ PEG และ ParaplexG40 เป็นการศึกษาระหว่างกันของ PLL, PBAT, PEG และ ParaplexG40 ที่สเปกตรัมของฟิล์ม PLL/PBAT ที่เติม PEG พบตำแหน่งการดูดกลืนของ C=O stretching ของ PLL และ PEG ที่  $1747\text{ cm}^{-1}$  และยังพบตำแหน่งที่  $1712\text{ cm}^{-1}$  เป็นตำแหน่งการดูดกลืนของ C=O stretching ของ PBAT ที่มีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ และพบการการดูดกลืนของ  $-\text{CH}_3$  bending ของ PLL ที่  $1455\text{ cm}^{-1}$  พบการการดูดกลืนของ C-O stretching ของ PBAT และ PEG ที่  $1268\text{ cm}^{-1}$  และพบการดูดกลืนของ  $-\text{CH}$  plane bending ของวงเบนซีนของ PBAT ที่  $726\text{ cm}^{-1}$  ส่วนสเปกตรัมของฟิล์ม PLL/PBAT ที่เติม ParaplexG40 พบตำแหน่งการดูดกลืนของ  $-\text{CH}_2-$  stretching ของ PBAT และ ParaplexG40 ที่  $2947\text{ cm}^{-1}$  และพบตำแหน่งการดูดกลืนของ C=O stretching ของ PLL และ ParaplexG40 ที่  $1747\text{ cm}^{-1}$  พิคของ PLL, PBAT และ PEG ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากที่ทำการผสมแล้ว แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด และพลาสติกไซเซออร์ไม่มีการเกิดพันธะทางเคมีต่อกัน แต่เนื่องจากปริมาณพลาสติกไซเซออร์ที่เพิ่มขึ้น จึงเกิด free volume ระหว่างสายโซ่เพิ่มมากขึ้น ทำให้แรง dipole-dipole ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ลดลง ส่งผลให้ค่า wavenumber ณ ตำแหน่ง C=O stretching เลื่อนไปทางค่า wavenumber ที่ต่ำลง

#### 4.3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงของฟิล์มผสม

##### 4.3.1 ฟิล์มผสมที่ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PLL โดยเครื่องเทนไซต์ พบว่ามีค่า tensile strength, stress at break, modulus และ %elongation at break ของฟิล์ม PLL มีค่าเท่ากับ  $31.43 \pm 3.36\text{ MPa}$ ,  $24.29 \pm 7.35\text{ MPa}$ ,  $1341.52 \pm 35.80\text{ MPa}$  และ  $2.57 \pm 0.50\%$  ตามลำดับ เมื่อเติม PBAT ลงไป ส่งผลให้ค่า tensile strength, stress at break และ modulus ลดลง แต่ %elongation at break จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากอิทธิพลของการเติม PBAT ซึ่งมีความยืดหยุ่นแต่แข็งเปราะ และ PBAT มีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำกว่า PLL เป็นผลให้ปรับปรุงความเหนียวของฟิล์มผสมระหว่าง PLL กับ PBAT ดังแสดงในตารางที่ 4.8

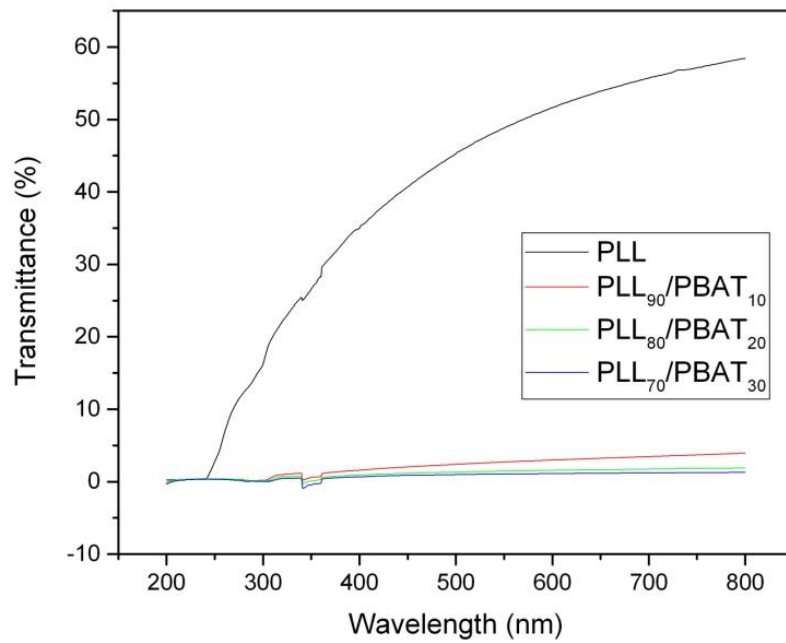
**ตารางที่ 4.8** สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสมที่ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์

Film	Tensile strength (MPa)	Stress at break (MPa)	Modulus (MPa)	%Elongation at break (%)
PLL	31.43±3.36	24.29±7.35	1341.52±35.80	2.57±0.50
PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>	28.53±2.05	28.08±2.26	1302.28±89.27	2.58±0.19
PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub>	24.50±2.19	22.58±2.81	1246.44±94.40	2.64±0.38
PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub>	21.60±1.70	18.37±1.39	1164.87±52.68	3.51±1.59

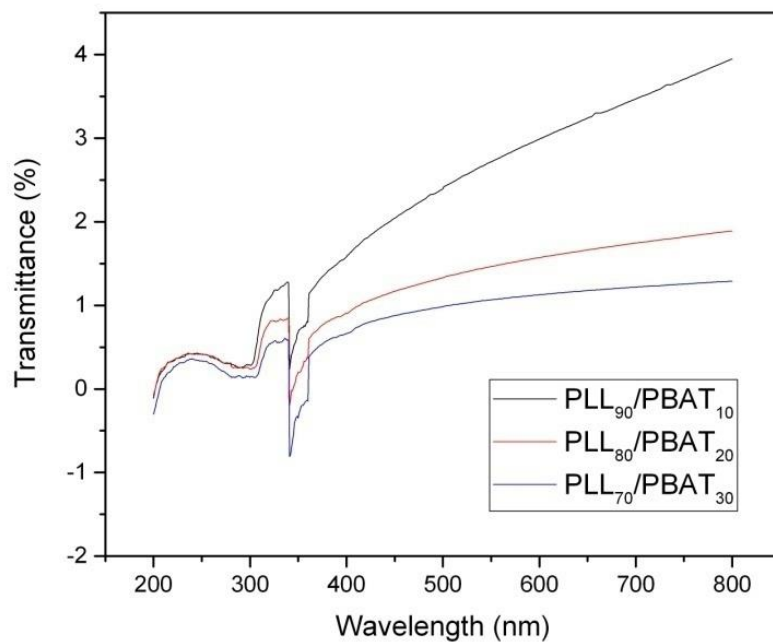
นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์คุณสมบัติการส่องผ่านแสงของฟิล์มด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี (UV-Visible spectroscopy) ซึ่งจะทำการวัดที่ความยาวคลื่น 200–800 nm คุณสมบัติการส่องผ่านของแสงและคุณสมบัติการป้องกันรังสียูวีของฟิล์มจะทำการวิเคราะห์ที่ความยาวคลื่น 660 nm ( $T_{660}$ ) และ 280 nm ( $T_{280}$ ) ตามลำดับ ฟิล์ม PLL มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงช่วงวิสิเบิล 54.28±0.04% และช่วงยูวี 12.32±0.04% ดังที่แสดงในตารางที่ 4.9 เมื่อเติม PBAT ลงไปทำให้เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงลดลงอย่างมาก ดังภาพที่ 4.18 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่ลดลงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการผสมของ PBAT ที่เติมลงไป ดังภาพที่ 4.19 เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของ PBAT มีความขุ่น และมีโครงสร้างที่มีหมู่ฟังก์ชันของวงเบนซีน และกรดเบนโซอิกที่สามารถป้องกันรังสียูวีจึง ส่งผลให้ % $T_{280}$  ลดลง

**ตารางที่ 4.9** เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์

Film	Transmittance (%)	
	$T_{660}$	$T_{280}$
PLL	54.227±0.043	12.323±0.035
PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>	3.300±0.002	0.310±0.013
PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub>	1.680±0.001	0.292±0.022
PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub>	1.186±0.001	0.154±0.012



ภาพที่ 4.18 เปรอ์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์ม PLL และฟิล์มผสม PLL/PBAT



ภาพที่ 4.19 เปรอ์เซ็นต์การส่องผ่านแสงแต่ละอัตราส่วนของฟิล์มผสม PLL/PBAT

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการส่องผ่านแสงของฟิล์มผสม PLL/PBAT ที่ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์ ค่า %elongation at break เพิ่มขึ้น เพราะ PBAT มีความแข็งแรง แต่ %elongation at break เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ทำให้ทราบได้ว่าฟิล์มยังมีความเปราะ ไม่ยืดหยุ่น เนื่องจากความเข้ากันได้บางส่วนของ PLL และ PBAT จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติม โดยการเติมพลาสติกไซเซออร์ PEG1500, PEG8000, PEG20000 และ ParaplexG40 ลงในฟิล์มผสม

#### 4.3.2 ฟิล์มผสมที่เติมพลาสติกไซเซออร์ PEG

##### 4.3.2.1 สมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงของฟิล์มผสมที่เติม PEG1500 เป็นพลาสติกไซเซออร์

เมื่อพิจารณาค่าสมบัติเชิงกลที่ได้มีค่า %elongation at break เพิ่มขึ้น เมื่อเติม PEG1500 เนื่องจากพลาสติกไซเซออร์จะเข้าไปทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ที่ติดกันอ่อนตัวลง เมื่อปริมาณของ PBAT และความเข้มข้นของพลาสติกไซเซออร์ที่ใส่ลงไปเพิ่มขึ้น %elongation at break จะเพิ่มมากยิ่งขึ้นเพราะ PBAT มีความแข็งแรง และเหนียว และพลาสติกไซเซออร์ที่ใส่ลงไปมีปริมาณมากขึ้นตามความเข้มข้นที่มากขึ้นทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์ยิ่งอ่อนตัวลง และยังส่งผลให้ค่า tensile strength, stress at break และ modulus ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสมเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ PEG1500

Film	Conc. of plasticizer (phr)	Tensile strength (MPa)	Stress at break (MPa)	Modulus (MPa)	%Elongation at break (%)
PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>	-	28.53±2.05	28.08±2.26	1302.28±89.27	2.58±0.19
	1	29.32±0.51	21.70±4.72	1468.76±64.58	56.81±28.65
	2	28.97±0.55	23.00±2.29	1396.46±23.37	121.41±9.52
	3	27.16±0.43	19.45±7.38	1124.20±37.89	127.97±17.87
	4	20.76±0.23	17.51±1.30	995.57±41.70	135.61±13.72
	5	26.83±1.60	22.73±1.27	763.34±26.59	144.06±8.89

ตารางที่ 4.10 สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสมเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ PEG1500 (ต่อ)

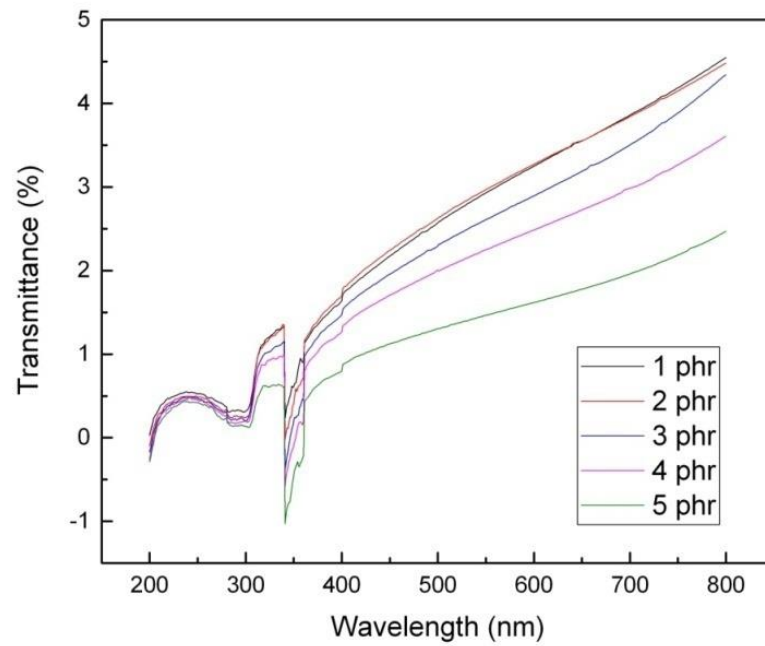
Film	Conc. of plasticizer (phr)	Tensile strength (MPa)	Stress at break (MPa)	Modulus (MPa)	%Elongation at break (%)
PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub>	-	24.50±2.19	22.58±2.81	1246.44±94.40	2.64±0.38
	1	25.23±0.57	21.86±0.93	1229.12±35.74	81.95±7.89
	2	24.55±0.82	19.31±6.53	1156.43±33.01	86.48±15.55
	3	22.63±0.56	19.91±0.77	1166.54±42.86	121.25±11.73
	4	23.8±1.14	19.56±0.60	1127.14±67.28	134.46±13.71
	5	24.07±1.32	21.29±1.30	1065.81±93.05	139.04±8.04
PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub>	-	21.60±1.70	18.37±1.39	1164.87±52.68	3.51±1.59
	1	20.87±0.70	18.75±1.19	1124.20±37.89	77.94±8.56
	2	18.49±0.61	16.33±0.83	838.07±31.71	123.03±10.16
	3	19.16±0.92	17.10±1.04	839.47±91.47	132.42±5.66
	4	16.41±0.42	14.68±0.65	797.11±60.75	136.10±7.14
	5	20.99±0.36	18.16±0.70	852.07±26.00	136.60±16.73

คุณสมบัติโปร่งแสงของฟิล์มผสม PLL/PBAT เมื่อเติม PEG1500 ลงไป ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.20 และตารางที่ 4.11 เมื่อเปรียบเทียบกับแต่ละอัตราส่วนของฟิล์มผสมที่ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์ พบว่าฟิล์มจะมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของฟิล์มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PEG1500 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของฟิล์มจะลดลง ดังภาพที่ 4.21 แสดงให้เห็นถึงปริมาณของ PEG1500 ที่มากเกินไปสำหรับการเกิด interaction กับฟิล์มผสม ทำให้เกิดผลึกและฟิล์มผสมมีความโปร่งแสงลดลง

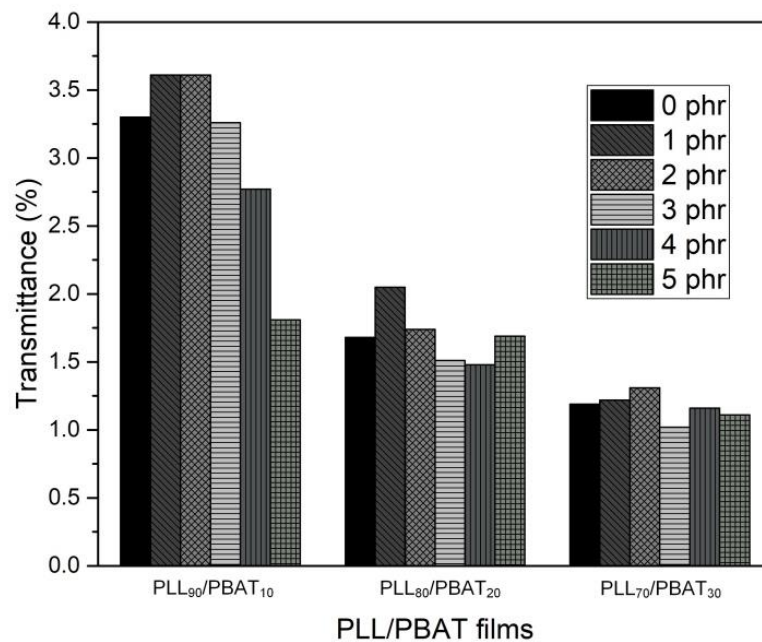


ตารางที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มผสมเม็ดเติมพลาสติกไซเซออร์ PEG1500

Film	Concentration of plasticizer (phr)	Transmittance (%)	
		T <sub>660</sub>	T <sub>280</sub>
PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>	–	3.300±0.002	0.310±0.013
	1	3.608±0.001	0.375±0.021
	2	3.607±0.002	0.333±0.031
	3	3.261±0.001	0.308±0.025
	4	2.772±0.004	0.262±0.028
	5	1.812±0.001	0.233±0.023
PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub>	–	1.680±0.001	0.292±0.022
	1	2.045±0.002	–0.358±0.037
	2	1.741±0.000	–0.448±0.027
	3	1.507±0.001	–0.458±0.021
	4	1.478±0.000	–0.512±0.040
	5	1.691±0.000	–0.515±0.028
PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub>	–	1.186±0.001	0.154±0.012
	1	1.217±0.000	–0.415±0.008
	2	1.308±0.003	–0.429±0.046
	3	1.023±0.002	–0.484±0.014
	4	1.159±0.001	–0.550±0.037
	5	1.107±0.001	–0.571±0.023



ภาพที่ 4.20 เปอร์เซนต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มผสมอัตราส่วน PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub> เมื่อเติม PEG1500



ภาพที่ 4.21 เปรียบเทียบเปอร์เซนต์การส่องผ่านแสง  $T_{660}$  ของฟิล์ม PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub>, PLL<sub>80</sub>/PBAT<sub>20</sub> และ PLL<sub>70</sub>/PBAT<sub>30</sub> ที่เติมพลาสติกไซเซออร์ PEG1500 0-5 phr

#### 4.3.2.2 สมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงของฟิล์มผสมที่เติม PEG8000 เป็นพลาสติกไซเซออร์

พิจารณาค่าสมบัติเชิงกลเมื่อ PEG8000 พบว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น ค่า %elongation at break จะลดลง แสดงให้เห็นถึงปริมาณของ PEG ที่มากเกินไปสำหรับการเกิด interaction กับฟิล์มผสม ทำให้ PEG เกิดผลึก ซึ่งจะทำให้สมบัติเชิงกล และความโปร่งแสงลดลง ดังตารางที่ 4.12 และ 4.13 แสดงค่า %elongation at break มีค่ามากที่สุดที่ความเข้มข้น 1 phr ในทุกอัตราส่วน ส่วน tensile strength, stress at break และ modulus จะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของ PEG8000 เพิ่มมากขึ้น และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านที่ความยาวคลื่น 660 nm (%T<sub>660</sub>) ต่ำสุดของฟิล์ม PLL/PBAT ในอัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 ที่เติม PEG8000 เท่ากับ 1.33±0.00, 1.38±0.00 และ 1.18±0.00 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.22

ตารางที่ 4.12 สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสมเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ PEG8000

Film	Conc. of plasticizer (phr)	Tensile strength (MPa)	Stress at break (MPa)	Modulus (MPa)	%Elongation at break (%)
PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>	-	28.53±2.05	28.08±2.26	1302.28±89.27	2.58±0.19
	1	29.59±1.01	24.50±1.33	1495.25±76.61	158.97±10.90
	2	29.13±1.14	21.00±3.52	1287.54±47.99	146.49±27.15
	3	25.5±1.74	21.99±1.18	1235.31±41.59	108.72±4.65
	4	22.66±0.99	14.53±1.90	1025.03±15.99	21.04±6.91
	5	20.89±1.63	18.03±1.75	941.78±78.57	5.05±0.78
PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub>	-	24.50±2.19	22.58±2.81	1246.44±94.40	2.64±0.38
	1	25.01±0.85	19.72±3.29	1133.72±61.31	131.46±15.96
	2	24.03±0.48	18.10±5.73	1045.32±63.16	112.72±26.17
	3	22.29±0.46	19.74±0.91	1058.43±41.26	118.52±21.47
	4	20.83±0.75	10.49±1.98	1016.03±38.66	12.60±7.21
	5	20.48±1.11	18.69±1.29	954.70±39.41	4.55±0.46

ตารางที่ 4.12 สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสมเม็ดเติมพลาสติกไซเซออร์ PEG8000 (ต่อ)

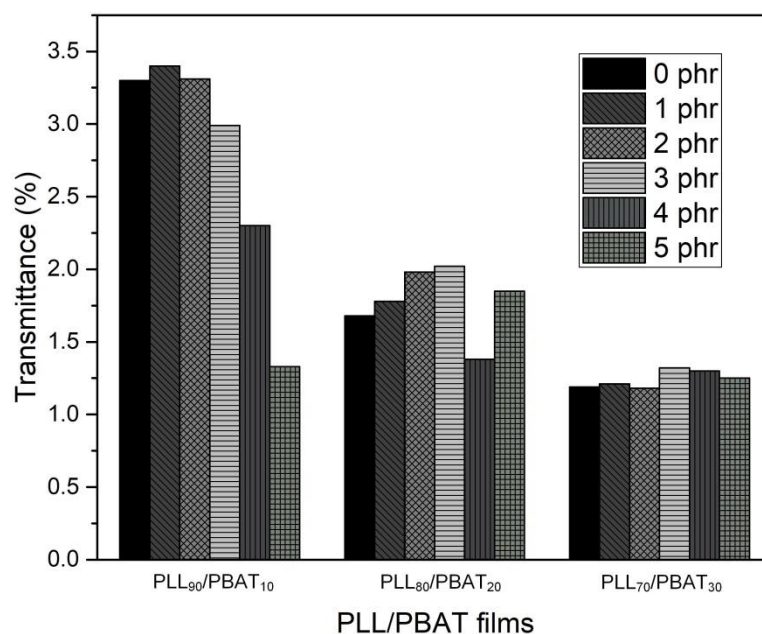
Film	Conc. of plasticizer (phr)	Tensile strength (MPa)	Stress at break (MPa)	Modulus (MPa)	%Elongation at break (%)
PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub>	-	21.60±1.70	18.37±1.39	1164.87±52.68	3.51±1.59
	1	20.58±0.70	17.07±2.15	779.07±51.64	95.13±6.38
	2	18.12±0.37	16.43±1.24	727.16±40.29	102.78±13.81
	3	18.87±0.95	15.91±0.80	728.36±33.66	99.04±10.04
	4	18.43±0.51	9.73±2.66	786.02±27.75	15.08±4.93
	5	18.07±0.52	10.09±2.09	741.16±30.17	23.18±9.76

ตารางที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซออร์ PEG8000

Film	Concentration of plasticizer (phr)	Transmittance (%)	
		T <sub>660</sub>	T <sub>280</sub>
PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>	-	3.300±0.002	0.310±0.013
	1	3.401±0.006	0.138±0.010
	2	3.308±0.001	-0.124±0.003
	3	2.992±0.006	-0.147±0.019
	4	2.303±0.003	-0.203±0.018
	5	1.327±0.006	-0.231±0.040
PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub>	-	1.680±0.001	0.292±0.022
	1	1.776±0.004	-0.424±0.038
	2	1.981±0.002	-0.449±0.001
	3	2.020±0.002	-0.502±0.004
	4	1.378±0.005	-0.570±0.038
	5	1.850±0.001	-0.599±0.006

ตารางที่ 4.13 เปอร์เซนต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซอร์ PEG8000 (ต่อ)

Film	Concentration of plasticizer (phr)	Transmittance (%)	
		T <sub>660</sub>	T <sub>280</sub>
PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub>	–	1.186±0.001	0.154±0.012
	1	1.206±0.003	-0.456±0.030
	2	1.182±0.004	-0.478±0.039
	3	1.341±0.004	-0.501±0.025
	4	1.305±0.001	-0.573±0.018
	5	1.252±0.001	-0.577±0.016



ภาพที่ 4.22 เปรียบเทียบเปอร์เซนต์การส่องผ่านแสง T<sub>660</sub> ของฟิล์ม PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub>, PLL<sub>80</sub>/PBAT<sub>20</sub> และ PLL<sub>70</sub>/PBAT<sub>30</sub> ที่เติมพลาสติกไซเซอร์ PEG8000 0-5 phr

#### 4.3.2.3 สมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงของฟิล์มผสมที่เติม PEG20000 เป็นพลาสติกไซเซอร์

พิจารณาค่าสมบัติเชิงกลเมื่อเติม PEG20000 พบว่าที่ความเข้มข้น 1-4 phr %elongation at break จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ และจะลดลงที่ความเข้มข้น 5 phr แสดงให้เห็นถึงปริมาณของ PEG ที่มากเกินไปสำหรับการเกิด interaction กับฟิล์มผสม ทำให้ PEG

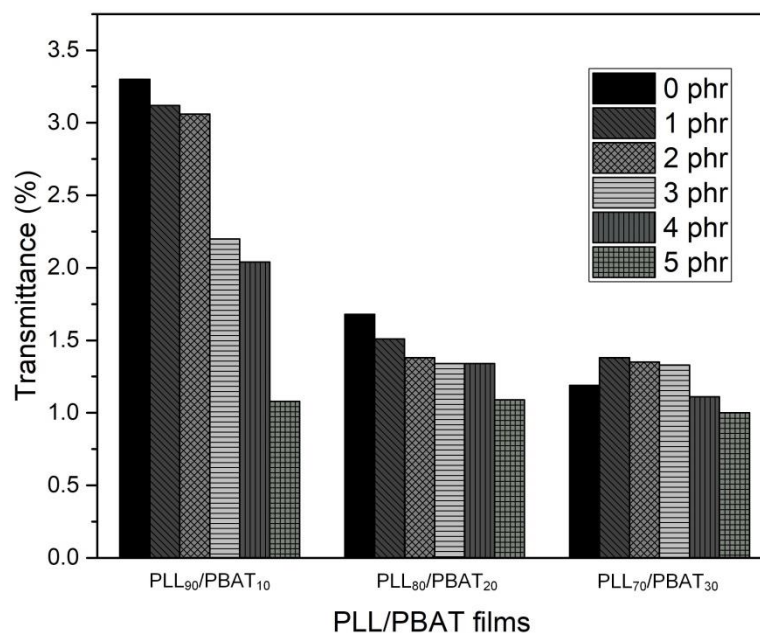
เกิดผลึก ซึ่งจะทำให้สมบัติเชิงกล และความโปร่งแสงลดลง ดังตารางที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ แสดงค่า %elongation at break มีค่ามากที่สุดที่ความเข้มข้น 4 phr ในทุกอัตราส่วน ส่วน tensile strength, stress at break และ modulus จะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของ PEG20000 เพิ่มมากขึ้น และเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านที่ความยาวคลื่น 660 nm (%T<sub>660</sub>) มีค่าต่ำสุดที่ความเข้มข้น 5 phr ในทุกอัตราส่วน ดังแสดงในภาพที่ 4.23

**ตารางที่ 4.14** สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสมเม็ดเติมพลาสติกไซเซเซอร์ PEG20000

Film	Conc. of plasticizer (phr)	Tensile strength (MPa)	Stress at break (MPa)	Modulus (MPa)	%Elongation at break (%)
PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>	-	28.53±2.05	28.08±2.26	1302.28±89.27	2.58±0.19
	1	25.29±0.73	23.13±4.54	1336.40±48.26	2.70±1.28
	2	26.35±2.29	23.81±5.19	1427.67±80.16	3.81±3.63
	3	25.55±1.57	20.18±3.11	1338.50±79.21	60.16±27.18
	4	23.10±0.86	17.61±3.54	1030.48±58.93	161.84±13.84
	5	24.77±0.86	19.86±1.56	1225.60±78.27	126.66±17.92
PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub>	-	24.50±2.19	22.58±2.81	1246.44±94.40	2.64±0.38
	1	19.65±2.20	15.10±5.09	1035.08±56.51	4.61±2.19
	2	24.03±1.79	21.05±6.75	1258.00±82.38	2.15±0.11
	3	20.84±1.02	17.72±0.99	1054.04±93.72	90.30±11.42
	4	20.45±0.13	17.11±1.69	871.24±24.71	161.13±14.37
	5	21.35±0.91	17.00±1.59	1009.90±72.22	110.87±25.89
PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub>	-	21.60±1.70	18.37±1.39	1164.87±52.68	3.51±1.59
	1	17.97±0.82	14.96±1.00	831.26±75.60	6.01±1.79
	2	20.48±0.53	19.51±0.95	1103.20±81.68	2.19±0.16
	3	18.69±0.79	15.41±1.46	991.96±26.78	57.69±29.51
	4	17.45±0.41	14.14±1.78	702.72±48.72	142.27±16.06
	5	17.61±0.80	15.03±1.03	889.10±76.00	127.28±8.59

ตารางที่ 4.15 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซอร์ PEG20000

Film	Concentration of plasticizer (phr)	Transmittance (%)	
		T <sub>660</sub>	T <sub>280</sub>
PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>	–	3.300±0.002	0.310±0.013
	1	3.121±0.000	–0.649±0.004
	2	3.058±0.003	–0.651±0.018
	3	2.203±0.005	–0.597±0.006
	4	2.044±0.001	–0.615±0.026
	5	1.082±0.004	–0.683±0.009
PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub>	–	1.680±0.001	0.292±0.022
	1	1.506±0.000	–0.234±0.036
	2	1.384±0.000	–0.279±0.033
	3	1.339±0.003	–0.356±0.028
	4	1.339±0.001	–0.649±0.012
	5	1.086±0.002	–0.668±0.042
PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub>	–	1.186±0.001	0.154±0.012
	1	1.375±0.002	–0.253±0.034
	2	1.350±0.001	–0.310±0.006
	3	1.329±0.001	–0.369±0.008
	4	1.106±0.002	–0.677±0.009
	5	0.997±0.005	–0.690±0.012



ภาพที่ 4.23 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง  $T_{660}$  ของฟิล์ม PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub>, PLL<sub>80</sub>/PBAT<sub>20</sub> และ PLL<sub>70</sub>/PBAT<sub>30</sub> ที่เติมพลาสติกไซเซออร์ PEG20000 0-5 phr

#### 4.3.2.4 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาฟิล์ม PLL/PBAT ในอัตราส่วน 90/10 ที่มีการเติม PEG ที่น้ำหนักโมเลกุล 1500, 8000 และ 20000 ในทุก ๆ ความเข้มข้นจากการสังเกตลักษณะทางกายภาพ จะเห็นได้ว่าฟิล์มมีความเข้ากันไม่แยกเฟสระหว่าง PLL กับ PBAT จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม พบว่าฟิล์มความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.16 ได้บอกสมบัติเชิงกลเมื่อ PEG ลงไปทำให้ฟิล์มมีความเหนียวมากขึ้น ส่งผลให้ %elongation at break เพิ่มขึ้น และ tensile strength ลดลงดังภาพที่ 4.24 นำมาเปรียบเทียบกับ PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้น ซึ่งผลของ %elongation at break มากที่สุดของ PEG1500, PEG8000 และ PEG20000 เท่ากับ  $144.06 \pm 8.89$ ,  $158.97 \pm 10.90$  และ  $161.84 \pm 13.84$  % ตามลำดับ แต่จุดที่ฟิล์มยืดสูงสุดเป็นจุดที่มีความเข้มข้นของพลาสติกไซเซออร์ไม่เท่ากันแสดงให้เห็นว่า เมื่อน้ำหนักโมเลกุล PEG เพิ่มขึ้น %elongation at break จะเพิ่มขึ้น แต่พลาสติกไซเซออร์ตัวนั้นต้องอยู่ในความเข้มข้นที่เหมาะสม ในทางเดียวกันค่า tensile strength, stress at break และ modulus จะลดลง แต่



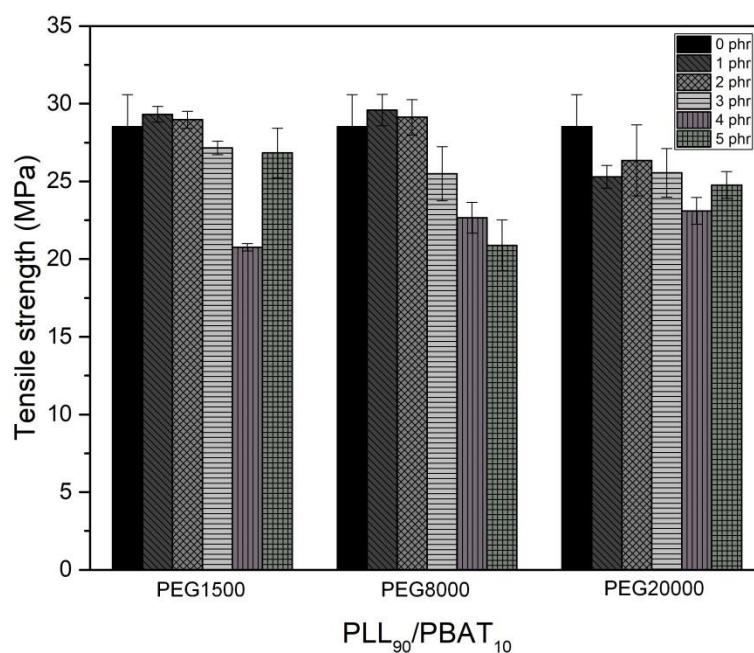
เมื่อเปรียบเทียบในแต่ละ PEG ซึ่ง PEG1500 จะมีสายโซ่สั้นที่สุดเมื่อเทียบกับ PEG8000 และ PEG20000 ดังนั้นเมื่อมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จึงเกิด interaction กับฟิล์มได้เพิ่มขึ้น ซึ่งจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มให้ดีขึ้น คือมี %elongation at break เพิ่มขึ้นและมี tensile strength ที่ลดลง ส่วน PEG8000 ที่ความเข้มข้น 1 phr มี %elongation at break ที่สูงและลดลงตามลำดับเมื่อความเข้มข้นของ PEG8000 เพิ่มขึ้น แสดงว่าปริมาณของ PEG8000 ที่มากเกินไป ทำให้เกิดผลึกได้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้สมบัติเชิงกลและความโปร่งแสงลดลง และ PEG20000 ที่ความเข้มข้น 1-4 phr มี %elongation at break เพิ่มขึ้นตามลำดับ และลดลงที่ 5 phr แต่ที่ความเข้มข้น 1-3 phr ก็ยังมี %elongation at break ต่ำกว่า PEG1500 ดังภาพที่ 4.25

**ตารางที่ 4.16** สมบัติเชิงกลเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มมากขึ้นที่อัตราส่วน PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub>

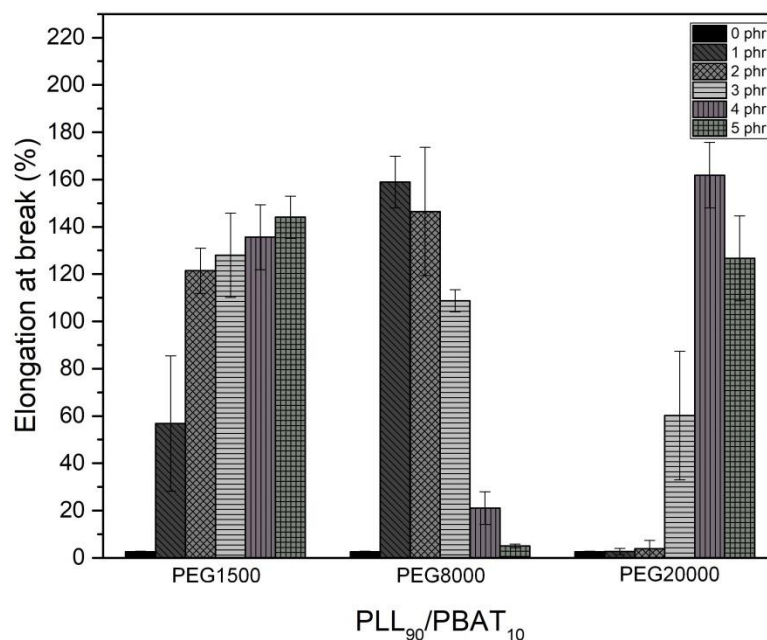
Film	Conc. of plasticizer (phr)	Tensile strength (MPa)	Stress at break (MPa)	Modulus (MPa)	%Elongation at break (%)
PEG1500	-	28.53±2.05	28.08±2.26	1302.28±89.27	2.58±0.19
	1	29.32±0.51	21.70±4.72	1468.76±64.58	56.81±28.65
	2	28.97±0.55	23.00±2.29	1396.46±23.37	121.41±9.52
	3	27.16±0.43	19.45±7.38	1124.20±37.89	127.97±17.87
	4	20.76±0.23	17.51±1.30	995.57±41.70	135.61±13.72
	5	26.83±1.60	22.73±1.27	763.34±26.59	144.06±8.89
PEG8000	-	28.53±2.05	28.08±2.26	1302.28±89.27	2.58±0.19
	1	29.59±1.01	24.50±1.33	1495.25±76.61	158.97±10.90
	2	29.13±1.14	21.00±3.52	1287.54±47.99	146.49±27.15
	3	25.5±1.74	21.99±1.18	1235.31±41.59	108.72±4.65
	4	22.66±0.99	14.53±1.90	1025.03±15.99	21.04±6.91
	5	20.89±1.63	18.03±1.75	941.78±78.57	5.05±0.78

ตารางที่ 4.16 สมบัติเชิงกลเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มมากขึ้นที่อัตราส่วน PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub> (ต่อ)

Film	Conc. of plasticizer (phr)	Tensile strength (MPa)	Stress at break (MPa)	Modulus (MPa)	%Elongation at break (%)
PEG20000	-	28.53±2.05	28.08±2.26	1302.28±89.27	2.58±0.19
	1	25.29±0.73	23.13±4.54	1336.40±48.26	2.70±1.28
	2	26.35±2.29	23.81±5.19	1427.67±80.16	3.81±3.63
	3	25.55±1.57	20.18±3.11	1338.50±79.21	60.16±27.18
	4	23.10±0.86	17.61±3.54	1030.48±58.93	161.84±13.84
	5	24.77±0.86	19.86±1.56	1225.60±78.27	126.66±17.92



ภาพที่ 4.24 เปรียบเทียบค่า tensile strength ของฟิล์มผสม PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub> ที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่างกัน

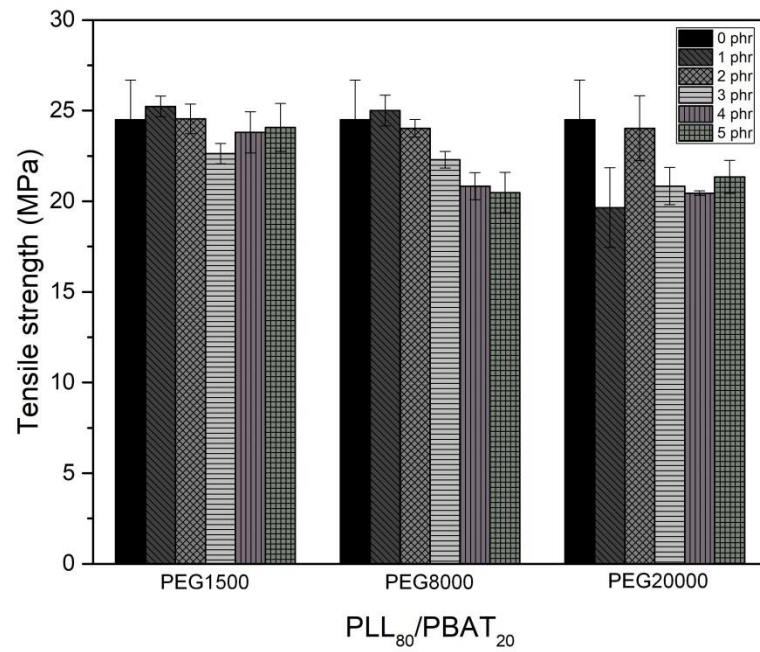


ภาพที่ 4.25 เปรียบเทียบค่า %elongation at break ของฟิล์มผสม PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub> ที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่างกัน

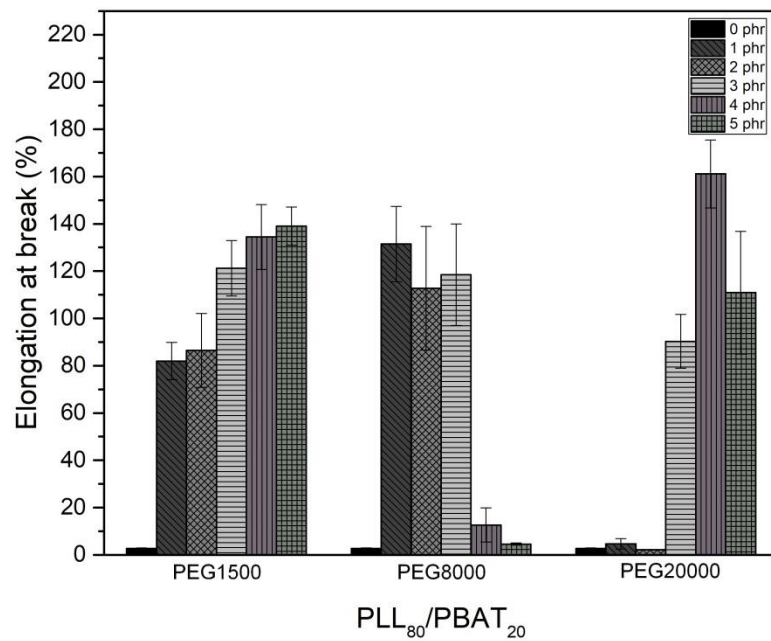
เมื่อพิจารณาฟิล์ม PLL/PBAT ในอัตราส่วน 80/20 และ 70/30 ที่มีการเติม PEG ที่น้ำหนักโมเลกุล 1500, 8000 และ 20000 ในทุก ๆ ความเข้มข้น จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพจะเห็นได้ว่าฟิล์มมีความเข้ากันและมีความชุ่มเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มขึ้น ศึกษานสมบัติเชิงกลของฟิล์มเมื่อเติม PEG ลงไปผลของ %elongation at break มากที่สุดของ PEG1500, PEG8000 และ PEG20000 ของฟิล์ม PLL/PBAT ในอัตราส่วน 80/20 เท่ากับ  $139.04 \pm 8.04$ ,  $131.46 \pm 15.96$  และ  $161.13 \pm 14.37$  ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.17 ส่วนผล %elongation at break มากที่สุดของ PEG1500, PEG8000 และ PEG20000 ของฟิล์ม PLL/PBAT ในอัตราส่วน 70/30 เท่ากับ  $136.60 \pm 16.73$ ,  $102.78 \pm 13.81$  และ  $142.27 \pm 16.06$  ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.18 จะเห็นได้ว่า %elongation at break เพิ่มขึ้น ส่วนค่า tensile strength, stress at break และ modulus จะลดลง ซึ่งผลมีแนวโน้มเดียวกับฟิล์ม PLL/PBAT ในอัตราส่วน 90/10 ดังแสดงในภาพที่ 4.26–4.29

**ตารางที่ 4.17** สมบัติเชิงกลเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มมากขึ้นที่อัตราส่วน PLL<sub>80</sub>/PBAT<sub>20</sub>

Film	Conc. of plasticizer (phr)	Tensile strength (MPa)	Stress at break (MPa)	Modulus (MPa)	%Elongation at break (%)
PEG1500	-	24.50±2.19	22.58±2.81	1246.44±94.40	2.64±0.38
	1	25.23±0.57	21.86±0.93	1229.12±35.74	81.95±7.89
	2	24.55±0.82	19.31±6.53	1156.43±33.01	86.48±15.55
	3	22.63±0.56	19.91±0.77	1166.54±42.86	121.25±11.73
	4	23.8±1.14	19.56±0.60	1127.14±67.28	134.46±13.71
	5	24.07±1.32	21.29±1.30	1065.81±93.05	139.04±8.04
PEG8000	-	24.50±2.19	22.58±2.81	1246.44±94.40	2.64±0.38
	1	25.01±0.85	19.72±3.29	1133.72±61.31	131.46±15.96
	2	24.03±0.48	18.10±5.73	1045.32±63.16	112.72±26.17
	3	22.29±0.46	19.74±0.91	1058.43±41.26	118.52±21.47
	4	20.83±0.75	10.49±1.98	1016.03±38.66	12.60±7.21
	5	20.48±1.11	18.69±1.29	954.70±39.41	4.55±0.46
PEG20000	-	24.50±2.19	22.58±2.81	1246.44±94.40	2.64±0.38
	1	19.65±2.20	15.10±5.09	1035.08±56.51	4.61±2.19
	2	24.03±1.79	21.05±6.75	1258.00±82.38	2.15±0.11
	3	20.84±1.02	17.72±0.99	1054.04±93.72	90.30±11.42
	4	20.45±0.13	17.11±1.69	871.24±24.71	161.13±14.37
	5	21.35±0.91	17.00±1.59	1009.90±72.22	110.87±25.89



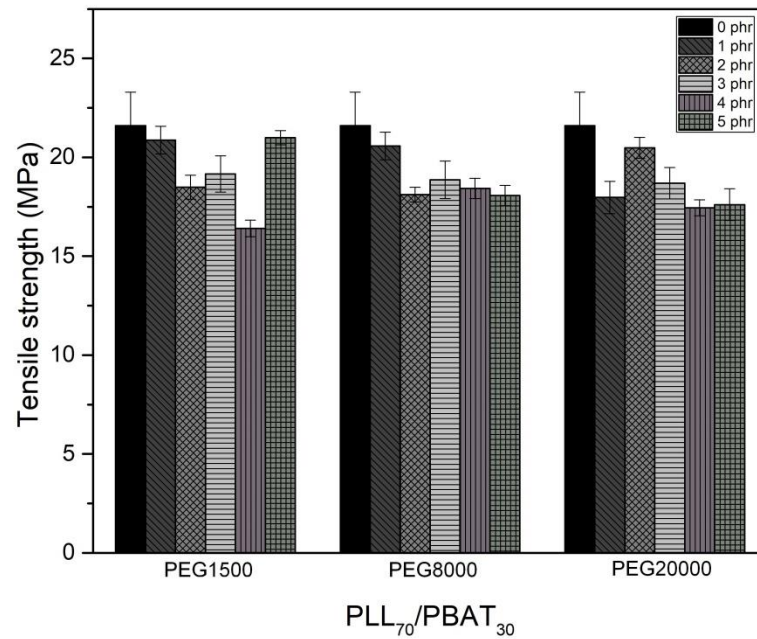
ภาพที่ 4.26 เปรียบเทียบค่า tensile strength ของฟิล์มผสม PLL<sub>80</sub>/PBAT<sub>20</sub> ที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่างกัน



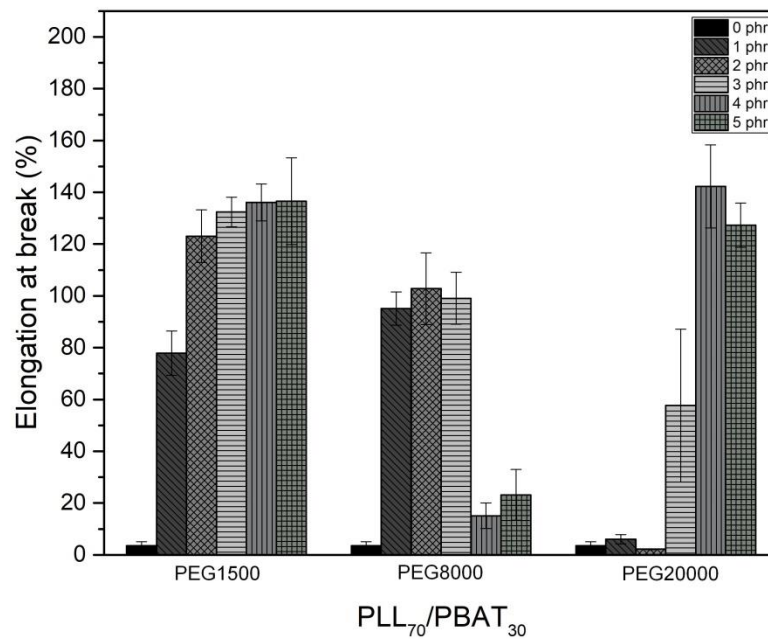
ภาพที่ 4.27 เปรียบเทียบค่า %elongation at break ของฟิล์มผสม PLL<sub>80</sub>/PBAT<sub>20</sub> ที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่างกัน

**ตารางที่ 4.18** สมบัติเชิงกลเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มมากขึ้นที่อัตราส่วน PLL<sub>70</sub>/PBAT<sub>30</sub>

Film	Conc. of plasticizer (phr)	Tensile strength (MPa)	Stress at break (MPa)	Modulus (MPa)	%Elongation at break (%)
PEG1500	-	21.60±1.70	18.37±1.39	1164.87±52.68	3.51±1.59
	1	20.87±0.70	18.75±1.19	1124.20±37.89	77.94±8.56
	2	18.49±0.61	16.33±0.83	838.07±31.71	123.03±10.16
	3	19.16±0.92	17.10±1.04	839.47±91.47	132.42±5.66
	4	16.41±0.42	14.68±0.65	797.11±60.75	136.10±7.14
	5	20.99±0.36	18.16±0.70	852.07±26.00	136.60±16.73
PEG8000	-	21.60±1.70	18.37±1.39	1164.87±52.68	3.51±1.59
	1	20.58±0.70	17.07±2.15	779.07±51.64	95.13±6.38
	2	18.12±0.37	16.43±1.24	727.16±40.29	102.78±13.81
	3	18.87±0.95	15.91±0.80	728.36±33.66	99.04±10.04
	4	18.43±0.51	9.73±2.66	786.02±27.75	15.08±4.93
	5	18.07±0.52	10.09±2.09	741.16±30.17	23.18±9.76
PEG20000	-	21.60±1.70	18.37±1.39	1164.87±52.68	3.51±1.59
	1	17.97±0.82	14.96±1.00	831.26±75.60	6.01±1.79
	2	20.48±0.53	19.51±0.95	1103.20±81.68	2.19±0.16
	3	18.69±0.79	15.41±1.46	991.96±26.78	57.69±29.51
	4	17.45±0.41	14.14±1.78	702.72±48.72	142.27±16.06
	5	17.61±0.80	15.03±1.03	889.10±76.00	127.28±8.59



ภาพที่ 4.28 เปรียบเทียบค่า tensile strength ของฟิล์มผสม PLL<sub>70</sub>/PBAT<sub>30</sub> ที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่างกัน



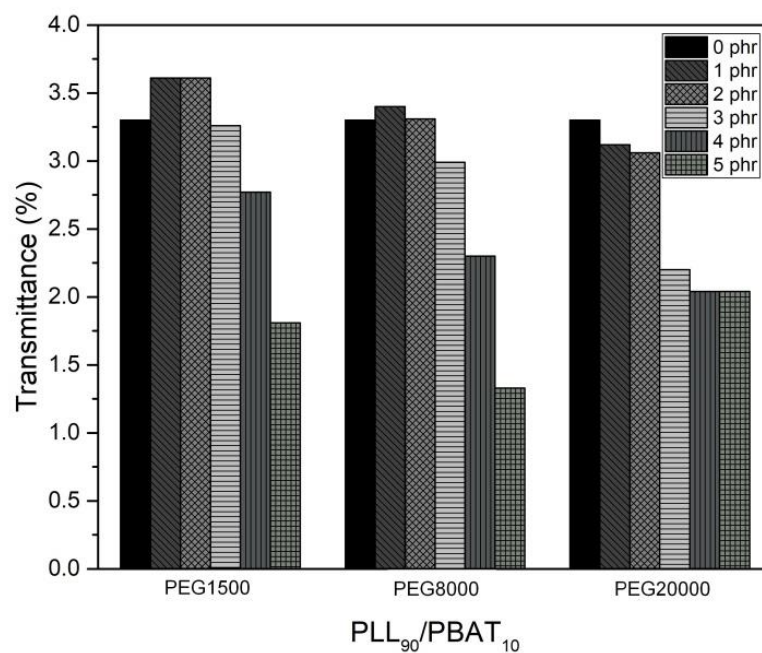
ภาพที่ 4.29 เปรียบเทียบค่า %elongation at break ของฟิล์มผสม PLL<sub>70</sub>/PBAT<sub>30</sub> ที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่างกัน

จากผลของน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติทางแสงของฟิล์มผสมจะเห็นได้ว่าเมื่อน้ำหนักโมเลกุล และความเข้มข้นของพลาสติกไซเซอร์เพิ่มขึ้นคุณสมบัติโปร่งแสงของฟิล์มผสมที่อัตราส่วน 90/10, 80/20 และ 70/30 จะมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของฟิล์มลดลง เนื่องจากปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มขึ้น เพราะ PBAT มีความขุ่น และเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดผลึกได้มากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.19–4.21 และภาพที่ 4.30–4.32

**ตารางที่ 4.19** เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มมากขึ้นที่อัตราส่วน PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub>

Plasticizer	Concentration of plasticizer (phr)	Transmittance (%)	
		T <sub>660</sub>	T <sub>280</sub>
PEG1500	–	3.300±0.002	0.310±0.013
	1	3.608±0.001	0.375±0.021
	2	3.607±0.002	0.333±0.031
	3	3.261±0.001	0.308±0.025
	4	2.772±0.004	0.262±0.028
	5	1.812±0.001	0.233±0.023
PEG8000	–	3.300±0.002	0.310±0.013
	1	3.401±0.006	0.138±0.010
	2	3.308±0.001	–0.124±0.003
	3	2.992±0.006	–0.147±0.019
	4	2.303±0.003	–0.203±0.018
	5	1.327±0.006	–0.231±0.040
PEG20000	–	3.300±0.002	0.310±0.013
	1	3.121±0.000	–0.649±0.004
	2	3.058±0.003	–0.651±0.018
	3	2.203±0.005	–0.597±0.006
	4	2.044±0.001	–0.615±0.026
	5	1.082±0.004	–0.683±0.009





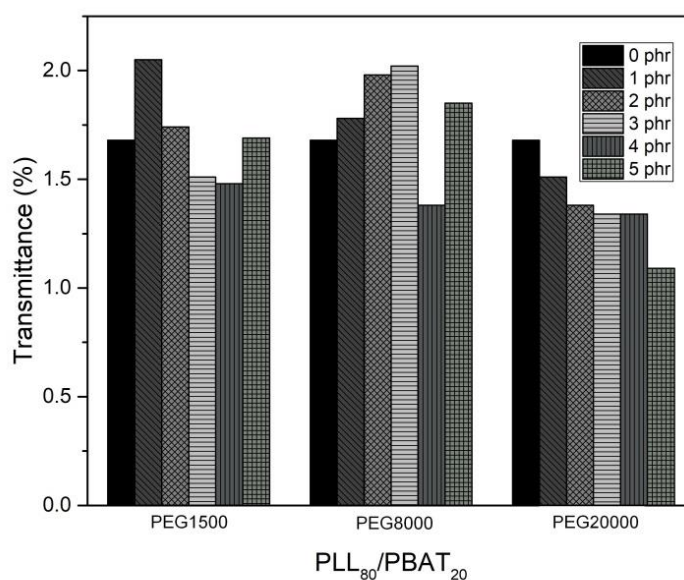
ภาพที่ 4.30 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง  $T_{660}$  ของฟิล์ม PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub> ที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่างกัน

ตารางที่ 4.20 เปอร์เซนต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มมากขึ้นที่อัตราส่วน PLL<sub>80</sub>/PBAT<sub>20</sub>

Plasticizer	Concentration of plasticizer (phr)	Transmittance (%)	
		$T_{660}$	$T_{280}$
PEG1500	-	1.680±0.001	0.292±0.022
	1	2.045±0.002	-0.358±0.037
	2	1.741±0.000	-0.448±0.027
	3	1.507±0.001	-0.458±0.021
	4	1.478±0.000	-0.512±0.040
	5	1.691±0.000	-0.515±0.028

ตารางที่ 4.20 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มมากขึ้น ที่อัตราส่วน PLL<sub>80</sub>/PBAT<sub>20</sub> (ต่อ)

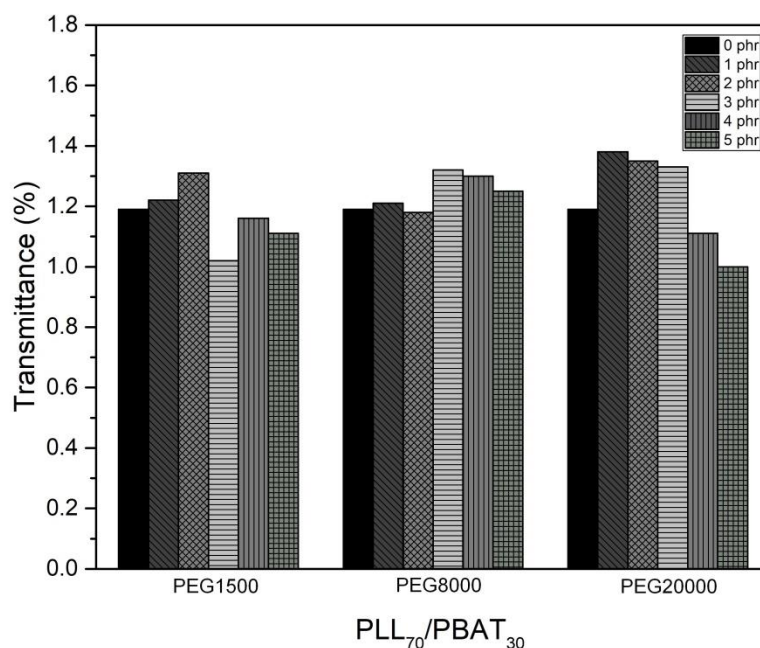
Plasticizer	Concentration of plasticizer (phr)	Transmittance (%)	
		T <sub>660</sub>	T <sub>280</sub>
PEG8000	-	1.680±0.001	0.292±0.022
	1	1.776±0.004	-0.424±0.038
	2	1.981±0.002	-0.449±0.001
	3	2.020±0.002	-0.502±0.004
	4	1.378±0.005	-0.570±0.038
	5	1.850±0.001	-0.599±0.006
PEG20000	-	1.680±0.001	0.292±0.022
	1	1.506±0.000	-0.234±0.036
	2	1.384±0.000	-0.279±0.033
	3	1.339±0.003	-0.356±0.028
	4	1.339±0.001	-0.649±0.012
	5	1.086±0.002	-0.668±0.042



ภาพที่ 4.31 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง T<sub>660</sub> ของฟิล์ม PLL<sub>80</sub>/PBAT<sub>20</sub> ที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่างกัน

ตารางที่ 4.21 เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มมากขึ้น  
ที่อัตราส่วน PLL<sub>70</sub>/PBAT<sub>30</sub>

Plasticizer	Concentration of plasticizer (phr)	Transmittance (%)	
		T <sub>660</sub>	T <sub>280</sub>
PEG1500	-	1.186±0.001	0.154±0.012
	1	1.217±0.000	-0.415±0.008
	2	1.308±0.003	-0.429±0.046
	3	1.023±0.002	-0.484±0.014
	4	1.159±0.001	-0.550±0.037
	5	1.107±0.001	-0.571±0.023
PEG8000	-	1.186±0.001	0.154±0.012
	1	1.206±0.003	-0.456±0.030
	2	1.182±0.004	-0.478±0.039
	3	1.341±0.004	-0.501±0.025
	4	1.305±0.001	-0.573±0.018
	5	1.252±0.001	-0.577±0.016
PEG20000	-	1.186±0.001	0.154±0.012
	1	1.375±0.002	-0.253±0.034
	2	1.350±0.001	-0.310±0.006
	3	1.329±0.001	-0.369±0.008
	4	1.106±0.002	-0.677±0.009
	5	0.997±0.005	-0.690±0.012



ภาพที่ 4.32 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง  $T_{660}$  ของฟิล์ม PLL<sub>70</sub>/PBAT<sub>30</sub> ที่น้ำหนักโมเลกุลของ PEG ต่างกัน

#### 4.3.2.5 สมบัติเชิงกลและสมบัติทางแสงของฟิล์มผสมเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ ParaplexG40

เมื่อเติม ParaplexG40 ลงไปทำให้ฟิล์มมีความเหนียวมากขึ้นเมื่อเทียบกับ PEG เนื่องจาก ParaplexG40 เป็นของเหลวหนืดที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้สามารถละลายในคลอโรฟอร์มได้ดีและเกิดความเข้ากันดีกว่า เมื่อพิจารณาปริมาณของ PBAT และความเข้มข้นของพลาสติกไซเซออร์ที่เพิ่มขึ้น ค่า tensile strength, stress at break และ modulus มีแนวโน้มที่ลดลง ส่วน %elongation at break มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ยกเว้น PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub> เมื่อความเข้มข้นของพลาสติกไซเซออร์ที่เพิ่มขึ้น %elongation at break มีแนวโน้มที่ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสมเมื่อเติม ParaplexG40

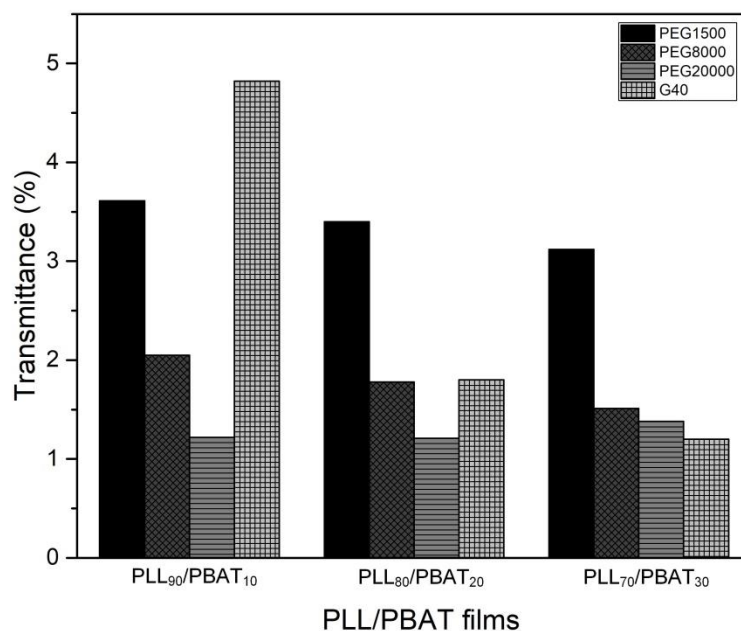
Film	Conc. of plasticizer (phr)	Tensile strength (MPa)	Stress at break (MPa)	Modulus (MPa)	%Elongation at break (%)
PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>	-	28.53±2.05	28.08±2.26	1302.28±89.27	2.58±0.19
	1	27.63±1.29	20.66±3.41	1025.58±99.18	191.90±30.50
	2	28.21±0.79	18.10±3.09	1039.54±32.98	145.46±31.79
	3	26.65±0.67	13.40±3.59	995.72±33.37	89.47±9.28
	4	26.36±0.35	14.86±3.30	972.28±44.27	140.27±14.74
	5	25.55±0.60	12.35±4.26	933.08±47.52	31.70±7.94
PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub>	-	24.50±2.19	22.58±2.81	1246.44±94.40	2.64±0.38
	1	23.26±0.69	16.32±1.50	912.02±70.90	132.34±15.94
	2	22.23±0.61	16.05±1.00	884.88±42.18	133.99±18.95
	3	22.74±0.22	17.33±1.01	883.98±39.11	140.99±17.34
	4	25.00±1.07	19.40±1.78	928.72±46.70	149.24±19.06
	5	21.75±1.31	15.72±0.95	804.30±44.08	151.66±35.36
PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub>	-	21.60±1.70	18.37±1.39	1164.87±52.68	3.51±1.59
	1	18.78±1.06	15.16±1.55	770.95±38.60	136.53±19.24
	2	19.40±0.64	15.03±2.49	676.62±12.49	136.06±22.37
	3	19.09±0.76	12.69±3.65	809.76±49.37	121.78±34.89
	4	18.66±0.17	13.64±2.71	707.54±33.17	154.80±18.73
	5	18.67±0.26	11.53±2.94	716.06±60.68	57.58±20.56

พิจารณาเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มที่มีความยาวคลื่น 660 nm พบว่าค่า %T<sub>660</sub> เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเติม ParaplexG40 ลงไป จะสามารถเพิ่มความเข้ากันได้ของ PLL และ PBAT เนื่องจาก ParaplexG40 มีสายโซ่ที่ยาวจะทำให้มี free volume ระหว่างสายโซ่มากขึ้นและสายโซ่เคลื่อนที่ได้ง่าย ฟิล์มจึงใส แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของพลาสติไซเซอร์เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มจะลดลงอีกครั้ง เพราะ ParaplexG40 มีสายโซ่ที่ยาว เมื่อปริมาณมากขึ้นจะทำให้แทรกผ่านเข้าไปในพอลิเมอร์ได้ยากขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการเพิ่มความเข้ากันได้ลดลง ดังที่แสดงในตารางที่ 4.23 เมื่อเปรียบเทียบกับ PEG ทั้ง 3 ตัว

ในอัตราส่วน 90/10 และ 80/20 เนื่องจากสมบัติของ ParaplexG40 จึงมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงมากกว่าแต่ในอัตราส่วน 70/30 มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงน้อยกว่า ดังภาพที่ 4.33

**ตารางที่ 4.23** เปอร์เซนต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซออร์ ParaplexG40

Film	Concentration of plasticizer (phr)	Transmittance (%)	
		T <sub>660</sub>	T <sub>280</sub>
PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>	–	3.300±0.002	0.310±0.013
	1	4.820±0.006	-0.170±0.022
	2	4.520±0.002	-0.456±0.059
	3	4.019±0.004	-0.481±0.026
	4	3.979±0.003	-0.573±0.015
	5	3.551±0.003	-0.343±0.004
PLL <sub>80</sub> /PBAT <sub>20</sub>	–	1.680±0.001	0.292±0.022
	1	1.801±0.004	-0.254±0.010
	2	2.169±0.003	-0.408±0.022
	3	1.795±0.000	-0.461±0.009
	4	2.583±0.000	-0.532±0.010
	5	1.804±0.002	-0.619±0.050
PLL <sub>70</sub> /PBAT <sub>30</sub>	–	1.186±0.001	0.154±0.012
	1	1.200±0.001	-0.296±0.007
	2	1.195±0.001	-0.405±0.041
	3	1.455±0.001	-0.451±0.030
	4	1.321±0.001	-0.528±0.008
	5	1.291±0.000	-0.619±0.013



**ภาพที่ 4.33** เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสง  $T_{660}$  ของฟิล์ม PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub>, PLL<sub>80</sub>/PBAT<sub>20</sub> และ PLL<sub>70</sub>/PBAT<sub>30</sub> ที่เติม PEG และ ParaplexG40 ความเข้มข้น 1 phr

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลและการส่องผ่านแสงของฟิล์มผสม PLL/PBAT พบว่า เมื่อเติม PBAT ลงไปส่งผลให้ค่า tensile strength, stress at break และ modulus มีแนวโน้มลดลง แต่ค่า %elongation at break จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เกิดจากความไม่เข้ากันของ PLL และ PBAT เนื่องจาก PLL ไม่ยืดหยุ่นและแข็ง ส่วน PBAT มีความแข็งและเหนียว จึงทำการเติมพลาสติกไซเซอร์ PEG และ ParaplexG40 ลงไป ทำให้ %elongation at break เพิ่มขึ้นแต่ทำให้ค่า tensile strength, stress at break และ modulus ลดลง

เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มผสมต่างกันไปขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการผสมของ PLL และ PBAT ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร ( $T_{660}$ ) และ 280 นาโนเมตร ( $T_{280}$ ) แสดงให้เห็นถึงความโปร่งแสง และคุณสมบัติการป้องกัน UV ของฟิล์ม ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแผ่นฟิล์ม PLL มีความโปร่งแสงมาก เมื่อผสม PBAT ลงไป เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงจะลดลง และจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติม ParaplexG40 ลงไป





## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 สรุปผล

จากการศึกษาการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มผสมระหว่างพอลิ(แอล-แลคไทด์) และพอลิ(บิวทิลีน อดิเพท-โค-เทอเรพทาเลท) ด้วยวิธีหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย (Solvent casting method) โดยเติมและไม่เติมพลาสติกไซเซออร์ พบว่าฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์สามารถขึ้นรูปได้จนถึงปริมาณ PBAT 50% โดยลักษณะของฟิล์มที่ไม่ผสม PBAT (Homopolymer PLL film) จะมีความใสมาก เนื่องจากสายโซ่มีเมทิล ( $-CH_3$ ) เป็นหมู่แทนที่ของ PLL ทำให้เกิดความเกะกะ จึงทำให้สายโซ่อยู่ห่างกัน แต่ฟิล์มที่ทำการผสมกับ PBAT จะมีความขุ่นมากกว่า เนื่องจาก PBAT เป็นโคพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่ยาวไม่มีหมู่แทนที่เกะกะ ฟิล์มที่มีปริมาณ PBAT 0-30% จะมีผิวที่เรียบแสดงให้เห็นความเข้ากันของพอลิเมอร์ส่วน PBAT 40-50% ผิวของฟิล์มจะหยาบเห็น PLL และ PBAT แยกเฟสกันอย่างชัดเจนและฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซออร์สามารถขึ้นรูปได้ และมีความเข้ากันจนถึงปริมาณ PBAT 30% มีลักษณะเรียบสีขาวขุ่นเนื่องจากการเติม PBAT และจะมีความขุ่นมากกว่าฟิล์มที่ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์

นำไปวิเคราะห์ความเข้ากันทางเคมีโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier transform-infrared spectrometer) ของ PLL, PBAT และพลาสติกไซเซออร์โดยวิเคราะห์จากสเปกตรัมของฟิล์มผสมโดยนำสเปกตรัมของพอลิเมอร์ และพลาสติกไซเซออร์แต่ละตัวมาเปรียบเทียบเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่า wavenumber พบว่าสเปกตรัมของฟิล์มผสมไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากที่ทำการผสมแล้ว แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ทั้งสองตัว และพลาสติกไซเซออร์ไม่มีการเกิดพันธะทางเคมีต่อกัน แต่เนื่องจากปริมาณพลาสติกไซเซออร์ที่เพิ่มขึ้น จึงเกิด free volume ระหว่างสายโซ่เพิ่มมากขึ้น ทำให้แรง dipole-dipole ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง ส่งผลให้ค่า wavenumber ณ ตำแหน่ง C=O stretching เลื่อนไปทางค่า wavenumber ที่ต่ำลง

เมื่อศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยการดึงเทนไซค์โดยใช้เครื่อง Universal testing machine และสมบัติการส่องผ่านแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรสโกปี (UV-Visible spectroscopy) ผลของสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสมที่ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์ พบว่าสมบัติเชิงกลยังไม่ถูกปรับปรุง

เมื่อปริมาณของ PBAT เพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัส (Modulus) และค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) จะลดลง เนื่องจากผลของ PBAT ที่มีความแข็งเปราะ แต่มีความยืดหยุ่นสูงทำให้เปอร์เซ็นต์ระยะการยืดตัว ณ จุดขาด (%Elongation at break) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จึงเติมพลาสติกไซเซออร์ PEG1500, PEG8000, PEG20000 และ ParaplexG40 ลงไป เพื่อเพิ่มความเข้ากัน เมื่อเปรียบเทียบผลของค่า modulus และค่า tensile strength มีแนวโน้มลดลง และ %elongation at break เพิ่มขึ้น เมื่อน้ำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มมากขึ้น ค่า %elongation at break สูงที่สุดของฟิล์ม PLL/PBAT ที่เติม PEG จะอยู่ที่อัตราส่วน 90/10/PEG20000 4 phr มีค่าเท่ากับ  $161.84 \pm 13.84\%$  แต่พลาสติกไซเซออร์ ParaplexG40 ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่า โดยมีค่า % elongation at break สูงที่สุดที่อัตราส่วน 90/10/ParaplexG40 1 phr มีค่าเท่ากับ  $191.90 \pm 30.50\%$  เนื่องจาก ParaplexG40 เป็นของเหลวหนืดที่อุณหภูมิห้อง ทำให้สามารถละลายในคลอโรฟอร์มได้ดีและเกิดความเข้ากันกับสายโซ่พอลิเมอร์ได้ดีกว่า PEG

สมบัติการส่องผ่านแสงของฟิล์ม PLL มีความใสมาก มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงที่  $T_{660}$  เท่ากับ  $54.28 \pm 0.04\%$  และจะมีค่าลดลงเมื่อเติม PBAT ซึ่งเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของฟิล์มผสมต่างกันไปขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการผสมของ PLL และ PBAT เมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ PEG เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและลดลงอีกครั้งเมื่อพลาสติกไซเซออร์มีน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้น เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลของ PEG ที่เพิ่มขึ้น สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบ PEG และ ParaplexG40 พบว่า ParaplexG40 สามารถเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง PLL/PBAT หรือช่วยปรับปรุงสมบัติของฟิล์มผสมได้มากกว่า PEG เนื่องจาก ParaplexG40 มีสายโซ่ที่ยาวจะทำให้มี free volume ระหว่างสายโซ่มากขึ้นและสายโซ่เคลื่อนที่ได้ง่าย ฟิล์มจึงใส แต่คุณสมบัติการป้องกันรังสี UV ของฟิล์มที่เติมพลาสติกไซเซออร์ทั้งสองชนิดมีค่าไม่แตกต่างกัน

จากการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ข้างต้น พบว่าฟิล์มผสม PLL/PBAT ในอัตราส่วน 90/10 ที่เติม พลาสติกไซเซออร์ ParaplexG40 ความเข้มข้น 1 phr ให้ %elongation at break สูงถึง  $191.90 \pm 30.50\%$  และมีคุณสมบัติการป้องกันรังสี UV ได้ดี ซึ่งเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นถุงบรรจุภัณฑ์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การผสมฟิล์มในงานวิจัยนี้ทำการผสมด้วยวิธีหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลายซึ่งตัวทำละลายที่ใช้ คือ คลอโรฟอร์ม เนื่องจากเป็นตัวทำละลายของพอลิเมอร์ คลอโรฟอร์มเป็นสารอันตรายที่ระเหยง่าย ดังนั้นควรสวมเครื่องป้องกันไม่ให้สัมผัสหรือสูดดมคลอโรฟอร์มได้

5.2.2 การใช้วิธีการขึ้นรูปด้วยตัวทำละลายย เมื่อทำการเทฟิล์มลงในแม่พิมพ์ควรตั้งทิ้งไว้จนแน่ใจว่าตัวทำละลายระเหยไปหมด เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดเมื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูล

5.2.3 การเก็บรักษาฟิล์มควรเก็บไว้ในที่ปลอดความชื้น เช่น ในเดซิเคเตอร์ ควรมีช่วงเวลาในการเก็บรักษาฟิล์มในแต่ละตัวอย่างในเดซิเคเตอร์ใกล้เคียงกัน เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดเมื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูล

บรรณานุกรม

### บรรณานุกรม

- [1] ผศ.ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์. พลาสติกกับสิ่งแวดล้อม. สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2558) [ออนไลน์] [อ้างถึง 14 ตุลาคม 2560] ได้จาก : <http://biology.ipst.ac.th/>
- [2] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. **โครงสร้างและกระบวนการผลิต PLA.** งานวิจัยและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ จากพลาสติกชีวภาพชนิด PLA. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. (2550).
- [3] Poly(butyrate adipate-co-terephthalate) (PBAT). [ออนไลน์] [อ้างถึง 20 ตุลาคม 2560] ได้จาก : <http://packaging.oie.go.th/>
- [4] ธนาวดี ลีจากภัย. **พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม.** ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : บริษัท ไทยเอฟเพคท์สตูดิโอ จำกัด, 2549, หน้า 9–15.
- [5] MTEC. พลาสติกย่อยสลายได้. เทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสภาวะแวดล้อม เพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน. (2550) [ออนไลน์] [อ้างถึง 20 ตุลาคม 2560] ได้จาก : [http://www.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic/usage\\_de\\_plas.html](http://www.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/usage_de_plas.html)
- [6] จินตมัย สุวรรณประทีป. พลาสติกสังเคราะห์ย่อยสลายได้กับงานทางการแพทย์. วัสดุและอุปกรณ์การแพทย์. **ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.** กรกฎาคม – กันยายน, 2546.
- [7] Otoni, C. G.; Bustillos, R. J. A.; Azeredo, H. M. C.; Loewvice, M. V.; Moura, M. R.; Mattoso, L. H. C.; McHuugh, T. H. Recent Advances on Edible Films Based on Fruits and Vegetables—A Review. *Comprehensive review in food science and food safety.* **2017**, *16*, 1151–1169.
- [8] Garlotta, D. A Literature Review of Poly(Lactic Acid). *Journal of Polymers and the Environment.* **2001**, *9*, 63–84.
- [9] อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล. พอลิแลกติกแอซิด : พอลิเอสเทอร์ จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้. **วิศวกรรมสารมก.** กรกฎาคม – กันยายน, 2554, ปีที่ 14, ฉบับที่ 77.

### บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] พลาสติก PLA (Polylactic acid). POLYMER. (2012) [ออนไลน์] [อ้างถึง 2 ธันวาคม 2560] ได้จาก : <https://enchemcom1po.wordpress.com/bioplastics-ไบโอพลาสติก/พลาสติก-pla-poly-lactic-acid/>
- [11] Phuendee, M.; Leksakul, K. Development of Bone Fixation Plate from Hydroxyapatite– Polylactic Acid Composite. *Engng.J.CMU.* **2014**, *2*, 88–100.
- [12] Tsuji, H.; Kondoh, F. Synthesis of meso–lactide by thermal configurational inversion and depolymerization of poly(l–lactide) and thermal configurational inversion of lactides. *Polymer Degradation and Stability.* **2017**, *141*, 77–83
- [13] กรดแลคติก (LACTIC ACID). Material selection [ออนไลน์] [อ้างถึง 20 มกราคม 2561] ได้จาก : [http://asp.plastics.or.th:8001/Article\\_Detail.aspx?id=53](http://asp.plastics.or.th:8001/Article_Detail.aspx?id=53)
- [14] PBAT Stock Biodegradable Compostable particles PLA pellets constarch plastic resin. CHINA MANUFACTURER DIRECTORY. [ออนไลน์] [อ้างถึง 2 ธันวาคม 2560] ได้จาก : <http://www.china-manufacturer-directory.com/china-704154592/pbat-stock-biodegradable-compostable-particles-pla-pellets-constarch-plastic-resin.html>
- [15] อรุณศักดิ์ โสภณธรรมภาณ. พลาสติกไซเซออร์ (Plasticizers): การปนเปื้อนจากบรรจุภัณฑ์สู่อาหาร. สถาบันวิจัยจุฬาภรณ์ หลักสูตร กรุงเทพฯ. (2550) [ออนไลน์] [อ้างถึง 21 ตุลาคม 2560] ได้จาก : <http://www.etm.sc.mahidol.ac.th/a1.shtml>
- [16] อรพรรณ ชัยมณี. Propylene glycol. มุณินิธิสมมาอาชีวะ. (2554) [ออนไลน์] [อ้างถึง 21 ตุลาคม 2560] ได้จาก : [http://www.summacheeva.org/index\\_thaitox\\_propylene\\_glycol.htm](http://www.summacheeva.org/index_thaitox_propylene_glycol.htm)
- [17] Polyethylene glycol 1500 for synthesis. VWR Part of Avantor. [ออนไลน์] [อ้างถึง 15 ธันวาคม 2560] ได้จาก : <https://us.vwr.com/store/product/11723805/polyethylene-glycol-1500-for-synthesis>
- [18] CARBOWAX™ Polyethylene Glycol (PEG) 8000. ®TM Trademark of The Dow Chemical Company (“Dow”) or an affiliated company of Dow. No. 118–01806–1211.

### บรรณานุกรม (ต่อ)

- [19] Polyethylene glycol 20000. [ออนไลน์] [อ้างถึง 15 ธันวาคม 2560]  
ได้จาก : [http://www.merckmillipore.com/TH/en/product/Polyethylene-glycol-20000,MDA\\_CHEM817018?ReferrerURL=https%3A%2F%2Fwww.google.co.th%2F&bd=1](http://www.merckmillipore.com/TH/en/product/Polyethylene-glycol-20000,MDA_CHEM817018?ReferrerURL=https%3A%2F%2Fwww.google.co.th%2F&bd=1)
- [20] POLYMERIC PLASTICIZER PERFORMANCE SUMMARY. POLYMERIC PLASTICIZERS FOR FLEXIBLE PVC. HallStar. [ออนไลน์] [อ้างถึง 15 ธันวาคม 2560] ได้จาก : <https://www.hallstar.com/product/paraplex-g-40/>
- [21] สมจิตต์ ตั้งชัยวัฒนา. **พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend)**. โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม. พฤษภาคม (2548).
- [22] Younes, H.; Cohn, D. Phase separation in poly(ethylene glycol)/poly(lactic acid) blends. *European Polymer Journal*. **1988**, *24*, 765–773.
- [23] Rhim, J. W.; Mohanty, K. A.; Singh, S. P.; Ng, P. K. W. Preparation and Properties of Biodegradable Multilayer Films Based on Soy Protein Isolate and Poly(lactide). *Ind. Eng. Chem. Res.* **2006**, *45*, 3059–3066.
- [24] Gu, S. Y.; Zhang, K.; Ren, J.; Zhan, H. Melt rheology of polylactide/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends. *Carbohydrate Polymers*. **2008**, *74*, 79–85.
- [25] สมหมาย ผิวสะอาด และคณะ. การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด พอลิবিทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท และพอลิবিทิลีน อดิเพท เทอเลพทาเลท (PBAT) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเป่าฟิล์ม. การประชุมวิชาการช่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธบุรี. ตุลาคม 2554.
- [26] Hughes, J. The effects of solvent mixture on the thermal and mechanical properties of solvent cast polylactic acid (pla) film. *Clemson University*. **2012**, *12*, 72–92.
- [27] Weng, Y. X.; Jin, Y. J.; Meng, Q.Y.; Wanf, L.; Zhang, M.; Wang, Y. Z. Biodegradation behavior of poly(butylene adipate-coterephthalate) (PBAT), poly(lactic acid) (PLA), and their blend under soil conditions. *Polymer Testing*. **2013**, *32*, 918–926.

**บรรณานุกรม (ต่อ)**

- [28] Patricio, T.; Bartolo, P. Thermal stability of PCL/PLA blends produced by physical blending process. *Procedia Engineering*. **2013**, *59*, 292–297.
- [29] Kunthadong, P.; Molloy, R.; Worajittiphon, P.; Leejarkpai, T.; Kaabbuathong, N.; Punyodom, W. Biodegradable Plasticized Blends of Poly(L-lactide) and Cellulose Acetate Butyrate: From Blend Preparation to Biodegradability in Real Composting Conditions. *J Polym Environ*. **2015**, *23*, 107–113.
- [30] Girdthep, S.; Komrapit, N.; Lumyong, S.; Punyodom, W.; Worajittiphon, P. Effect of plate-like particles on properties of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend: A comparative study between modified montmorillonite and graphene nanoplatelets. *Composites Science and Technology*. **2015**, *119*, 115–123.
- [31] Wang, L. F.; Rhim, J. W.; Hong, S. I. Preparation of poly(lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend films using a solvent casting method and their food packaging application. *LWT – Food Science and Technology*. **2016**, *68*, 454–461.
- [32] รุ่งลาวัลย์ สมสุนันท์, วิณิตา บุญโยดม และสการวรัตน์ นพคุณ. การเตรียมและสมบัติของเบลอนด์ระหว่างพอลิ(แลกติกแอซิด) และพอลิ(บิวทิลีนซัคซิเนต) ที่มีพลาสติกไซเซอร์ สำหรับใช้เป็นพลาสติกชีวภาพ. **มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**. (2557).



ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

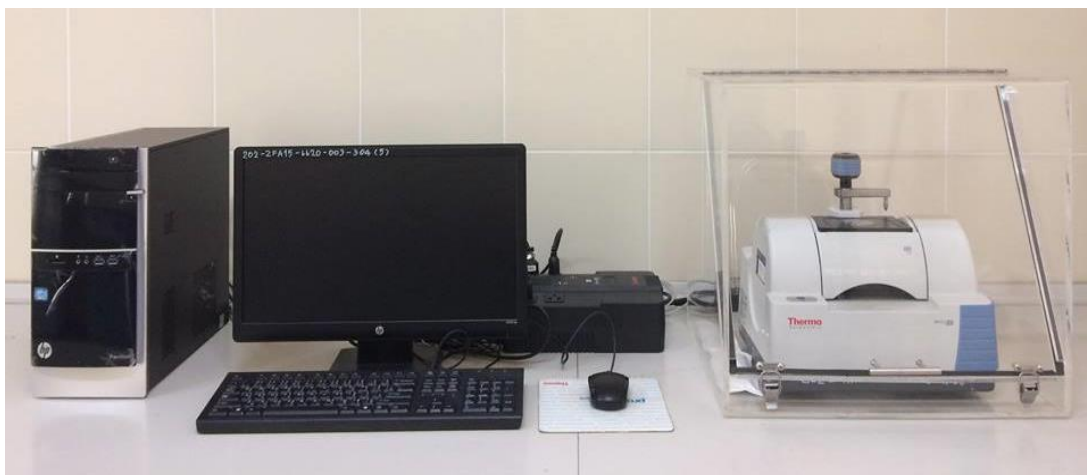
### เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สำหรับงานวิจัยนี้

#### 1. เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy)

เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared (IR) Spectroscopy) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร โดยอาศัยหลักการเกี่ยวกับการสั่น (Vibration) ของโมเลกุล ย่านของรังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างย่านวิสิเบิล (Visible) และย่านไมโครเวฟ (Microwave) โดยแบ่งออกได้ ดังนี้

1. ย่านอินฟราเรดใกล้ (Near infrared region)  $0.8\text{--}2.5\ \mu\text{m}$  ( $12500\text{--}4000\ \text{cm}^{-1}$ )
2. ย่านอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle infrared region)  $2.5\text{--}15\ \mu\text{m}$  ( $4000\text{--}666\ \text{cm}^{-1}$ )
3. ย่านอินฟราเรดไกล (Far infrared region)  $15\text{--}200\ \mu\text{m}$  ( $666\text{--}50\ \text{cm}^{-1}$ )

รังสีอินฟราเรดย่านอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle infrared region)  $2.5\text{--}15\ \mu\text{m}$  ( $4000\text{--}666\ \text{cm}^{-1}$ ) เป็นย่านที่จะนำไปใช้ในการหาหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์ มีความถี่ตรงกับความถี่การสั่นของพันธะ โคเวเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่พอเหมาะจะเกิดการสั่นของโมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสงแล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมา แสดงผลเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความถี่หรือ wavenumber กับค่าการส่งผ่านของแสง เรียกว่า IR spectrum ซึ่งลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะโมเลกุลของสาร จึงสามารถดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ที่ความถี่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะและน้ำหนักอะตอมของ functional group ในโมเลกุลนั้นๆ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Fourier Transform-Infrared Spectrometer (FT-IR)

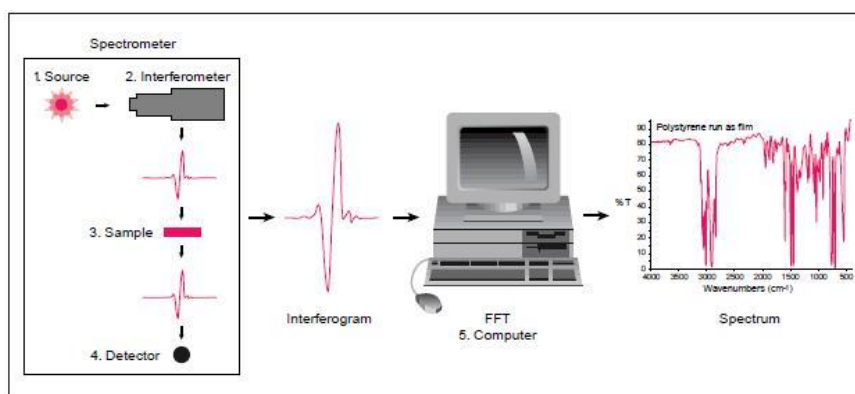


ภาพที่ ก.1 เครื่อง Furrier Transform–Infrared Spectrometer (FT–IR)

### Fourier transform infrared spectroscopy (FT–IR)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการกระตุ้น สารด้วยพลังงานแสง ช่วงแสงอินฟราเรด (Infrared light) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ สามารถบอกหมู่ฟังก์ชันของสาร นิยมใช้เป็นเทคนิคสำหรับหาเกี่ยวกับโครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น สารที่วิเคราะห์อาจจะ มี หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl, –OH), เมทิล (Methyl, –CH<sub>3</sub>) หรือคาร์บอนิล (Carbonyl, –CO) เป็นต้น ลักษณะของผลที่ได้คือ

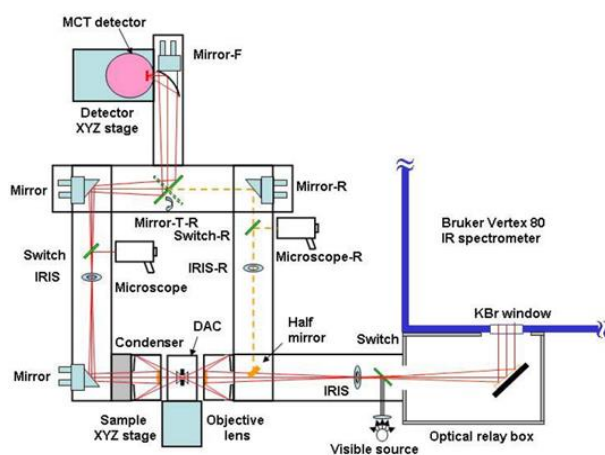
1. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องผ่านของแสง (% Transmittance) กับเลขคลื่น (Wavenumber)
2. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับเลขคลื่น (Wavenumber)



ภาพที่ ก.2 การทำงานของเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FT–IR)

### การทำงานของเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

เครื่อง FT-IR มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ เมื่อรังสีอินฟราเรดที่มีหลายความถี่จากแหล่งคลื่นรังสีอินฟราเรดผ่านเข้าไปยังอินเทอร์โพโรมิเตอร์ ลำแสงจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนที่เป็น beam splitter ลำแสงครึ่งหนึ่งจะผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ และกระจกที่เคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วคงที่ เมื่อลำแสงสะท้อนกลับมาที่ beam splitter จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันหรือการแทรกสอดแบบหักล้างของแต่ละความยาวคลื่น เมื่อแสงผ่านสารตัวอย่างไปยังตัววัดสัญญาณที่อ่านได้ทุกความถี่พร้อมกันกับช่วงสแกนของกระจก โดยที่อัตราการสแกนวัดสัญญาณและความเร็วของกระจกที่เคลื่อนที่ได้จะถูกควบคุมให้มีความถูกต้อง และคงที่ เรียกสัญญาณอ้างอิงจากตัววัดสัญญาณที่เกิดจากหลอด He - Ne laser ว่า internal reference laser สัญญาณที่ตัววัดสัญญาณ อ่านได้จะอยู่ในรูปอินเทอร์โพแกรม



ภาพที่ ก.3 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง Fourier transform-infrared spectroscopy (FT-IR)

### การวิเคราะห์ IR spectrum

IR spectrum มีประโยชน์ในการหาหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล แต่เนื่องจากมีพีคจำนวนมากจึงมีแนวทางในการแปรข้อมูลจาก IR spectrum ได้ดังนี้

1. ตรวจสอบหมู่คาร์บอนิลให้แถบที่มีความเข้มสูงในย่าน  $1680-1820\text{ cm}^{-1}$
2. วิเคราะห์สารประกอบคาร์บอนิล โดยตรวจสอบสารประกอบคาร์บอนิลมีหมู่ฟังก์ชันอื่นที่พบใน IR spectrum หรือไม่ วิเคราะห์ข้อมูลดังตาราง

ตารางที่ ก.1 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ในย่าน 4000–600  $\text{cm}^{-1}$

Wavenumber ( $\text{cm}^{-1}$ )	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
3600–3400	O–H stretching	3650–3590 $\text{cm}^{-1}$ (sh, w) แอลกอฮอล์อิสระ 3400–3200 $\text{cm}^{-1}$ (b) แอลกอฮอล์ที่เกิดพันธะไฮโดรเจน 3400–2400 $\text{cm}^{-1}$ (vs, vb) กรดคาร์บอกซิลิก
3500–3200	N–H stretching	3200–3400 $\text{cm}^{-1}$ (m) 1 <sup>o</sup> เอมีนและเอไมด์ มี 2 แถบ 3200–3400 $\text{cm}^{-1}$ (w) 2 <sup>o</sup> เอมีนและเอไมด์ มี 1 แถบ
3300 (vs)	=C–H stretching	3300 $\text{cm}^{-1}$ แอลไคน์ที่มี =C–H ที่ปลายโซ่
3100–3000 (w, sh)	=C–H stretching	แอลคีนและเบนซีน (อาจมีหลายพีค)
3000–2800	C–H stretching	หมู่ $\text{CH}_3$ , $\text{CH}_2$ และ CH ของแอลเคน
2850–2780	C–H stretching	แอลดีไฮด์
2250–2225	C=N stretching	ไนไตรท์ (m)
2260–2100	C=C stretching	แอลไคน์ (w) โมเลกุลที่สมมาตรจะไม่มีแถบนี้ปรากฏ
1820–1760 (s)	C=O stretching	แอนไฮไดรด์ (s) มี 2 แถบ
1800 (s)	C=O stretching	กรดคลอไรด์
1770 (s)	C=O stretching	แกมมา-แลกไทด์
1735 (s)	C=O stretching	เอสเทอร์
1725 (s)	C=O stretching	แอลดีไฮด์
1715 (s)	C=O stretching	คีโตน
1710 (s)	C=O stretching	กรดคาร์บอกซิลิก
1690–1650 (s)	C=O stretching	เอไมด์
1650–1600 (w)	C=C stretching	แอลคีน
1650–1590 (s–m)	N–H bending	1 <sup>o</sup> เอมีน
1650–1550 (w)	N–H bending	2 <sup>o</sup> เอมีน
1620–1590 (s)	N–H bending	1 <sup>o</sup> เอไมด์

ตารางที่ ก.1 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ในย่าน 4000–600  $\text{cm}^{-1}$  (ต่อ)

Wavenumber ( $\text{cm}^{-1}$ )	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
1550–1510 (s)	N–H bending	2 <sup>o</sup> เอไมด์
1600, 1580, 1500, 1450	C=C stretching	เบนซีนและเบนซีนที่มีหมู่แทนที่ความ เข้มไม่แน่นอน อาจมี 2, 3 หรือมีทั้ง 4 แถบ
1520 (s), 1350 (s)	NO <sub>2</sub> bending	สารประกอบไนโตร
1465–1450	C–H bending	หมู่ CH <sub>2</sub>
1450–1375	C–H bending	หมู่ CH <sub>3</sub>
1400–1000	C–F stretching	สารประกอบฟลูออไรด์
1300–1150	CH <sub>2</sub> –X	สารประกอบฮาโลเจน
1300–1000	C–O stretching	อีเทอร์และเอสเทอร์
1220	C–O stretching	ฟีนอล
780, 700	C–H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ meta)
825–800	C–H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ para)
800–600	C–Cl	สารประกอบคลอไรด์
600–500	C–Br	สารประกอบโบรมൈด์
500	C–I	สารประกอบไอโอดีน
1150	C–O stretching	3 <sup>o</sup> แอลกอฮอล์
1100	C–O stretching	2 <sup>o</sup> แอลกอฮอล์
1050	C–O stretching	1 <sup>o</sup> แอลกอฮอล์
990, 910	C–H (OOP bending)	แอลคีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่ , RCH=CH <sub>2</sub> )
970	C–H (OOP bending)	แอลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ , trans)
890	C–H (OOP bending)	แอลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ , R <sub>2</sub> C=CH <sub>2</sub> )
815	C–H (OOP bending)	แอลคีน (หมู่แทนที่ 3 หมู่ , R <sub>2</sub> C=CHR)
700–690	C–H (OOP bending)	แอลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ , cis)
750, 690	C–H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่)
750	C–H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ ortho)

คำย่อ : s = ความเข้มสูง, vs = ความเข้มสูงมาก, m = ความเข้มปานกลาง, w = ความเข้มต่ำ, vw = ความเข้มต่ำมาก, sh = แหวมคม, b = กว้าง, vb = กว้างมาก และ OOP (Out-of-plane) = การสั่นออกนอกระนาบ

## 2. ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/Visible spectrophotometer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วง ultra violet (UV) และ visible ความยาวคลื่นประมาณ 190–1000 nm ที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ซึ่งเรียกว่า spectrum ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้



ภาพที่ ก.4 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer

### ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง UV-Visible spectrophotometer

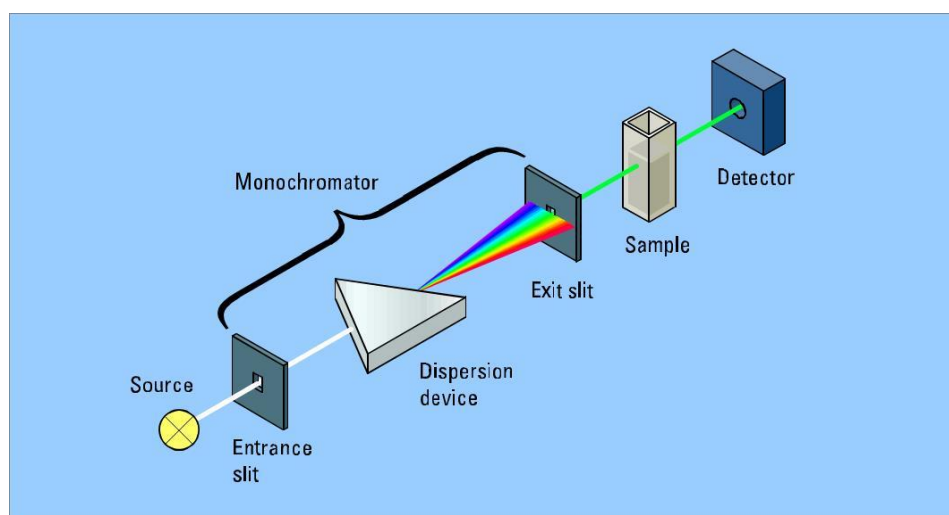
1. Light source แหล่งกำเนิดรังสี เป็นส่วนที่ให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการออกมาอย่างต่อเนื่องและคงที่ รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอ หลอดกำเนิดรังสีมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นรังสีที่เปล่งออกมา เช่น ช่วง UV จะใช้หลอด  $H_2$  and  $D_2$  lamp ให้ความยาว

คลื่นอยู่ในย่าน 160–380 nm และช่วง visible ใช้หลอด tungsten/halogen ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240–2500 nm เป็นต้น

2. Monochromator เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสง โดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสงซึ่งเป็นพหุโครมาติกให้เป็นแสงโมโนโครมาติก ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียวใช้ฟิลเตอร์ (Filter) ปริซึม (Prism) หรือเกรตติง (Grating)

Sample cell เซลล์ที่ใช้บรรจุสารละลายตัวอย่าง ส่วนใหญ่มีฝาปิดเพื่อกันแสงจากภายนอกเข้าไปรบกวน เซลล์ใส่สารตัวอย่าง หรือ cuvette ทำจากแก้วควอตซ์ (Quartz) ซิลิกา (Silica) มีหลายแบบ หลายรูปร่างขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ใช้

3. Detector ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืน โดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องวัดรังสีมีหลายชนิดที่นิยม ได้แก่ photomultiplier tube และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด silicon diode detector



ภาพที่ ก.5 องค์ประกอบของเครื่อง UV-Visible spectrophotometer

### การประยุกต์ใช้งาน

1. การวัดการดูดกลืนและการทะลุผ่านของคลื่นแสง เช่น ขึ้นตัวอย่างกระจก แก้ว แว่นตากันแดดคอนเทคเลนส์ กระจกเคลือบด้วยฟิล์มบาง หมึกพิมพ์ เครื่องสำอาง
2. การหาค่าการสะท้อนของแสงในขึ้นตัวอย่างฟิล์มและการเคลือบบนพื้นผิว ผ้า ผง โลหะ ผงออกไซด์ของโลหะ ผงสี พลาสติก และเซรามิก เป็นต้น



### 3. เครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine, UTM)

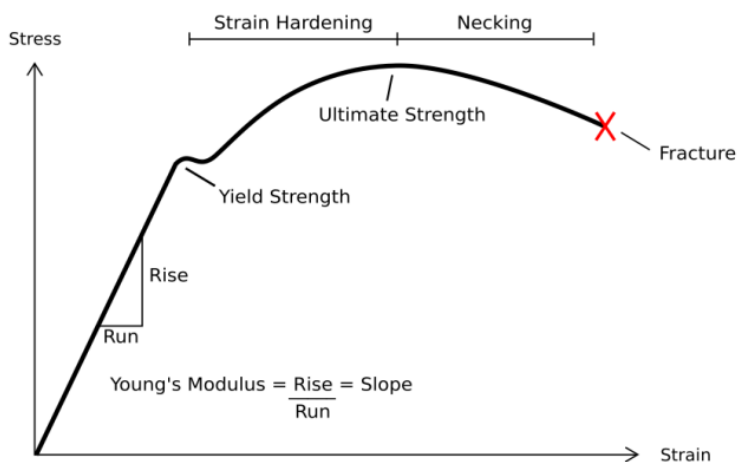
เครื่องทดสอบแรงดึง เป็นเครื่องมือทดสอบที่ใช้หาสมบัติแรงดึง (ความทนต่อแรงดึง, การยืดตัว ณ จุดขาด, ค่ามอดูลัส) ของชิ้นงานคงรูป



ภาพที่ ก.6 เครื่อง Universal testing machine (UTM)

#### หลักการทำงานของเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal testing machine, UTM)

ให้แรงดึงกับชิ้นทดสอบด้วยอัตราเร็วในการดึงคงที่และบันทึกค่าค่าแรงดึง (Tension force) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะการยืดตัว (Deformation) ของวัสดุ โดยขณะชิ้นทดสอบยืดออก จะมีแรงต้าน ซึ่งแรงต้านของชิ้นงานทดสอบนี้มีผลทำให้ตัววัดแรงสามารถวัดแรงออกมาได้ แรงที่วัดออกมามีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg) หรือนิวตัน (N) การทดสอบจะต้องดึงชิ้นทดสอบจนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน ซึ่งแรงต้านสูงสุดของชิ้นทดสอบเป็นผลที่ได้จากการวัดแรง ดังนั้นชิ้นงานทดสอบสามารถทนแรงดึงสูงสุดเท่ากับแรงต้านของชิ้นงานที่ทนได้ก่อนขาดจากกัน ลักษณะของผลที่ได้ คือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain)




ภาพที่ ก.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain)

### การประยุกต์ใช้งาน

จากผลการวิเคราะห์สามารถนำมาทำการวิเคราะห์ค่ามอดูลัส (Modulus) คือ ค่าความเค้นที่ทำให้วัสดุยืดตัวตามที่กำหนด, ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) คือ ความเค้นสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของชิ้นงานที่ได้รับจนเกิดการขาด มีหน่วยเป็น MPa หรือ  $\text{N/mm}^2$  และการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) คือ ร้อยละการยืดตัวของชิ้นทดสอบที่จุดขาดเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวเริ่มต้น

## ภาคผนวก ข

### ผลงานนิทรรศการโครงการนิสิต ครั้งที่ 7 มหาวิทยาลัยพะเยา



นิทรรศการโครงการนิสิต ครั้งที่ 7  
7<sup>th</sup> Student Research Project Exhibition  
ณ อาคารเรียนรอบ(หลังเดิม) มหาวิทยาลัยพะเยา

การเตรียมฟิล์มผสมระหว่างพอลิ(แลค-แลคไทด์)/พอลิ(บิวทิลีน อดิเพท-โค-เทอเรพทาเลท) โดยวิธีหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย และการทดสอบคุณสมบัติของฟิล์ม

Preparation of poly(L-lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend films by solvent casting method and their properties testing

นิสิต : วรปรัชญ์ ชัยคำ และ กมลวรรณ ทองชนะเศรษฐ์  
อาจารย์ที่ปรึกษา : บุญทริกา เทพสุคนธ์  
สังกัด : คณะวิทยาศาสตร์  
รหัส : Poster SC - 01

**บทคัดย่อ**

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ เตรียมจากพอลิ(แลค-แลคไทด์) ผสมกับพอลิ(บิวทิลีน อดิเพท-โค-เทอเรพทาเลท) อัตราส่วน 90/10 โดยวิธีการหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย ทำการศึกษาผลของน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณของพลาสติไซเซอร์ต่อฟิล์มผสม พลาสติไซเซอร์ที่ใช้คือพอลิ(เอทิลีนไกลคอล) 1500, 8000, 20000 ความเข้มข้น 1, 2, 3, 4 และ 5 phr จากผลการศึกษาพบว่าพลาสติไซเซอร์ที่เติมลงไปไม่เกิดแรงกระทำทางเคมีต่อพอลิเมอร์ ความโปร่งแสงของฟิล์มผสมลดลง เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นพลาสติไซเซอร์เพิ่มขึ้น และฟิล์มสามารถดูดกลืนรังสียูวีได้ นอกจากนี้ฟิล์มผสมมีค่าทนต่อแรงดึงและความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นพลาสติไซเซอร์เพิ่มขึ้น

**คำสำคัญ** : ฟิล์มผสม พลาสติไซเซอร์ พอลิ(แลค-แลคไทด์) พอลิ(บิวทิลีนอดิเพท-โค-เทอเรพทาเลท) หล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย

**Abstract**

Biodegradable packaging films can be prepared from poly(L-lactide) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) in ratio 90/10 by a solvent casting method. The effects of molecular weight and concentration of plasticizers on blend films were studied. The plasticizers are poly(ethylene glycol) which molecular weight 1500, 8000, 20000 and the concentration in 1, 2, 3, 4 and 5 phr. From the results, it can be concluded that the adding plasticizers weren't be chemical interaction with polymers. When the molecular weight and concentration of plasticizer increased, the transparence of blend films decreased and the films can be absorbed UV. Moreover, the tensile stress and elasticity of blend films increased with increasing of plasticizer molecular weight and concentrations.

**Key words** : Blend film, Plasticizer, poly(L-lactide), Poly(butylene adipate-co-terephthalate), Solvent casting

2



# นิทรรศการโครงงานนิสิต ครั้งที่ 7 มหาวิทยาลัยพะเยา 7<sup>th</sup> Student Research Project Exhibition

## การเตรียมฟิล์มผสมระหว่างพอลิ(แลคไทด์)/พอลิ(บิวทิลีน อดิเพต-โค-เทอโรฟทาเลท) โดยวิธีหล่อชั้นรูป ด้วยตัวทำละลาย และการทดสอบคุณสมบัติของฟิล์ม

Preparation of poly(L-lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend films by solvent casting method and their properties testing

วรวิทย์ชัย คำ, ภูมิวรรณ ทองธนะเศรษฐ์ และบุญศรีกา เพทสุคนธ์  
สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

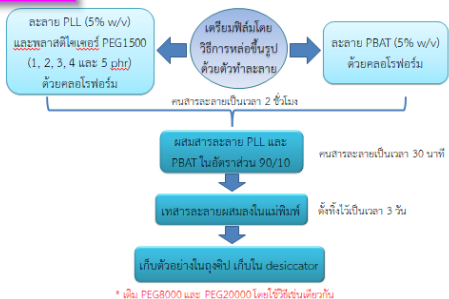
### บทคัดย่อ

ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ ได้เริ่มจากพอลิ(แลคไทด์) ผสมกับพอลิ(บิวทิลีน อดิเพต โค เทอโรฟทาเลท) อัตราส่วน 90/10 โดยวิธีการหล่อชั้นรูปด้วยตัวทำละลายทางเคมีของน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณของพลาสติกโพลีเอสเตอร์ที่ผสมพอลิ(แลคไทด์) 1500, 8000 และ 20000 ความเข้มข้น 1, 2, 3, 4 และ 5 g/10 จากผลการศึกษา พบว่าพลาสติกโพลีเอสเตอร์ที่เติมลงไปไม่เกิดแรงกระทำทางเคมีต่อพอลิเมอร์ ความโปร่งแสงของฟิล์มลดลงเมื่อนำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นพลาสติกโพลีเอสเตอร์เพิ่มขึ้น และฟิล์มสามารถดูดกลืนรังสียูวีได้ นอกจากนี้ฟิล์มผสมมีค่าทนต่อแรงดึงและความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักโมเลกุล และความเข้มข้นพลาสติกโพลีเอสเตอร์

### ความเป็นมา

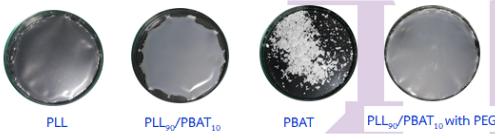
ปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นที่เกิดจากพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ทำให้เกิดความสนใจที่จะพัฒนาพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เข้ากันได้กับพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น พอลิแลคติก แอซิด (Polylactic Acid, PLA) และพอลิ(บิวทิลีน อดิเพต-โค-เทอโรฟทาเลท) (Polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) โดยพอลิเอสเตอร์ที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันคือพอลิแลคติก เนื่องจากมีคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางความร้อนที่ดี นิยมนำไปทำเป็นบรรจุภัณฑ์ และวัสดุทางการแพทย์ แต่อย่างไรก็ตามความโปร่งแสงในการใช้งานของ PLA จึงจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้เหมาะสมด้วยการทำผสม (blending) หรือการผสมด้วยพอลิเอสเตอร์อื่นเพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการ ซึ่ง PBAT ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากมีลักษณะความยืดหยุ่นสูง แต่ด้วยความเข้ากันได้ไม่ตรงระหว่าง PLA และ PBAT จึงทำให้สมบัติต่างๆ ไม่ได้ถูกปรับปรุงโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ดังนั้นในกรณีนี้จึงปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยการเติมสารเพิ่มความเข้ากัน (plasticizer) เพื่อจะพัฒนาพอลิเอสเตอร์ที่ผสมที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สำหรับประยุกต์ใช้ งานด้านบรรจุภัณฑ์

### วิธีการทดลอง

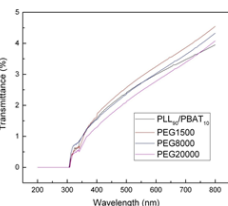


### ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ FT-IR ของฟิล์มผสม PLL/PBAT ที่ทำการเติม PEG เป็นพลาสติไซเซอร์เป็นการศึกษาแรงกระทำทางเคมีระหว่างกันของ PLL, PBAT และ PEG จะเห็นได้ว่าพีคของ PLL, PBAT และ PEG ไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากทำการผสมแล้ว แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์และพลาสติไซเซอร์ไม่เกิดการดึงระหว่งทางเคมีต่อกัน



ภาพ 1 FT-IR spectra ของ PLL, PBAT, PEG และ PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub>

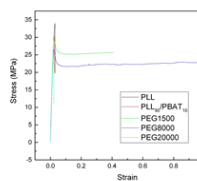


ภาพ 2 % Transmittance ของ PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub>, PEG1500, PEG8000 และ PEG20000 ที่ความเข้มข้น 1 g/10

ตารางที่ 1 ค่าความโปร่งแสงและค่าสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PLL/PBAT

Film	Plasticizer Concentration (phr)	T <sub>660</sub> (%)	T <sub>280</sub> (%)	Stress at break (MPa)	Elongation at break (%)	Secant modulus (N/mm)
PLL		54.28±0.04	12.32±0.04	24.29±7.35	2.57±0.50	82.27±3.74
PLL <sub>90</sub> /PBAT <sub>10</sub>		3.30±0.00	0.30±0.01	28.08±2.26	2.58±0.19	77.35±3.75
PEG1500	1	3.61±0.00	0.38±0.02	21.70±4.72	56.81±28.65	75.72±1.39
	2	3.61±0.00	0.33±0.03	23.01±2.29	121.41±9.52	71.77±2.20
	3	3.26±0.00	0.31±0.03	19.45±7.38	127.97±17.87	69.42±5.65
	4	2.77±0.00	0.26±0.03	17.51±1.30	135.61±13.72	53.23±2.57
	5	1.81±0.00	0.23±0.02	22.73±1.27	144.06±8.89	20.60±4.30
PEG8000	1	3.40±0.00	0.14±0.01	24.50±1.33	158.97±10.90	61.62±2.17
	2	3.31±0.00	0.12±0.00	21.00±3.52	146.49±27.15	43.59±4.34
	3	2.99±0.00	0.15±0.00	21.99±1.18	108.72±4.65	58.12±5.54
	4	2.30±0.00	0.20±0.00	14.53±1.90	21.04±6.91	59.59±9.48
	5	1.33±0.00	0.23±0.00	18.03±1.75	5.05±0.78	64.54±4.92
PEG20000	1	3.12±0.00	0.65±0.00	23.13±5.54	2.70±1.28	73.19±2.51
	2	3.04±0.00	0.65±0.02	23.81±5.19	3.81±3.63	81.45±5.80
	3	2.20±0.00	0.60±0.00	20.18±1.11	60.16±27.18	82.65±4.77
	4	2.04±0.00	0.62±0.00	17.61±3.54	161.84±13.84	66.07±1.50
	5	1.08±0.00	0.68±0.00	19.86±1.56	126.66±17.92	66.55±1.51

คุณสมบัติโปร่งแสงของฟิล์มผสม PLL/PBAT ต่างกันไป โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณพลาสติไซเซอร์ PEG และการเติมสารเข้ากันโมเลกุลของ PEG ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร (T<sub>660</sub>) และ 280 นาโนเมตร (T<sub>280</sub>) แสดงให้เห็นถึงความโปร่งแสง และคุณสมบัติการป้องกัน UV ของฟิล์มตามลำดับ ฟิล์ม PLA มีความโปร่งแสงลดลงเมื่อผสมกับ PBAT และจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติม PEG และมีค่าลดลงอีกครั้งเมื่อเติม PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้น ค่า stress at break, strain at break และ %elongation at break จะมีค่าลดลงเมื่อเติมพลาสติไซเซอร์ PEG ลงไป และเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อนำหนักโมเลกุลของ PEG เพิ่มขึ้น ส่วนค่า secant modulus เมื่อเติมพลาสติไซเซอร์ PEG ทำให้ค่า secant modulus ลดลง



ภาพ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ strain ของ PLL<sub>90</sub>/PBAT<sub>10</sub>, PEG1500, PEG8000 และ PEG20000 ที่ความเข้มข้น 1 g/10

### บทสรุป

ฟิล์มผสมที่ระหว่าง PLL/PBAT อัตราส่วน 90/10 สามารถเตรียมได้โดยวิธีหล่อชั้นรูปด้วยตัวทำละลาย โดยมี PEG1500, PEG8000 และ PEG20000 เป็นพลาสติไซเซอร์ พบว่าไม่เกิดแรงกระทำทางเคมีต่อพอลิเอสเตอร์ ฟิล์มผสมมีความโปร่งแสงลดลง เมื่อนำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นพลาสติไซเซอร์เพิ่มขึ้น และฟิล์มสามารถดูดกลืนรังสียูวีได้จากผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม พบว่าฟิล์มมีค่าทนต่อแรงดึงและความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น เมื่อนำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นพลาสติไซเซอร์เพิ่มขึ้น

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ที่ช่วยปฏิบัติงานวิจัย และช่วยปฏิบัติงานการวิจัยด้วยดี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่อำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์เครื่องมือ สารเคมี ตลอดจนคณาจารย์ต่างๆ ของการวิจัยครั้งนี้ด้วย

### เอกสารอ้างอิง

- Wang, L. F.; Zhu, J. W.; Hong, S. L. *Food Science and Technology*. 2016, 68, 454-461.
- Gullipoti, S.; Komathi, N.; Molloy, R.; Luytjes, S.; Punjvoras, W.; Wornatthapong, P. *Composites Science and Technology*. 2015, 119, 115-123.

# นิทรรศการ โครงการบัณฑิต

7<sup>th</sup> Student Research Project Exhibition



## มหาวิทยาลัยพะเยา

ขอขอบเกียรติบัตรเพื่อแสดงว่า

นายวรปรัชญ์ ชัยคำ

ได้เข้าร่วมการประกวดนิทรรศการโครงการบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพชีวภาพ

เรื่อง การเตรียมฟิล์มผสมระหว่างพอลิ(แอล-แลคไทด์)/พอลิ(บิวทิลีน อดิเพท-โค-เทอเรฟทาเลท)

. โดยวิธีหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย และการทดสอบคุณสมบัติของฟิล์ม

ในโครงการนิทรรศการโครงการบัณฑิต ครั้งที่ 7 เมื่อวันที่ 8 ธันวาคม 2560

ณ อาคารเรียนรวม(หลังเดิม) มหาวิทยาลัยพะเยา

ธันวาคม ๒๕๖๐

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ วัฒนสาร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและประกันคุณภาพ มหาวิทยาลัยพะเยา



# นิทรรศการ 7 โครงการนิสิต

7<sup>th</sup> Student Research Project Exhibition



## มหาวิทยาลัยพะเยา

ขอขอบเกียรติบัตรเพื่อแสดงว่า

นายวรปรัชญ์ ชัยคำ

ได้รับรางวัล รองชนะเลิศอันดับที่ 1

การประกวดนิทรรศการโครงการนิสิต สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพชีวภาพ

เรื่อง การเตรียมฟิล์มผสมระหว่างพอลิ(แอล-แลคไทด์)/พอลิ(บิวทิลีน อดีเพท-โค-เทอเรฟทาเลท)

โดยวิธีหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย และการทดสอบคุณสมบัติของฟิล์ม

ในโครงการนิทรรศการโครงการนิสิต ครั้งที่ 7 เมื่อวันที่ 8 ธันวาคม 2560

ณ อาคารเรียนรวม(หลังเดิม) มหาวิทยาลัยพะเยา

วิบูลย์ วัฒนาร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ วัฒนาร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและประกันคุณภาพ มหาวิทยาลัยพะเยา



มหาวิทยาลัยพะเยา

ขอขอบเกียรติบัตรเพื่อแสดงว่า

นางสาวกมลวรรณ ทองธนะเศรษฐ์

ได้เข้าร่วมการประกวดนิทรรศการโครงการนิสิต สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพชีวภาพ

เรื่อง การเตรียมฟิล์มผสมระหว่างพอลิ(แอล-แลคไทด์)/พอลิ(บีวทีลิน อติเพท-โค-เทอเรฟทาเลท)

โดยวิธีหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย และการทดสอบคุณสมบัติของฟิล์ม

ในโครงการนิทรรศการโครงการนิสิต ครั้งที่ 7 เมื่อวันที่ 8 ธันวาคม 2560

ณ อาคารเรียนรวม(หลังเดิม) มหาวิทยาลัยพะเยา

วิบูล วัฒนธร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ วัฒนธร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและประกันคุณภาพ มหาวิทยาลัยพะเยา



# นิทรรศการ 7 โครงการนิสิต

7<sup>th</sup> Student Research Project Exhibition



มหาวิทยาลัยพะเยา

ขอขอบเกียรติบัตรเพื่อแสดงว่า

นางสาวกมลวรรณ ทองธนะเศรษฐ์

ได้รับรางวัล รองชนะเลิศอันดับที่ 1

การประกวดนิทรรศการโครงการนิสิต สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพชีวภาพ

เรื่อง การเตรียมฟิล์มผสมระหว่างพอลิ(แอล-แลคไทด์)/พอลิ(บิวทิลีน อดิเพท-โค-เทอเรฟทาเลท)

โดยวิธีหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย และการทดสอบคุณสมบัติของฟิล์ม

ในโครงการนิทรรศการโครงการนิสิต ครั้งที่ 7 เมื่อวันที่ 8 ธันวาคม 2560

ณ อาคารเรียนรวม(หลังเดิม) มหาวิทยาลัยพะเยา

วิบูลย์ วัฒนาร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ วัฒนาร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและประกันคุณภาพ มหาวิทยาลัยพะเยา



ประวัติผู้วิจัย

## ประวัติผู้ศึกษาวิจัย

ชื่อ-สกุล	นายวรปรัชญ์ ชัยคำ
วันเดือนปีเกิด	16 มิถุนายน 2539
ประวัติการศึกษา	ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน ปีที่สำเร็จการศึกษา พ.ศ. 2553 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาคารจังหวัดน่าน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน ปีที่สำเร็จการศึกษา พ.ศ. 2556 ระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยพะเยา อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา ปีที่สำเร็จการศึกษา พ.ศ. 2560
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 45 หมู่ 2 บ้านไชยสถาน ตำบลไชยสถาน อำเภอเมืองน่าน จังหวัดน่าน รหัสไปรษณีย์ 55000
เบอร์ติดต่อ	097-9674169
อีเมลล์	woraprat.ch@hotmail.com

## ประวัติผู้ศึกษาวิจัย

<b>ชื่อ-สกุล</b>	นางสาวกมลวรรณ ทองชนะเศรษฐ์
<b>วันเดือนปีเกิด</b>	19 สิงหาคม 2539
<b>ประวัติการศึกษา</b>	ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1 โรงเรียนอักษรเทพประสิทธิ์ เมืองพัทธยา อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี ปีที่สำเร็จการศึกษา พ.ศ. 2551 ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 2-3 โรงเรียนเซนต์โยเซฟศรีเพชรบูรณ์ ตำบลชอนไพร อำเภอมืองเพชรบูรณ์ จังหวัดเพชรบูรณ์ ปีที่สำเร็จการศึกษา พ.ศ. 2553 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเซนต์โยเซฟศรีเพชรบูรณ์ ตำบลชอนไพร อำเภอมืองเพชรบูรณ์ จังหวัดเพชรบูรณ์ ปีที่สำเร็จการศึกษา พ.ศ. 2556 ระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยพะเยา อำเภอมืองพะเยา จังหวัดพะเยา ปีที่สำเร็จการศึกษา พ.ศ. 2560
<b>ที่อยู่ปัจจุบัน</b>	บ้านเลขที่ 23 หมู่ 10 ตำบลบึงสามพัน อำเภอบึงสามพัน จังหวัดเพชรบูรณ์ รหัสไปรษณีย์ 67160
<b>เบอร์ติดต่อ</b>	096-6677819
<b>อีเมลล์</b>	kamonwan.tn@hotmail.com