



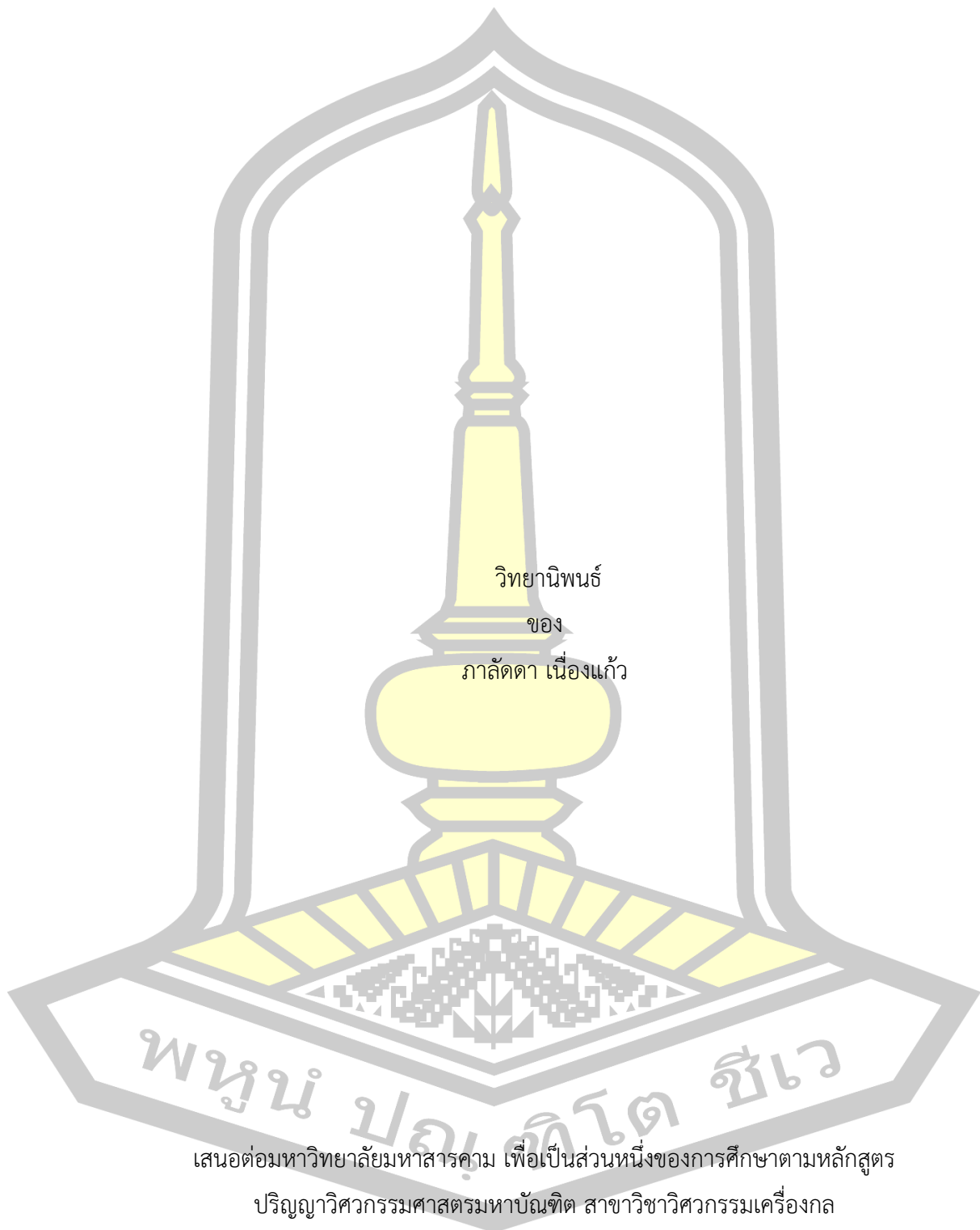
การเตรียมและการเติมสารเติมแต่งในพลาสติกชีวภาพ สำหรับการขึ้นรูปเป็นถุงพลาสติก

วิทยานิพนธ์
ของ
ภาลัดดา เนื่องแก้ว

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
เมษายน 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การเตรียมและการเติมสารเติมแต่งในพลาสติกชีวภาพ สำหรับการขึ้นรูปเป็นถุงพลาสติก



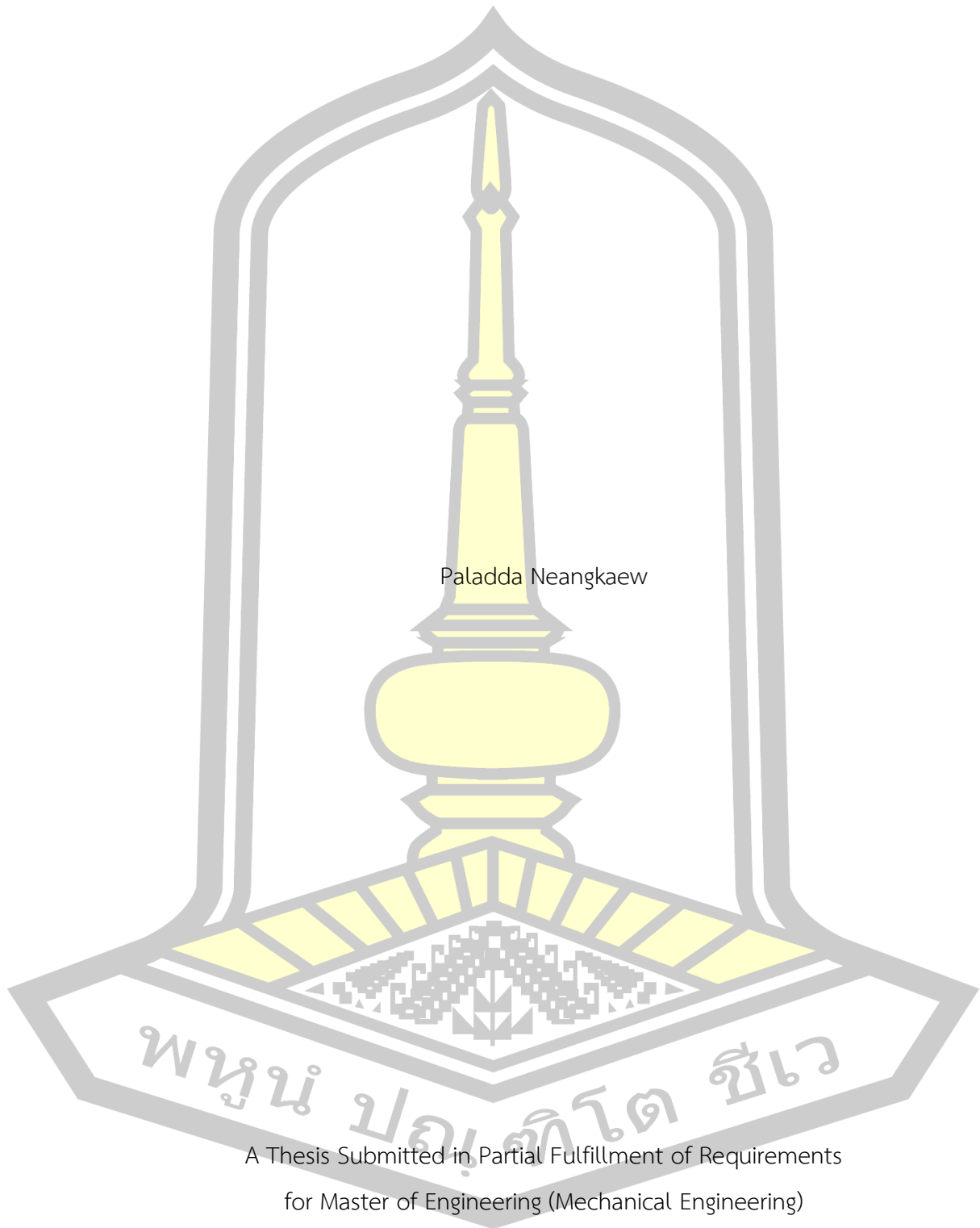
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

เมษายน 2562

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Preparation of Bioplastics and the Addition of Additive for Producing Plastic Bags



Paladda Neangkaew

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Mechanical Engineering)

April 2019

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวภาลัดดา เนื่องแก้ว
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. ภัทร์นฤน วรจิตติพล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. ยศฐา ศรีเทพ)

.....กรรมการ

(รศ. ดร. สุตสาคร อินธิเดช)

.....กรรมการ

(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การเตรียมและการเติมสารเติมแต่งในพลาสติกชีวภาพ สำหรับการขึ้นรูปเป็น ถุงพลาสติก		
ผู้วิจัย	ภาลัดดา เนื่องแก้ว		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยศฐา ศรีเทพ		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2562

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติความเหนียว ความยืดหยุ่น และลดต้นทุนการผลิตของฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT) ด้วยการเติมพลาสติกไซเซออร์ และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยกระบวนการหล่อขึ้นรูปฟิล์มด้วยตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม ทำการศึกษาผลของการเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ปริมาณการเติม 2 ถึง 15 phr เมื่อได้ปริมาณการเติมพลาสติกไซเซออร์ที่เหมาะสมจะนำไปศึกษาผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 3 ขนาดคือ ขนาด 40 nm 1 μm และ 2 μm ที่ปริมาณเติม 5 10 และ 15 phr จากนั้นนำฟิล์มไปศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน อัตราการหลอมไหล การส่องผ่านของแสง ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการย่อยสลายทางชีวภาพ ผลของการเติมพลาสติกไซเซออร์พบว่า ที่ปริมาณการเติม 10 phr ส่งผลให้ค่าความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นสูงสุด จากเดิมความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงานที่ไม่เติมพลาสติกไซเซออร์มีค่าเท่ากับ 14.37 MPa และ 587 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เพิ่มขึ้นเป็น 16.39 MPa และ 648 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่า CaCO_3 ทำให้สมบัติทางกลลดลง ที่ CaCO_3 ขนาด 40 nm ปริมาณการเติม 15 phr ค่าความเค้นแรงดึงจาก 16.39 MPa ลดลงเหลือ 14.62 MPa และการยืดตัว ณ จุดขาดจาก 648 เปอร์เซ็นต์ ลดลงเหลือ 390 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการหลอมไหลเท่ากับ 54.50 g/10 min CaCO_3 ส่งผลให้ค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอม (ΔH_m) ลดลงและลักษณะทางสัณฐานวิทยา มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิวของฟิล์ม การย่อยสลายทางชีวภาพหลังฝังกลบในดิน 90 วัน พบว่า น้ำหนักโมเลกุลลดลงเกิดจากการแตกหักของพันธะภายในสายโซ่ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเค้นแรงดึงที่เพิ่มขึ้นและการยืดตัว ณ จุดขาดที่ลดลง

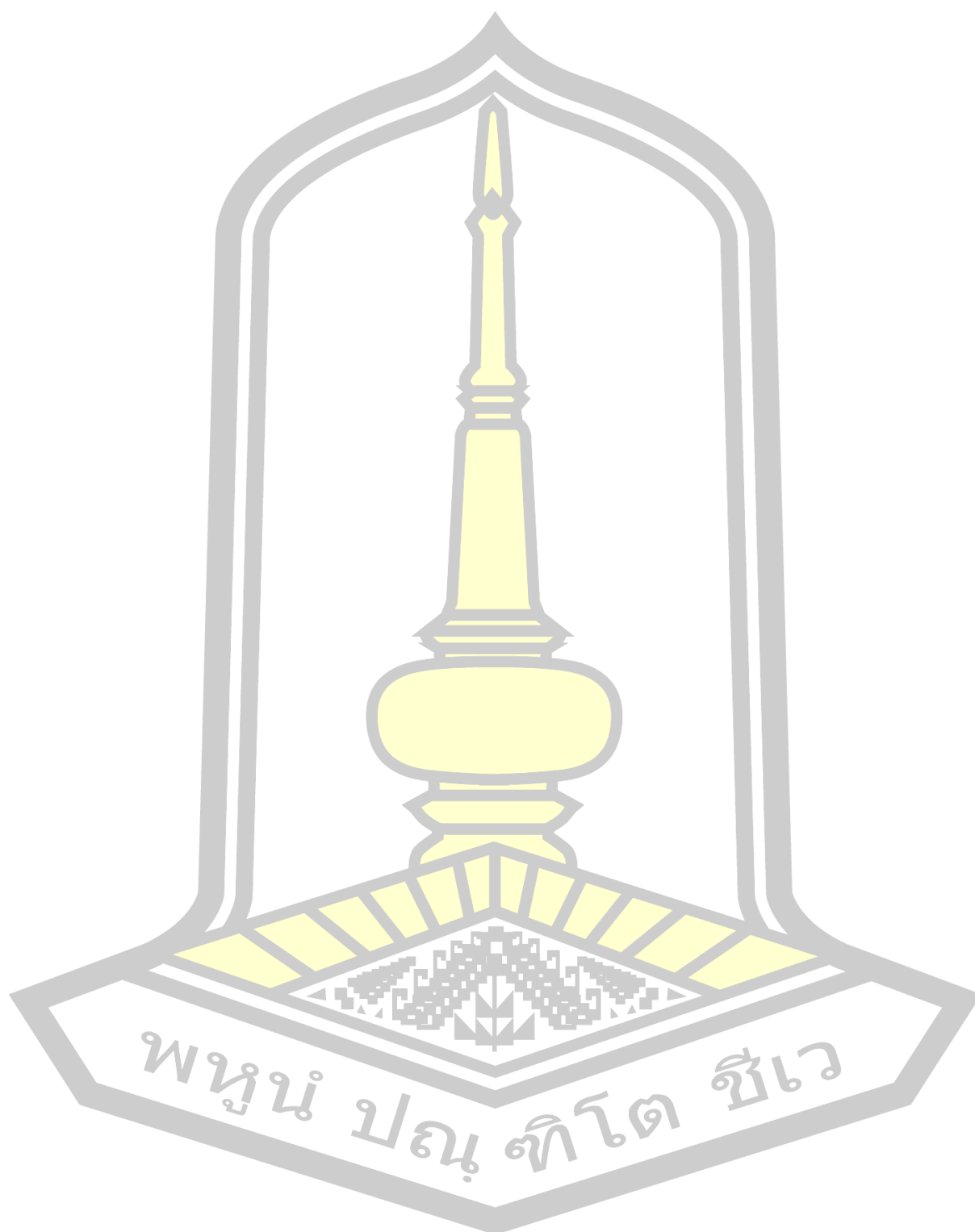
คำสำคัญ : พลาสติกย่อยสลายได้, พอลิแลคติกแอซิด, พลาสติกไซเซออร์, แคลเซียมคาร์บอเนต

TITLE	Preparation of Bioplastics and the Addition of Additive for Producing Plastic Bags		
AUTHOR	Paladda Neangkaew		
ADVISORS	Assistant Professor Yottha Srithep , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Mechanical Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2019

ABSTRACT

This thesis aims to increased toughness, flexibility, and reduced cost of poly(lactic acid) films blended with poly(butylene adipate-co-terephthalate), plasticizer and calcium carbonate by solvent casting process using chloroform as the solvent. The effect of the addition of a plasticizer at 2 to 15 phr was studied. After finding the optimum of the plasticizer, we studied the effect of calcium carbonate 3 sizes; 40 nm, 1 μm and 2 μm at 5 10 and 15 phr. We found that, the optimum plasticizer was 10 phr, with highest mechanical properties; tensile strength and elongation at break. The tensile strength and elongation at break of samples without plasticizer was 14.37 MPa and 587 percent respectively and for the samples with 10 phr plasticizer the tensile strength and elongation at break increased to 16.39 MPa and 648 percent respectively. For the samples with added calcium carbonate (CaCO_3), CaCO_3 size 40 nm at 15 phr reduced mechanical properties. The tensile strength decreased from 16.39 MPa to 14.62 MPa and elongation at break decreased from 648 percent to 390 percent with melt flow index 54.50 g / 10 min. CaCO_3 reduced heat of melting (ΔH_m) and from morphological study CaCO_3 was distributed uniformly throughout the surface of the film. The biodegradation after landfill in the soil for 90 days showed that molecular weight decreased caused by the breakage of the chain intramolecular; corresponds to the increased tensile strength and decreased elongation at break.

Keyword : Biodegradable plastic, Poly(lactic acid), Plasticizer, Calcium carbonate



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้รับทุนจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ปี 2560 โดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความรู้และความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยศฐา ศรีเทพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาสละเวลามาให้คำปรึกษารวมทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดทั้งกำลังใจแก่ผู้วิจัย และแนวทางที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทรนฤน วรจิตติพล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.สุตสาคร อินธิเดช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจแก้วิทยานิพนธ์ตลอดจนให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ยอดธง ไบมาก และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ สถานที่ และอื่น ๆ ในการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งนำไปสู่การจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสาขาวิศวกรรมชีวภาพ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และบุคคลอื่น ๆ ที่เสียสละเวลาให้คำปรึกษาแนะนำ ช่วยเหลือ และชี้แนวทางที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ แรงแบ้นดาลใจ และให้การสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างด้วยดีเสมอมา ความสำเร็จทุกประการขอบอบแก่ผู้มีพระคุณที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด

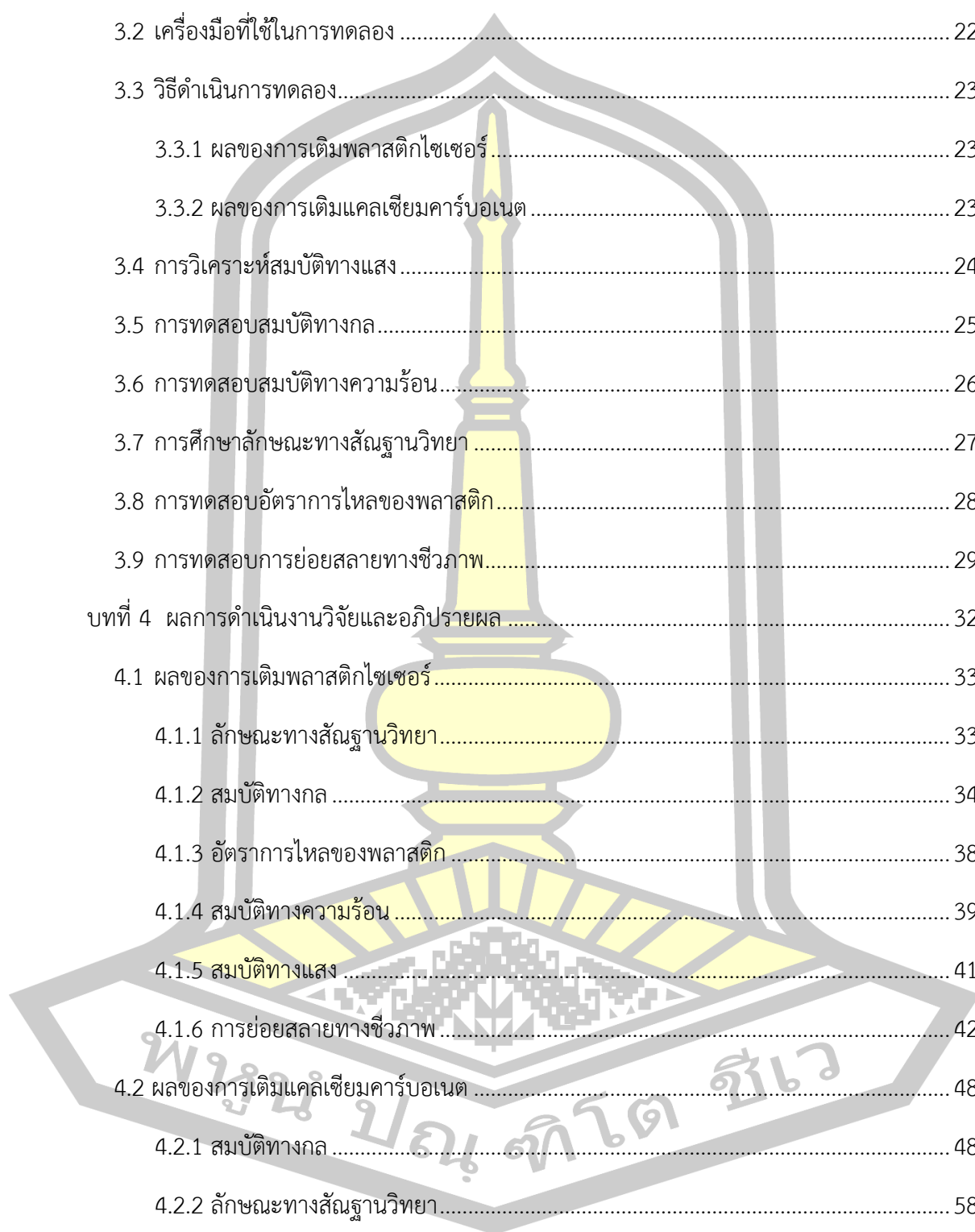
ภาลัดดา เนื่องแก้ว

พญูนุ ปณฺ ทิโต ชีเว

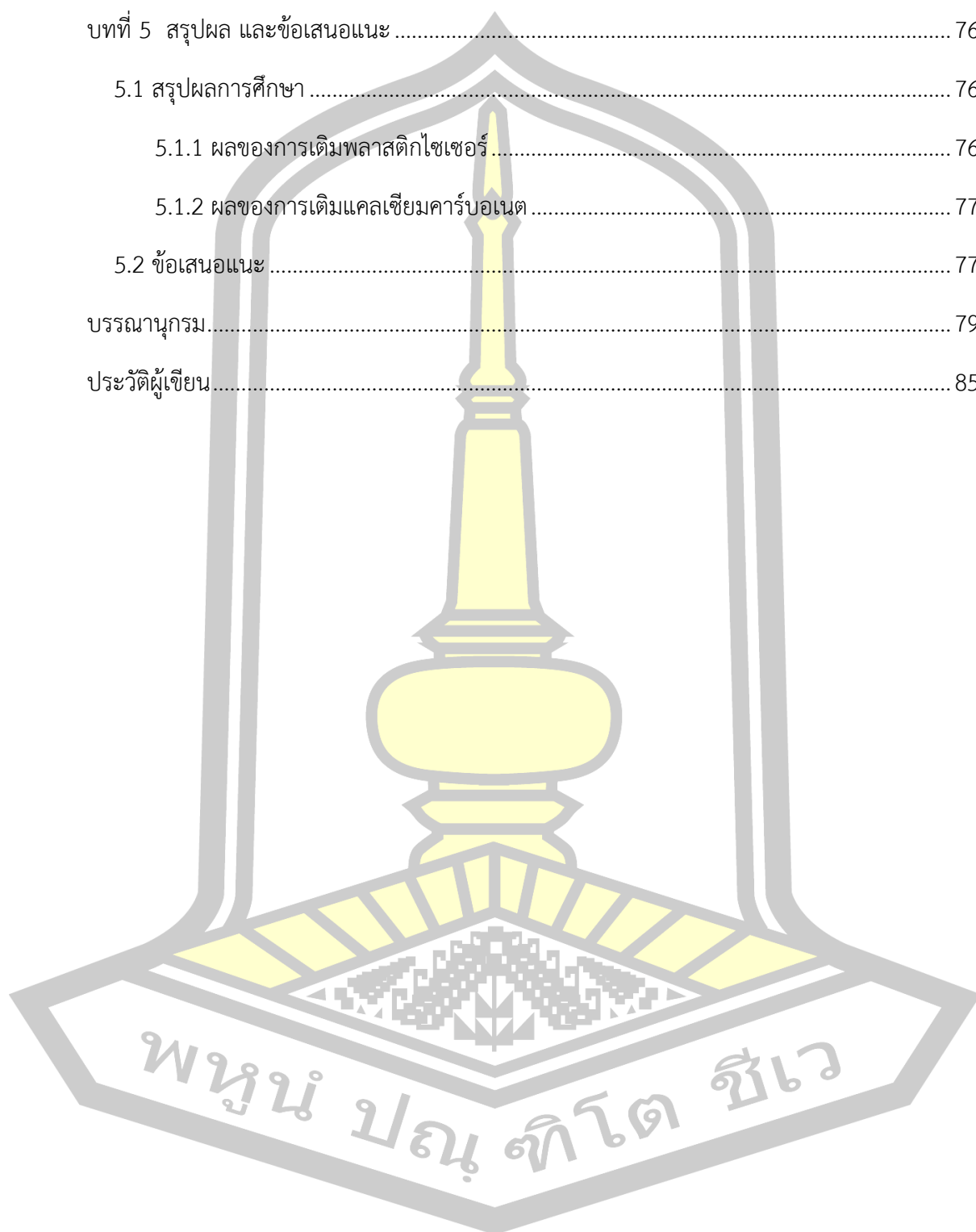
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 แนวคิดของงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 พลาสติกชีวภาพ.....	6
2.2 พอลิแลคติกแอซิด.....	9
2.3 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท.....	12
2.4 พลาสติกไฮด์เซอรั.....	14
2.5 แคลเซียมคาร์บอเนต.....	16
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	22

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	22
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	22
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	23
3.3.1 ผลของการเติมพลาสติกไซเซอร์.....	23
3.3.2 ผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต.....	23
3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางแสง	24
3.5 การทดสอบสมบัติทางกล.....	25
3.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	26
3.7 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา	27
3.8 การทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก.....	28
3.9 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ.....	29
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัยและอภิปรายผล	32
4.1 ผลของการเติมพลาสติกไซเซอร์.....	33
4.1.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	33
4.1.2 สมบัติทางกล	34
4.1.3 อัตราการไหลของพลาสติก	38
4.1.4 สมบัติทางความร้อน	39
4.1.5 สมบัติทางแสง	41
4.1.6 การย่อยสลายทางชีวภาพ.....	42
4.2 ผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต	48
4.2.1 สมบัติทางกล	48
4.2.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา.....	58
4.2.3 อัตราการไหลของพลาสติก	60
4.2.4 สมบัติทางความร้อน	63



4.2.5 การย่อยสลายทางชีวภาพ	69
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปผลการศึกษา	76
5.1.1 ผลของการเติมพลาสติกไฮเซอริ	76
5.1.2 ผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต	77
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
บรรณานุกรม	79
ประวัติผู้เขียน	85



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 สัดส่วนของการเติมพลาสติกไซเซออร์ (plasticizer) ชนิด Triacetin ที่ต้องการศึกษา.....	3
ตาราง 2 ชื่อทางการค้าของ PBAT ตามบริษัทผู้ผลิต [22]	14
ตาราง 3 สมบัติทางกลของ PLA และ PLA ผสม CaCO_3 [28]	17
ตาราง 4 เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุผสม PLA ที่ไม่เติมและเติม CaCO_3 ในปริมาณต่าง ๆ [26]	18
ตาราง 5 ผลการทดสอบการดึงของ PLA/PBAT/ chain extender [5].....	19
ตาราง 6 สัดส่วนของการเติมพลาสติกไซเซออร์ (Plasticizer) ชนิด Triacetin ที่ต้องการศึกษา.....	23
ตาราง 7 ขนาดและสัดส่วนของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3)	24
ตาราง 8 ผลการทดสอบแรงดึงของฟิล์มพลาสติก PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์	36
ตาราง 9 ผลการทดสอบอัตราการไหลของฟิล์มพลาสติก PLA/PBAT/Plasticizer	39
ตาราง 10 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์.....	40
ตาราง 11 ร้อยละการส่องผ่านของแสงของฟิล์มพลาสติก PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์	42
ตาราง 12 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มก่อนและหลังการฝัง กลบในดินเป็นเวลา 90 วัน	45
ตาราง 13 น้ำหนักโมเลกุลของฟิล์มก่อนและหลังการฝังกลบในดินเป็นเวลา 90 วัน	47
ตาราง 14 สมบัติทางกลของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO_3 ขนาด 40 นาโนเมตร	50
ตาราง 15 สมบัติทางกลของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO_3 ขนาด 1 ไมโครเมตร	53
ตาราง 16 สมบัติทางกลของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO_3 ขนาด 2 ไมโครเมตร	55
ตาราง 17 ค่าอัตราการไหล (melt flow index, MFI) ของการเติม CaCO_3 ขนาด 40 นาโนเมตร .	61

ตาราง 18 ค่าอัตราการไหล (melt flow index, MFI) ของการเติม CaCO_3 ขนาด 1 ไมโครเมตร .. 62

ตาราง 19 ค่าอัตราการไหล (melt flow index, MFI) ของการเติม CaCO_3 ขนาด 2 ไมโครเมตร .. 63

ตาราง 20 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต
ขนาด 40 นาโนเมตร 64

ตาราง 21 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่การเติมแคลเซียม
คาร์บอเนตขนาด 1 ไมโครเมตร..... 66

ตาราง 22 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่การเติมแคลเซียม
คาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร..... 68

ตาราง 23 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดก่อนและหลังการฝังกลบ 90 วัน
ของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร 70

ตาราง 24 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดก่อนและหลังการฝังกลบ 90 วัน
ของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 1 ไมโครเมตร 72

ตาราง 25 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดก่อนและหลังการฝังกลบ 90 วัน
ของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร 74



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 โครงสร้างโมเลกุลของกรดแลคติก [18]	10
ภาพประกอบ 2 ขั้นตอนของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวงของ PLA [19]	10
ภาพประกอบ 3 ค่ามอดูลัสและการยืดตัวของ PLA เทียบกับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ [9].....	12
ภาพประกอบ 4 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของ PBAT [21].....	13
ภาพประกอบ 5 SEM micrographs of the fracture surfaces of tensile specimens: (a) neat PLA, (b) 2.5 wt% NPCC, (c) 5 wt% NPCC, (d) 7.5 wt% NPCC [18]	18
ภาพประกอบ 6 เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic Stirrer).....	24
ภาพประกอบ 7 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer รุ่น UV-1800 [31]	25
ภาพประกอบ 8 เครื่องทดสอบแรงดึง (texture analyser).....	26
ภาพประกอบ 9 เครื่อง Differential scanning Calorimeter (DSC) รุ่น DSC-4000	27
ภาพประกอบ 10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (MiniSEM).....	28
ภาพประกอบ 11 เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก Melt Flow Indexer รุ่น MP1200. 29	
ภาพประกอบ 12 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังกลบในดิน.....	30
ภาพประกอบ 13 แผนผังการทำงานวิจัย.....	31
ภาพประกอบ 14 พื้นที่หน้าตัดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์: (a) 80/20/0, (b) 80/20/2, (c) 80/20/5, (d) 80/20/10, (e) 80/20/15	34
ภาพประกอบ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของฟิล์ม PLA PBAT และ PLA/PBAT: 80/20	35
ภาพประกอบ 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์.....	36
ภาพประกอบ 17 ค่าความเค้นแรงดึงที่ใช้ในการตั้งงานชิ้นงานทดสอบเกิดการเสียรูป.....	37
ภาพประกอบ 18 การยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มพลาสติกแต่ละอัตราส่วน.....	37

ภาพประกอบ 19	ค่ามอดูลัสของฟิล์มพลาสติกแต่ละอัตราส่วนผสม.....	38
ภาพประกอบ 20	แผนภูมิเปรียบเทียบอัตราการไหลของพลาสติก (MFI) แต่ละอัตราส่วน.....	39
ภาพประกอบ 21	DSC thermograms of PLA/PBAT/Plasticizer	41
ภาพประกอบ 22	ร้อยละการส่องผ่านของแสงของฟิล์มพลาสติก PLA/PBAT/Plasticizer.....	42
ภาพประกอบ 23	ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพลาสติกหลังการฝังกลบเป็นเวลา 90 วัน	44
ภาพประกอบ 24	เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงก่อนและหลังการฝังกลบในดินเป็นเวลา 90 วัน ..	46
ภาพประกอบ 25	เปรียบเทียบค่าการยืดตัว ณ จุดขาดก่อนและหลังการฝังกลบในดินเป็นเวลา 90 วัน	46
ภาพประกอบ 26	เปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลของฟิล์มก่อนและหลังการฝังกลบเป็นเวลา 90 วัน... 48	
ภาพประกอบ 27	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO ₃ ขนาด 40 นาโนเมตร.....	49
ภาพประกอบ 28	เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO ₃ ขนาด 40 นาโนเมตร	50
ภาพประกอบ 29	เปรียบเทียบค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO ₃ ขนาด 40 นาโนเมตร	51
ภาพประกอบ 30	เปรียบเทียบค่ามอดูลัสของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO ₃ ขนาด 40 นาโนเมตร	51
ภาพประกอบ 31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO ₃ ขนาด 1 ไมโครเมตร	52
ภาพประกอบ 32	เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO ₃ ขนาด 1 ไมโครเมตร	53
ภาพประกอบ 33	เปรียบเทียบค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO ₃ ขนาด 1 ไมโครเมตร	54
ภาพประกอบ 34	เปรียบเทียบค่ามอดูลัสของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO ₃ ขนาด 1 ไมโครเมตร	54

ภาพประกอบ 35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO ₃ ขนาด 2 ไมโครเมตร	56
ภาพประกอบ 36 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO ₃ ขนาด 2 ไมโครเมตร	56
ภาพประกอบ 37 เปรียบเทียบค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO ₃ ขนาด 2 ไมโครเมตร	57
ภาพประกอบ 38 เปรียบเทียบค่ามอดูลัสของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO ₃ ขนาด 2 ไมโครเมตร	57
ภาพประกอบ 39 SEM surface images PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์/CaCO ₃ : 80/20/10/10 ที่การเติม CaCO ₃ ขนาด 40 นาโนเมตร	59
ภาพประกอบ 40 SEM surface images PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์/CaCO ₃ : 80/20/10/10 ที่การเติม CaCO ₃ ขนาด 1 ไมโครเมตร	59
ภาพประกอบ 41 SEM surface images PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์/CaCO ₃ : 80/20/10/10 ที่การเติม CaCO ₃ ขนาด 2 ไมโครเมตร	60
ภาพประกอบ 42 เปรียบเทียบค่าอัตราการหลอมไหลของฟิล์มที่ไม่เติม CaCO ₃ และเติม CaCO ₃ ขนาด 40 นาโนเมตร ที่ปริมาณ 5 10 และ 15 phr.....	61
ภาพประกอบ 43 เปรียบเทียบค่าอัตราการหลอมไหลของฟิล์มที่ไม่เติม CaCO ₃ และเติม CaCO ₃ ขนาด 1 ไมโครเมตร ที่ปริมาณ 0 5 10 และ 15 phr.....	62
ภาพประกอบ 44 เปรียบเทียบค่าอัตราการหลอมไหลของฟิล์มที่ไม่เติม CaCO ₃ และเติม CaCO ₃ ขนาด 2 ไมโครเมตร ที่ปริมาณ 0 5 10 และ 15 phr.....	63
ภาพประกอบ 45 กราฟ DSC ของฟิล์มที่ไม่เติม CaCO ₃ และเติม CaCO ₃ ขนาด 40 นาโนเมตร ในปริมาณ 5 10 และ 15 phr	65
ภาพประกอบ 46 กราฟ DSC ของฟิล์มที่ไม่เติม CaCO ₃ และเติม CaCO ₃ ขนาด 1 ไมโครเมตร ในปริมาณ 5 10 และ 15 phr	66
ภาพประกอบ 47 กราฟ DSC ของฟิล์มที่ไม่เติม CaCO ₃ และเติม CaCO ₃ ขนาด 2 ไมโครเมตร ในปริมาณ 5 10 และ 15 phr	68

ภาพประกอบ 48 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงก่อนและหลังการฝังกลบ 90 วัน ของการเติม แคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร.....	69
ภาพประกอบ 49 เปรียบเทียบค่าการยึดตัว ณ จุดขาดก่อนและหลังการฝังกลบ 90 วัน ของการเติม แคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร.....	70
ภาพประกอบ 50 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงก่อนและหลังการฝังกลบ 90 วัน ของการเติม แคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 1 ไมโครเมตร	71
ภาพประกอบ 51 เปรียบเทียบค่าการยึดตัว ณ จุดขาดก่อนและหลังการฝังกลบ 90 วัน ของการเติม แคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 1 ไมโครเมตร	72
ภาพประกอบ 52 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงก่อนและหลังการฝังกลบ 90 วัน ของการเติม แคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร	73
ภาพประกอบ 53 เปรียบเทียบค่าการยึดตัว ณ จุดขาดก่อนและหลังการฝังกลบ 90 วัน ของการเติม แคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร	74



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลาสติกถูกนำมาใช้งานในด้านต่าง ๆ อาทิเช่น บรรจุภัณฑ์ เครื่องใช้ในครัวเรือน อุปกรณ์ไฟฟ้า งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ และชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น เนื่องจากมีราคาถูก น้ำหนักเบา ทนความชื้น ไม่เป็นสนิม สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ง่ายกว่าวัสดุชนิดอื่น ๆ เช่น แก้วหรือโลหะ แต่พลาสติกที่นำมาใช้งานในปัจจุบันได้มาจากกระบวนการทางปิโตรเลียม ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีจำกัดและใกล้จะหมดไปในเวลาอันใกล้ ผลิตภัณฑ์พลาสติกส่วนใหญ่ถูกออกแบบมาโดยไม่ได้คำนึงถึงการกำจัดหลังการใช้งานและมักถูกใช้เพียงครั้งเดียวแล้วถูกทิ้งเป็นขยะ เพื่อเข้าสู่ระบบการกำจัดต่อไป เพราะพลาสติกส่วนใหญ่เป็นพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติหรือย่อยสลายได้ยากใช้เวลาในการย่อยสลายเป็นร้อย ๆ ปี จึงก่อให้เกิดเป็นขยะและของเสียมากมาย ส่งผลโดยตรงต่อสภาพแวดล้อม เกิดมลพิษจากการกำจัดที่ไม่ถูกวิธี และทัศนียภาพที่ไม่สวยงาม ในช่วงเวลาหลายปีที่ผ่านมาปริมาณขยะรวมของโลกมีอัตราการเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่าในทุก ๆ 4-5 ปีอย่างต่อเนื่อง ทำให้สังคมโลกมีการตื่นตัวที่จะนำเอาพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติมาใช้แทนพลาสติกที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เพื่อเป็นการลดปริมาณขยะพลาสติกในแต่ละปี ลดการปล่อยมลพิษและเป็นการลดงบประมาณที่ใช้ในการกำจัดขยะพลาสติก

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถจำแนกประเภทตามแหล่งกำเนิดออกเป็น 2 ประเภท คือ แหล่งกำเนิดจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม และแหล่งกำเนิดจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ [1] พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่นิยมนำมาใช้มากที่สุดในปัจจุบันคือ พอลิแลคติก แอซิด (PLA) เป็นเทอร์โมพลาสติกที่ขึ้นรูปได้ง่าย ผลิตจากกรดแลคติกซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมีหรือกระบวนการหมักผลผลิตทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น อ้อย ข้าวโพด และขยะทางชีวภาพ เป็นต้น ซึ่งกรดแลคติกนี้ได้จากการหมักวัตถุดิบทางการเกษตรที่สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ไม่มีสิ้นสุด [2] เมื่อนำมาผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันจะได้ PLA การนำ PLA มาใช้งานเนื่องจากมีสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนที่ดีคล้ายกับของพอลิสไตรีน (PS) และพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (PET) ที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ [3] แต่อย่างไรก็ตาม PLA ยังมีข้อจำกัดในหลาย ๆ ด้าน เช่น การทนความร้อนได้น้อยกว่าพลาสติกที่ใช้กันทั่วไป มีความเหนียวและการยึดตัวค่อนข้างน้อย ทำให้มีความเปราะสูง เมื่อนำไปใช้งานจึงเป็นไปได้ยาก [4]

การนำ PLA ผสมกับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เช่น พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (PBAT) ที่มีความยืดหยุ่นสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการขึ้นรูปฟิล์มจากการศึกษาของงานวิจัยพบว่า ในอัตราส่วน PLA/PBAT 80/20 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) เพิ่มขึ้นจาก 14 เปอร์เซ็นต์ เป็น 50 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า PBAT มีความสามารถในการเพิ่มคุณสมบัติทางกลของฟิล์ม PLA/PBAT [5] เนื่องจากหมู่คาร์บอนิลใน PBAT ทำให้มีความเข้ากันได้ดีกับ PLA ในระหว่างการหลอมผสมและทำให้ค่าระยะยืดและค่าการทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่คุณสมบัติด้านความยืดหยุ่นยังไม่เทียบเท่ากับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้กันในปัจจุบันและยังมีต้นทุนการผลิตที่สูง เนื่องจาก PLA และ PBAT มีราคาสูงกว่าเม็ดพลาสติกที่ใช้กันในปัจจุบัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายที่จะเพิ่มสมบัติของฟิล์มพลาสติกชีวภาพให้มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมการแปรรูปถุงพลาสติกและมีเป้าหมายที่จะลดต้นทุนการผลิตโดยการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการศึกษาผลของการเติมพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) ซึ่งเป็นสารเติมแต่งที่มีสมบัติทำให้พลาสติกมีความอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่น ทนต่อสภาวะความเป็นกรด-ด่าง และทนต่ออุณหภูมิสูง มาผสมเข้ากับ PLA และ PBAT หลังจากการเติมพลาสติกไซเซอร์จะเลือกส่วนผสมที่ดีที่สุดมาทำการศึกษาอิทธิพลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ส่งผลต่อสมบัติของฟิล์มพลาสติกชีวภาพนี้ เนื่องจากหากนำไปประยุกต์ใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมแคลเซียมคาร์บอเนตจะถูกนำมาเติมเพื่อลดต้นทุนการผลิตจึงจำเป็นต้องการหาปริมาณการเติมที่เหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ปรับปรุงสมบัติของฟิล์มพลาสติกชีวภาพโดยการเติมพลาสติกไซเซอร์ เพื่อให้มีความเหนียวและยืดหยุ่น

1.2.2 ลดต้นทุนการผลิตฟิล์มพลาสติกชีวภาพโดยการผสมแคลเซียมคาร์บอเนต

1.3 แนวคิดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติก แอซิด (PLA) โดยการผสมกับพลาสติกชนิดอื่นคือ พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (PBAT) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความเหนียว นอกเหนือจากการเติม PBAT แล้วยังมีการนำสารเติมแต่งเข้ามาช่วยเพิ่มสมบัติในด้านต่าง ๆ เพื่อให้มีสมบัติที่ใกล้เคียงกับถุงพลาสติกที่ใช้ในปัจจุบัน โดยสารเติมแต่งที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ได้แก่ พลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) แต่อย่างไรก็ตามต้นทุนที่ใช้ในการผลิต

ฟิล์มพลาสติกชีวภาพยังมีราคาที่ยังสูง เนื่องจากราคาของเม็ดพลาสติกชีวภาพมีราคาสูงกว่าเม็ดพลาสติกที่ใช้ในปัจจุบัน ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะลดต้นทุนการผลิต ซึ่งสารเคมีหรือวัสดุที่นำมาใช้ในการลดต้นทุนคือ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตถูกนำมาผสมเข้ากับเม็ดพลาสติกในการขึ้นรูปฟิล์มหรือถุงพลาสติกในปัจจุบันอยู่แล้ว

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 สัดส่วนการผสมที่ต้องการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการเติมพลาสติกไซเซออร์ ชนิด Triacetin และแคลเซียมคาร์บอเนตที่สัดส่วน PLA ผสม PBAT คงที่ ซึ่งจากผลการศึกษาของ ภาลัดดา และยศฐา [6] พบว่า สัดส่วนการผสมที่ PLA/PBAT: 80/20 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาศึกษาและพัฒนาต่อยอด เนื่องจากผลที่ได้จากการทดลองมีความเหนียวและความยืดหยุ่นที่ดี

ตาราง 1 สัดส่วนของการเติมพลาสติกไซเซออร์ (plasticizer) ชนิด Triacetin ที่ต้องการศึกษา

ตัวอย่างที่ PLA/PBAT/Plasticizer	PLA (%)	PBAT (%)	Plasticizer ชนิด Triacetin (phr)	
1. 100/0/0	100	0	0	
2. 0/100/0	0	100		
3. 80/20/0	80	20	0	
4. 80/20/2				2
5. 80/20/5				5
6. 80/20/10				10
7. 80/20/15				15

เมื่อได้ศึกษาผลของการเติมพลาสติกไซเซออร์ชนิด Triacetin และปริมาณการเติมที่เหมาะสมที่ทำให้ฟิล์มมีความเหนียวและยืดหยุ่นดีที่สุดแล้ว หลังจากนั้นนำปริมาณการเติมพลาสติกไซเซออร์ดังกล่าวมาศึกษาผลของเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่งจะทำการศึกษาโดยการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตทั้งหมด 3 ขนาด ได้แก่

1. ขนาด 1 ไมโครเมตร (μm) จะทำการศึกษาที่สัดส่วนการเติม 5 10 และ 15 phr

2. ขนาด 2 ไมโครเมตร (μm) จะทำการศึกษาที่สัดส่วนการเติม 5 10 และ 15 phr
3. ขนาด 40 นาโนเมตร (nm) จะทำการศึกษาที่สัดส่วนการเติม 5 10 และ 15 phr

หมายเหตุ Phr (parts per hundred parts of resin) ซึ่งหมายถึงปริมาณพลาสติกไซเซออร์หรือแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ต่อ 100 ส่วนของ PLA/PBAT

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดลอง
- 1.5.3 จัดหาวัสดุและอุปกรณ์
- 1.5.4 ดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติก แอซิดผสมพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท โดยการเติมพลาสติกไซเซออร์และแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต ซึ่งสมบัติของฟิล์มที่ต้องการศึกษาคือ สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน การส่องผ่านของแสง อัตราการไหลของพลาสติก ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการย่อยสลายทางชีวภาพ

ขั้นที่ 1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ โดยมุ่งเน้นการนำพอลิแลคติก แอซิด (PLA) ผสมพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (PBAT) ขึ้นรูปเป็นฟิล์มหรือถ่วงพลาสติก ศึกษาผลของการนำพลาสติกไซเซออร์และแคลเซียมคาร์บอเนตแต่ละชนิดไปผสมเข้ากับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกชนิดของพลาสติกไซเซออร์และแคลเซียมคาร์บอเนตมาทำการศึกษา

ขั้นที่ 2 ทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการหล่อขึ้นรูป โดยใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย

ขั้นที่ 3 ทำการวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบ โดยจะศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน การส่องผ่านของแสง อัตราการไหลของพลาสติก ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการย่อยสลายทางชีวภาพ

1. การศึกษาสมบัติกลทางโดยจะทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง โดยเครื่องทดสอบแรงดึง (texture analyser)
2. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสง (optical property) เพื่อหาร้อยละการส่องผ่านของแสง ด้วยเครื่อง Ultraviolet-visible Spectrometer

3. การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยใช้เครื่อง DSC-4000 เพื่อวิเคราะห์หาอุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิคล้ายแก้ว และพฤติกรรมการเกิดผลึก

4. การทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก (melt flow index; MFI) โดยใช้เครื่องทดสอบอัตราการหลอมไหลพลาสติก Melt Flow Indexer รุ่น MP1200 จากบริษัท Tinius Olsen USA ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D1238

5. การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา เพื่อศึกษาลักษณะของพื้นผิวและการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (MiniSEM)

6. การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยฝังกลบฟิล์มในดินเป็นเวลา 90 วัน จากนั้นวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ และวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักโมเลกุล

1.5.5 วิเคราะห์ผลที่ได้

1.5.6 สรุปผล

1.5.7 รายงานผลการวิจัย

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้ปริมาณการเติมพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) ที่เหมาะสม ทำให้ฟิล์มพลาสติกชีวภาพมีความเหนียวและยืดหยุ่นมากขึ้น

1.6.2 ได้ขนาดและปริมาณการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้งาน เพื่อลดต้นทุนการผลิตฟิล์มพลาสติกชีวภาพ

1.6.3 สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดขึ้นรูปเป็นถุงพลาสติกและนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมได้

พหุบัณฑิต ชีวะ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastic หรือ compostable plastic) มักถูกเรียกว่า พลาสติกชีวภาพ (bioplastic) เป็นพลาสติกที่ถูกคิดค้นมาเพื่อทดแทนพลาสติกที่ใช้กันในปัจจุบัน เนื่องจากปัญหาขยะพลาสติกที่นับวันยิ่งทวีความรุนแรงจากการนำไปใช้งานแล้วทิ้งไม่ถูกที่ และการกำจัดที่ไม่ถูกวิธี พลาสติกชีวภาพจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ทั้งในด้านวัตถุดิบ กระบวนการผลิต และกระบวนการกำจัด ปัจจุบันพลาสติกชีวภาพได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งจากนักวิทยาศาสตร์ ตลอดจนนักอุตสาหกรรมชั้นนำทั่วโลก พลาสติกชีวภาพผลิตมาจากวัตถุดิบธรรมชาติที่ใช้แล้วเกิดขึ้นทดแทนได้ใหม่ (renewable resource) ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำ และสามารถย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ พลาสติกชีวภาพมีสมบัติใกล้เคียงหรือเทียบเท่ากับพลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแบบดั้งเดิม (commodity plastics) และสามารถนำมาใช้งานทดแทนกันได้ [7]

พลาสติกชีวภาพสามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดที่สลายตัวได้ทางชีวภาพ (compostable bioplastics) เป็นพลาสติกที่สลายตัวได้ด้วยจุลินทรีย์กลายเป็นปุ๋ยหมัก ซึ่งจะต้องมีมาตรฐานรับรองเป็นการยืนยันว่าสลายเป็นปุ๋ยหมักกลับคืนสู่ดิน ตามหลักการแล้วพลาสติกชีวภาพชนิดที่สลายตัวได้จะต้องเป็นพลาสติกที่สังเคราะห์ขึ้นจากพืช (biobased) แต่ปัจจุบันบางชนิดยังมีความจำเป็นต้องผลิตจากปิโตรเลียม (petrobased) ซึ่งคาดว่าในอนาคตจะพัฒนาเปลี่ยนเป็นผลิตจากพืชทั้งหมด ส่วนอีกชนิดคือชนิดที่สลายตัวไม่ได้ (non-compostable bioplastics) ก็เป็นอีกพวกหนึ่งที่สังเคราะห์ขึ้นจากพืช โดยการเลียนแบบโครงสร้างของพลาสติกที่ได้มาจากปิโตรเลียมซึ่งมีประโยชน์กว่า กล่าวคือในการสังเคราะห์วัตถุดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมใช้วิธีการกลั่น แต่พลาสติกชีวภาพเลียนแบบโดยใช้กระบวนการหมัก ดังนั้นการได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ตัวเดียวกันก็จะใช้พลังงานสิ้นเปลืองน้อยกว่า หมายความว่า การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าจึงได้ค่า carbon credit [1]

วัสดุธรรมชาติที่นำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพมีหลายชนิดส่วนใหญ่ได้มาจากพืช เช่น เซลลูโลส (cellulose) คอลลาเจน (collagen) เคซีน (casein) พอลิเอสเทอร์ (polyester) แป้ง (starch) และโปรตีนจากถั่ว (soy protein) เป็นต้น ซึ่งแป้งเป็นวัสดุธรรมชาติที่นิยมนำมาผลิต

พลาสติกชีวภาพมากที่สุดเพราะหาได้ง่าย มีปริมาณมากและราคาถูก เนื่องจากสามารถผลิตแบ่งได้จากพืชหลายชนิด เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี มันฝรั่ง มันเทศ มันสำปะหลัง เป็นต้น สำหรับประเทศไทย พืชที่นิยมนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกชีวภาพ คือ ข้าวโพดและมันสำปะหลัง เนื่องจากเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีปริมาณมากและราคาถูก [8]

นอกจากนี้หากมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ตามธรรมชาติมาใช้งาน และมีการกำจัดอย่างมีประสิทธิภาพจะสามารถให้ประโยชน์ในด้านการลดใช้พลังงานและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งพบว่าพลาสติกชีวภาพจะก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณที่ต่ำกว่าพลาสติกทั่วไป และยังลดพื้นที่การใช้งานบ่อขยะฝังกลบ เมื่อย่อยสลายร่วมกับขยะอินทรีย์อื่นๆจะเป็นการเพิ่มสารอินทรีย์ ความชื้น และสารอาหารให้แก่ดิน จึงเป็นการปรับปรุงคุณภาพดินและช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยอีกด้วย โดยประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงอุดมสมบูรณ์ไปด้วยวัสดุชีวมวลที่มีส่วนประกอบของแป้งและน้ำตาลที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกชีวภาพ โดยเฉพาะมันสำปะหลังที่ประเทศไทยส่งออกเป็นอันดับหนึ่งของโลก มีราคาถูก และมีความเหมาะสมมากที่สุดในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบ จะเห็นว่าประเทศไทยมีความพร้อมในเรื่องวัตถุดิบ จึงเป็นโอกาสที่จะมีการผลิตพลาสติกชีวภาพเพื่อนำมาใช้ภายในประเทศ และยังเป็นการพัฒนาอุตสาหกรรมทางการเกษตรให้เติบโตและเป็นการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจภายในประเทศอีกด้วย [9]

การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพมีหลักการง่ายๆ คือการทำให้พันธะเคมีของพลาสติกอ่อนแอลง ซึ่งสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกออกเป็น 5 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

1. การย่อยสลายได้โดยแสง (photodegradation) เป็นการเติมสารความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสียูวี (uv) ซึ่งเมื่อโดนแสงอาทิตย์ก็จะเกิดการแตกของพันธะเคมีกลายเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ที่ไม่เสถียร และเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือสถานะแวดล้อมอื่นที่มี

2. การย่อยสลายทางกล (mechanical degradation) เป็นการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกเกิดการแตกหักออกเป็นชิ้นเล็กๆ [10]

3. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation) เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้

เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชัน [11] ซึ่งทำหน้าที่คะตะลิสต์เร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น [10,12]

4. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolytic degradation) เป็นการย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอสไทรเลต พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้คะตะลิสต์ (catalytic hydrolysis) และไม่ใช้คะตะลิสต์ (non-catalytic hydrolysis) [11] ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (external catalytic degradation) และแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (internal catalytic degradation) โดยคะตะลิสต์จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ คะตะลิสต์ที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (enzyme) เช่น depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และคะตะลิสต์ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (alkaline metal) เบส (base) และกรด (acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติจัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส [11,12]

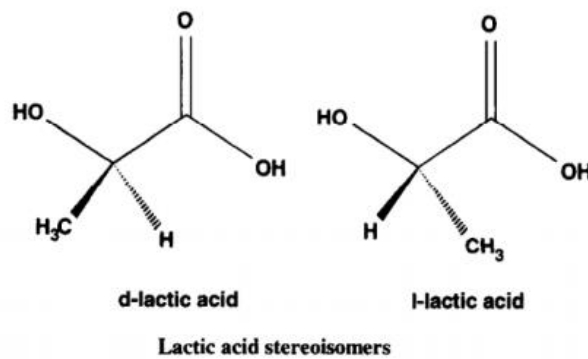
5. การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) เป็นการย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (biomass) [1,11]

2.2 พอลิแลคติกแอซิด

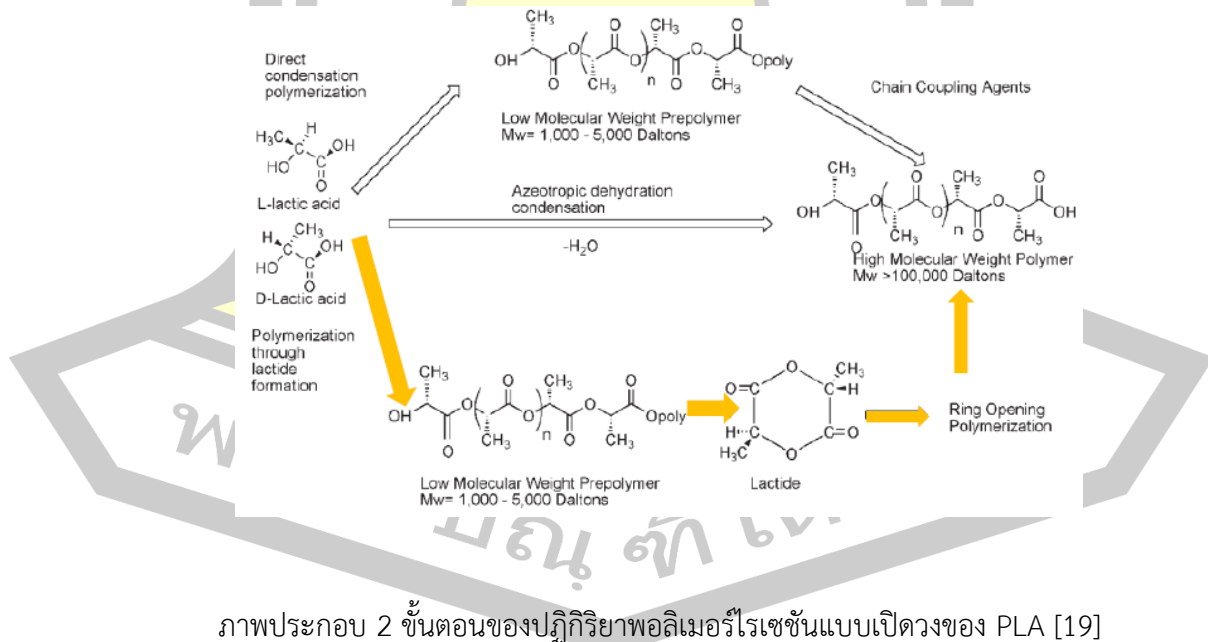
พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid) หรือ PLA เป็นพอลิเอสเตอร์แบบกิ่งผลึกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ผลิตจากกรดแลคติก (lactic acid) บางครั้งถูกเรียกว่า พอลิแลกเตต (polyactate) หรือ พอลิแลกไทด์ (polylactide) กรดแลคติกสามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการหมักผลผลิตทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น อ้อย ข้าวโพด ข้าวสาลี และหัวบีท โดยใช้จุลินทรีย์เปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นกรดแลคติกและทำการพอลิเมอร์ไรเซชันเป็น PLA ซึ่ง PLA สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ PDLA (poly-D-lactic acid) และ PLLA (poly-L-lactic acid) ดังภาพประกอบ 1 ในปัจจุบันมีเพียง PLLA ซึ่งเป็นไอโซเมอร์ที่มีมากในธรรมชาติที่มีการผลิตเชิงการค้า ส่วน PDLA ยังไม่มีการผลิต PLLA ที่มีความบริสุทธิ์สูงซึ่งเตรียมได้จากแบคทีเรียกรดแลคติกสามารถสังเคราะห์จากกลูโคสโดยผ่านกระบวนการไกลโคไลซิส ซึ่งจะเปลี่ยนกลูโคสเป็นกรดไพรูวิก (pyruvic acid) ที่อยู่ในรูปของคอนจูเกตเบส (conjugate base) หรือไพรูเวต (pyruvate) แบคทีเรียหลายชนิดจะมีเอนไซม์ที่ชื่อว่า lactatedehydrogenase (LDH) ที่สามารถเปลี่ยนไพรูเวตเป็นแลคเตต (lactate) หรือคอนจูเกตเบสของกรดแลคติกนั่นเอง กลูโคสหนึ่งโมเลกุลใช้สังเคราะห์กรดแลคติกได้สองโมเลกุล ความบริสุทธิ์ของกรดแลคติกขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียและความจำเพาะของเอนไซม์ LDH [13,14]

การสังเคราะห์ PLA สามารถทำได้สองวิธีคือปฏิกิริยาควบแน่น (condensation) ของกรดแลคติกและปฏิกิริยาเปิดวง (ring-opening) ของแลคไทด์ (lactide) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส แลคไทด์คือไดเมอร์แบบวงของกรดแลคติกที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาการขจัดน้ำ (dehydration) ของกรดแลคติกสองโมเลกุล ทั้งสองวิธีนี้จะให้พอลิแลคติกแอซิดที่มีความบริสุทธิ์มวลโมเลกุลและผลผลิตร้อยละที่สูง แต่ในทางอุตสาหกรรมจะนิยมสังเคราะห์แบบ ring opening ของแลคไทด์โดยใช้ตัวเร่งแบบ organometal [15] ดังภาพประกอบ 2 คุณสมบัติของ PLA ขึ้นอยู่กับ stereochemistry ของสายโซ่ PLA เป็นแบบไอโซแทคติก (isotactic) ก็จะเป็นพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก (semicrystalline) ที่มีอุณหภูมิหลอมประมาณ 180 องศาเซลเซียส ในขณะที่ PLA ที่เป็นแบบอะแทคติก (atactic) จะเป็นพอลิเมอร์แบบอสัณฐาน (amorphous) ในทางกลับกันพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) ระหว่าง PLA แบบ PDLA และ PLLA ในปริมาณที่เท่ากันจะมีอุณหภูมิหลอมที่สูงถึง 230 องศาเซลเซียส [16] ถ้าในโครงสร้างของ PLA เป็นแบบ PDLA ตั้งแต่ 4 เปอร์เซ็นต์ จะมีคุณสมบัติที่เปราะ PLA โดยทั่วไปมีค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดประมาณ 2.4-5.2 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความทนแรงดึงประมาณ 49.6-61.6 MPa และมอดูลัสของยัง (young's modulus) ประมาณ 2000-3000 MPa ซึ่งสูงมากเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นและมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วประมาณ 60 องศาเซลเซียส มีสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงกับพอลิสไตรีน (polystyrene, PS) และพอลิเอทิลีน

เทเรพทาเลท (polyethylene terephthalate, PET) จึงสามารถนำไปขึ้นรูปด้วยเทคนิคการขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) ทั่วไปได้ เช่น การอัดรีด (extrusion) การฉีด (injection molding) PLA มีความใส ทนต่อการตีไฟ ทนความร้อน เข้ากับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตได้จึงสามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย เช่น บรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ และวัสดุทางการแพทย์ เช่น ไหมละลายสำหรับเย็บแผล PLA สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 60 °C จึงจัดเป็นพอลิเมอร์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [17]



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างโมเลกุลของกรดแลคติก [18]



ในด้านของความเป็นผลึกพบว่า PLA ที่มีปริมาณ L-lactide มากกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ จะมีแนวโน้มที่จะเกิดผลึกได้ดีซึ่งปริมาณความเป็นผลึก อาจจะเป็นสิ่งที่เป็นประโยชน์หรือไม่เป็นประโยชน์

ก็ได้ ขึ้นอยู่กับ วัตถุประสงค์ในการใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น ปริมาณความเป็นผลึกที่สูงขึ้นจะส่งผลให้พอลิเมอร์ที่ได้แข็งแรง และทนต่อการเปลี่ยนสถานะหรือเสียรูปเมื่อโดนความร้อนได้ดี ในทางตรงกันข้าม พอลิเมอร์ที่มีปริมาณความเป็นผลึกสูงจะไม่เหมาะสำหรับนำไปผลิตพรีฟอร์ม (preform) โดยกระบวนการแบบฉีดเป่า (injection blow molding) เนื่องจากพรีฟอร์มดังกล่าวจะถูกนำไปผลิตต่อโดยกระบวนการเป่า (blow molding) ซึ่งความเป็นผลึกอาจจะทำให้การยืดตัวของพรีฟอร์มในระหว่างกระบวนการเป่าทำได้ยากและยังอาจส่งผลต่อความใสของขวดพลาสติก PLA ที่ได้จากการเป่าด้วย ดังนั้น PLA ที่มีปริมาณ L-lactide มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์จึงเหมาะสำหรับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด (injection molding) ในขณะที่ PLA ที่มีปริมาณ L-lactide โมโนเมอร์ ร้อยละ 94-96 จะเหมาะสำหรับกระบวนการขึ้นรูปแบบเป่า (blow molding) และแบบเทอร์โมฟอร์ม หรือแบบอัดรีด (extrusion) มากกว่า นอกจากนี้ปริมาณความเป็นผลึกของ PLA ยังขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว กล่าวคือพอลิเมอร์หลอมที่ผ่านการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (quenching) จะมีความเป็นผลึกต่ำ ในขณะที่ PLA หลอมที่ผ่านการเย็นตัวอย่างช้า ๆ จะมีปริมาณความเป็นผลึกสูงกว่า [20]

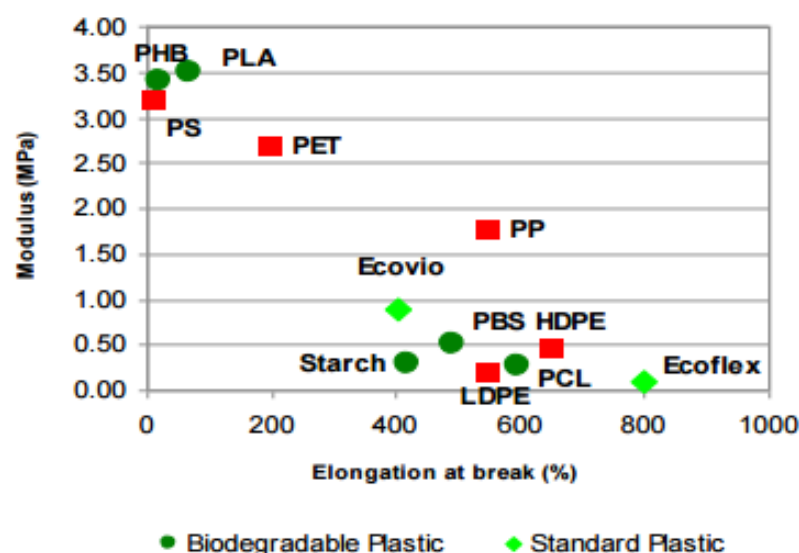
ข้อเสียของ PLA แม้ว่า PLA จะมีข้อดีหลายประการ เช่นการมีฐานวัตถุดิบที่มาจากผลผลิตทางการเกษตร และมีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และมีอุณหภูมิหลอมอยู่ในระดับสูงพอสมควร แต่ขณะเดียวกัน PLA ก็ยังคงมีสมบัติบางประการที่เป็นข้อเสียหรือข้อจำกัด ซึ่งต้องมีการปรับปรุงก่อนนำไปใช้งาน ดังนี้

1. PLA มีลักษณะแข็งและค่อนข้างเปราะ โดยเมื่อพิจารณาในด้านของค่ามอดูลัสพบว่าอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับพอลิสไตรีน (ภาพประกอบ 3) ในขณะที่การยืดตัวจะสูงกว่าพอลิสไตรีนเล็กน้อย (แต่จะยังคงต่ำกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต; PET) ซึ่งลักษณะดังกล่าวข้างต้นทำให้มีข้อจำกัดในการนำ PLA ไปใช้ในงานบางด้าน เช่น พิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการการยืดตัว ดังนั้นในการใช้งานจึงนิยมเติมสารพลาสติกไซเซอร์ลงไปในสูตร PLA คอมพาวด์และหรือผสม PLA กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีความเหนียวและการยืดตัวที่ดีกว่า เช่น พอลิคาโพรแลคโตน และ ECOFLEX

2. PLA ไม่ทนความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าหากไม่ทำการอบไล่ความชื้นก่อนนำไปขึ้นรูป อาจเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างกระบวนการผลิตขึ้นรูปผ่านกลไกแบบไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และกลไกแบบตัดสายโซ่ (chain scission) ดังนั้นในการใช้งานจึงควรทำการอบเม็ด PLA ให้แห้งปราศจากความชื้นเสียก่อน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วปริมาณความชื้น (water content) ที่อยู่ใน PLA ควรจะมีระดับน้อยกว่า 500 ppm เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อนดังกล่าวข้างต้น สำหรับเวลาที่ใช้ในการอบเม็ด PLA โดยใช้ลมร้อนที่มีค่า DEW POINT -40 องศาเซลเซียส และอัตราการไหล $0.016 \text{ m}^3/(\text{min kg})$ จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 110 องศาฟาเรนไฮต์ (45 องศาเซลเซียส) จะใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 190 องศาฟาเรนไฮต์ (90 องศาเซลเซียส) จะใช้เวลาสั้นลงเหลือประมาณ 2 ชั่วโมง

3. ความแข็งแรงของ PLA ขณะอยู่ในรูปของพอลิเมอร์หลอม (melt strength) จะมีค่าต่ำ ทำให้มีปัญหาในการนำไปผลิตขึ้นรูปโดยกระบวนการบางอย่าง เช่น กระบวนการอัดรีดและเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม (extrusion blown film process) เนื่องจากฟิล์มที่เป่าขึ้นต่อจากพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากรูทางออกจะไม่เสถียร ดังนั้นในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ฟิล์ม PLA จากกระบวนการดังกล่าวจึงต้องทำการปรับปรุงสมบัติดังกล่าว

4. ข้อเสียประการสุดท้ายของ PLA คือราคาที่ยังคงแพง เมื่อเทียบกับพลาสติกทั่วไป (commodity plastics) ชนิดอื่น ๆ โดยในปัจจุบันราคาของเม็ด PLA อยู่ที่กิโลกรัมละ 2 U\$ [18] ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการแข่งขันและการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์



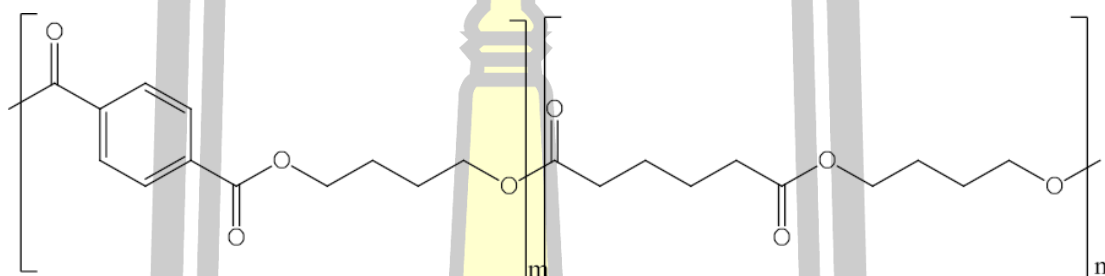
ภาพประกอบ 3 ค่ามอดูลัสและการยืดตัวของ PLA เทียบกับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ [9]

เนื่องจากคุณสมบัติทั่วไปของพอลิเมอร์ที่มีขีดจำกัดในด้านคุณสมบัติทางกล จึงได้มีคิดค้นวิจัยการเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์อย่างกว้างขวาง เพื่อลดข้อจำกัดด้านความแข็งแรงเปราะของวัสดุลง และเพิ่มความสามารถในการยืดหยุ่น ทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น

2.3 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท

Polybutylate เป็นชื่อย่อของ พอลิบิวทิลีนอะดิเพทโคเทเรพทาเลท (polybutylate adipate terephthalate) หรือ PBAT เป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มที่ได้จากกระบวนการทางปิโตรเลียม

แต่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ PBAT เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์และวงอะโรมาติกเป็นองค์ประกอบบนสายสายโซ่หลัก (synthetic aliphatic-aromatic polyester) โครงสร้างประกอบด้วย 4 ทำให้มีความแข็งแรง เหนียว ขึ้นรูปได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งมีสมบัติคล้ายคลึงกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene: LDPE) ดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมนำ PBAT มาประยุกต์ใช้งานในการผลิตฟิล์มประเภทต่างๆ ทั้งฟิล์มห่ออาหาร ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ ฟิล์มทางการเกษตร เป็นต้น แต่ต้นทุนการผลิต PBAT ยังมีราคาสูง จึงนิยมผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เช่น เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch: TPS) พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid: PLA) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate): PBS) [21,22]



ภาพประกอบ 4 สูตรโครงสร้างโมเลกุลของ PBAT [21]

PBAT ถูกผลิตขึ้นจากผู้ผลิตที่หลากหลายและเป็นที่รู้จักในชื่อทางการค้า เช่น ecoflex® , Wango, Ecoworld, Easter Bio และ Origo-Bi เป็นต้น PBAT เป็นพลาสติกทางเลือกที่สามารถนำมาทดแทนการใช้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene: LDPE) โดยพลาสติกทั้งสองมีสมบัติที่เหมือนกันรวมถึงความยืดหยุ่นและการคืนรูป จึงถูกนำไปใช้ในกระบวนการผลิตถุงพลาสติกและพลาสติกที่ใช้ในการห่อหุ้มเหมือนกัน [22]

พหุ ประ โภ ชี เว

ตาราง 2 ชื่อทางการค้าของ PBAT ตามบริษัทผู้ผลิต [22]

บริษัท	ชื่อทางการค้า
SK Chemicals	SkyGreen™
IRE Chemical Ltd.	EnPol®
Novamont	Origo-Bi®
Far Eastern New Century Co.	FEPOL®
BASF	Ecoflex®
Algix, Inc	Solaplast®

2.4 พลาสติกไซต์เซอร์

พลาสติกไซเซอร์ คือ สารเติมแต่ง (additive) ที่ใส่ในพอลิเมอร์หรือผลิตภัณฑ์พลาสติกเพื่อลดจุดหลอมเหลวที่ทำให้เกิดการไหล (flexing temperature) ของพลาสติก ทำให้สมบัติของพลาสติกเปลี่ยนไปคือ มีความอ่อนนุ่ม ยืดหยุ่นสูงทนต่อสภาวะความเป็นกรด-ด่าง ทนต่ออุณหภูมิสูง สะดวกต่อการดึง รีด ฉาบ หรือหล่อแบบ และยังเป็นตัวช่วยรักษาความอ่อนนุ่มไม่ให้เสียไปโดยง่าย อีกทั้งยังมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า น้ำมันและผงซักฟอก โดยจะใส่ประมาณ 20-40% โดยน้ำหนัก พลาสติกไซเซอร์สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย ทั้งในอุตสาหกรรมอาหารและยา เครื่องมือทางการแพทย์ ของเล่นสำหรับเด็ก เป็นต้น โดยสารเหล่านี้จะไม่ทำปฏิกิริยากับพลาสติกแต่จะไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของพลาสติก ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอ่อนลง พลาสติกไซเซอร์ยังมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติก โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride, PVC) ที่นิยมนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หลากหลายรูปแบบ เช่น ภาชนะบรรจุอาหาร ฟิล์มห่ออาหาร เครื่องมือแพทย์ เช่น ถุงบรรจุเลือด น้ำเกลือ สายยางที่ต่อกับเครื่องมือแพทย์ รองเท้า กระเป๋า เสื้อผ้า กระเบื้องยางปูพื้น สายไฟ เทปพันสายไฟ ท่อน้ำ แท็งก์เก็บสารเคมี และอื่น ๆ โดยที่มีการใช้พลาสติกไซเซอร์ในอุตสาหกรรมพลาสติก PVC ถึง 65% ของปริมาณการใช้พลาสติกไซเซอร์ทั้งหมด ผู้ที่เริ่มใช้พลาสติกไซเซอร์ในทางอุตสาหกรรมคนแรก คือ Hyatt Brothers ในปี ค.ศ.1870 ซึ่งเขาผสมแคมเฟอร์ (camphor) กับไนโตรเซลลูโลส (nitrocellulose) ต่อมาไตรครีซิลฟอสเฟต (tricresyl phosphate) ก็ถูกนำมาใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ ตามด้วยพาทาลเตเอสเทอร์ (phthalate esters) [23,24] ปัจจุบันพลาสติกไซเซอร์สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิดคือ

1. โมโนเมอร์พลาสติกไซเซอร์ (monomeric plasticizers) มีอยู่หลายกลุ่ม ได้แก่

1.1 กลุ่มพาทาเลทเอสเทอร์ เป็นกลุ่มที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์มากที่สุด เป็นสารประกอบอะโรมาติกที่มีหมู่คาร์บอกซิเลท 2 หมู่ มีลักษณะเป็นของเหลว มีจุดเดือดสูงและความดันไอต่ำ เป็นสารที่เสถียรและละลายในไขมันได้ดี พาทาเลทเอสเทอร์ที่ผลิตในอุตสาหกรรมมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างพาทาลิกแอนไฮไดรด์ (phthalic anhydride) กับแอลกอฮอล์ โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เช่น กรดซัลฟูริก หรือกรดพาราโทลูอินซัลโฟนิก พาทาเลทเอสเทอร์ที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซออร์ เช่น ไดเมทิลพาทาเลท (dimethyl phthalate, DMP) ไดเอทิลพาทาเลท (diethyl phthalate, DEP) ไดนอร์มัลบิวทิลพาทาเลท (di-n butyl phthalate, DBP) บิวทิลเบนซิลพาทาเลท (butylbenzyl phthalate, BBP) ไดทูเอทิลเฮกซิลพาทาเลท (di-(2-ethylhexyl) phthalate, DOP⁽¹⁾) ไดนอร์มัลออกทิลพาทาเลท (di-n-octyl phthalate, DOP⁽²⁾) ไดไอโซนิลพาทาเลท (diisononyl phthalate, DINP)

1.2 กลุ่มอะดิเพท (adipates) และอะซีเลท (azelates) ผลิตจากกรดอะดิพิค (adipic acid) หรือกรดอะซีเลอิกกับแอลกอฮอล์ เช่น ไดทูเอทิลเฮกซิลอะดิเพท (di-2-ethylhexyl adipate, DOA), ไดไอโซเดซิลอะดิเพท (diisodecyl adipate, DIDA), และไดนอร์มัลออกทิลเดซิลอะดิเพท (di-n-octyldecyl adipate, DNODA) ตัวที่สำคัญที่สุดคือ DOA ซึ่งองค์การอาหารและยาของสหรัฐอเมริกาอนุญาตให้ใช้ในผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอาหาร ส่วนกลุ่มอะซีเลท เช่น ไดทูเอทิลเฮกซิลอะซีเลท (di-2-ethylhexyl azelate, DOZ), ไดไอโซออกทิลอะซีเลท (diisooctyl azelate, DIOZ) และไดเฮกซิลอะซีเลท (dihexyl azelate, DHZ) ซึ่งเป็นตัวที่องค์การอาหารและยาของสหรัฐอเมริกาอนุญาตให้ใช้ในผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอาหารเช่นกัน

1.3 กลุ่มฟอสเฟต มีออกทิลไดเฟนิลฟอสเฟต (octyl diphenyl phosphate) ตัวเดียวเท่านั้นเป็นพลาสติกไซเซออร์ที่องค์การอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา อนุญาตให้ใช้ในผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอาหาร

2. พอลิเมอร์พลาสติกไซเซออร์ (polymeric plasticizers) ได้จากปฏิกิริยาระหว่างกรดไดเบสิก (dibasic acid) เช่น กรดอดิพิค หรือ กรดอะซีเลอิกกับไกลคอล (glycol) เช่น โพรไพลีนไกลคอล (propylene glycol) จะได้พลาสติกไซเซออร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึง 20 เท่าของชนิดโมโนเมอร์ริค และจะมีโอกาสหลุดจากพลาสติกได้น้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง ๆ และยังทนต่อการละลายของน้ำมันและตัวทำละลาย ส่วนราคาของพอลิเมอร์พลาสติกไซเซออร์นั้นจะสูงกว่าพาทาเลทเอสเทอร์ประมาณ 1.5-2 เท่า [25]

พลาสติกไซเซออร์ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ กลุ่มพาทาเลทเอสเทอร์ ดังนั้นจึงมีผู้ศึกษาวิเคราะห์วิจัยและมีหลักฐานการตรวจพบในสิ่งแวดล้อมมากที่สุด พลาสติกไซเซออร์ที่นิยมใช้กันมากและอยู่ในรายการสารมลพิษ (priority pollutants) ขององค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมสหรัฐอเมริกา (US environmental protection agency, USEPA) มีอยู่ด้วยกัน 6 ชนิด คือ DMP, DEP, DBP, BBP,

DOP⁽¹⁾ และ DOP⁽²⁾ โดยเฉพาะ DOP⁽¹⁾ นิยมใช้กันมากที่สุดหรือที่รู้จักกันในชื่อ ไดทุ เอทิลเฮกซิลพาทาเลทซึ่งเป็นคนละชนิดกับไดนอร์มัลบออกทิลพาทาเลท (DOP) สารมลพิษเหล่านี้ไม่ค่อยแสดงความเป็นพิษอย่างเฉียบพลัน แต่จะแสดงในลักษณะพิษเรื้อรังเป็นผลให้เกิดอาการตกเลือดในปอด (lung hemorrhage) ตับโต (hepatomegaly) เป็นพิษต่อเซลล์ในร่างกาย (cytotoxicity) ทำให้เกิดมะเร็ง (carcinogenicity) เกิดการก่อกลายพันธุ์ (mutagenicity) และทารกในครรภ์มีรูปร่างผิดปกติ (teratogenicity) เนื่องจากพลาสติกไซเซอรัทที่ใส่ในผลิตภัณฑ์พลาสติกจะไม่ได้เกิดพันธะเคมีกับพอลิเมอร์เพียงแต่จะแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างโมเลกุลดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นจึงเกิดการถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย ดังรายงานการตรวจพบสารเหล่านี้ในน้ำ อากาศ ดิน ปลา อาหาร และเลือด [24]

2.5 แคลเซียมคาร์บอเนต

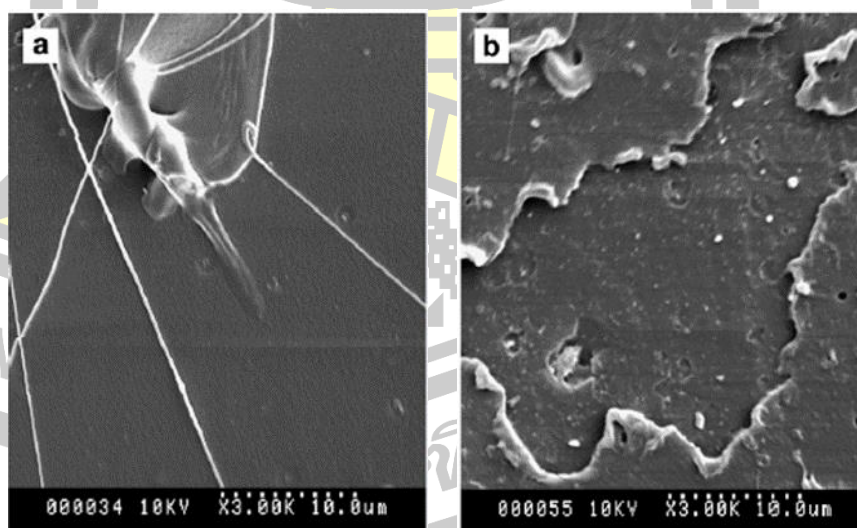
แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นสารเติมแต่งที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากมีปริมาณโพลดในพลาสติกสูงและต้นทุนต่ำ ผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต มีการศึกษานำมาประยุกต์ใช้กับพอลิเมอร์หลายชนิด เช่น พอลิโพรไพลีน (PP) Polyethyetherketone (PEEK) และอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) เป็นต้น หลังจากการผสมสมบัติทางกลของวัสดุผสมได้รับการปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญ [26,27]

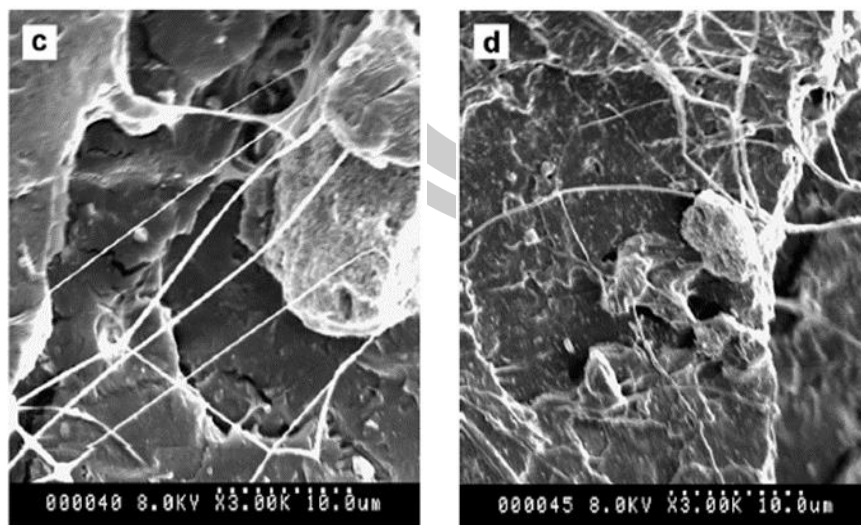
จากการศึกษางานวิจัยพบว่า ผลการทดสอบสมบัติทางกลของการเติม CaCO_3 เข้ากับ PLA ทำให้ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) ของ PLA มีค่าลดลง และค่า Yield strength ลดลงเมื่อได้รับแรง สามารถสังเกตได้จากบริเวณที่เกิดการแตกหักของชิ้นงานจะปรากฏลักษณะของฝ้าขาว (stress whitening) แต่ไม่เกิดการคอด (necking) ในทางกลับกัน ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (young's modulus) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อปริมาณ CaCO_3 ใน PLA เพิ่มขึ้นถึง 20 เปอร์เซ็นต์ แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเติม CaCO_3 ใน PLA ปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ [28] ดังแสดงในตาราง 3

การทดสอบลักษณะทางสัญญาณวิทยาของลักษณะพื้นผิวการแตกหักหลังการทดสอบแรงดึงที่ PLA 100 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นพื้นผิวการแตกหักที่ค่อนข้างราบเรียบเนื่องจากเกิดการเสีรูปร่างของพลาสติกขนาดใหญ่เป็นผลมาจากสมบัติของ PLA ที่มีความเปราะสูง (ภาพประกอบ 5 a) และ PLA ผสม CaCO_3 แสดงให้เห็นพื้นผิวการแตกหักมากขึ้นเนื่องจากการเสีรูปร่างของพลาสติกขนาดใหญ่ที่เกิดจากรอยแตกกร้าวแบบ crazes มากขึ้น (ภาพประกอบ 5 b-d) [18] นอกจากนี้การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน พบว่า เมื่อทำการผสม PLA กับ CaCO_3 จะทำให้อุณหภูมิที่พอลิเมอร์เกิดการสลายตัว (T_d) ลดลงตามปริมาณของนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต [26] ซึ่ง T_d หาได้จากการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนโดยทำการเปรียบเทียบดูพฤติกรรมของน้ำหนักที่สลายไปกับอุณหภูมิที่ใช้ดังตาราง 4

ตาราง 3 สมบัติทางกลของ PLA และ PLA ผสม CaCO₃ [28]

Example	Tensile modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PLA	2.19 ± 0.5	51.5 ± 1.4	4.0 ± 0.5
PLAC (5 wt %)	2.34 ± 0.2	55.3 ± 2.1	2.7 ± 0.2
PLAC (10 wt %)	2.73 ± 0.3	58.3 ± 1.8	2.4 ± 0.2
PLAC (20 wt %)	2.64 ± 0.3	53.3 ± 1.3	1.8 ± 0.2
PLAC (30 wt %)	2.44 ± 0.2	42.3 ± 1.8	1.9 ± 0.3
PLAH (5 wt %)	2.38 ± 0.2	65.4 ± 0.7	4.8 ± 0.3
PLAH (10 wt %)	2.34 ± 0.3	60.0 ± 0.5	4.5 ± 0.2
PLAH (20 wt %)	2.97 ± 0.4	49.2 ± 0.4	3.0 ± 0.2
PLAH (30 wt %)	2.66 ± 0.4	45.0 ± 0.7	2.6 ± 0.2
PLAN (5 wt %)	2.54 ± 0.2	57.6 ± 0.7	6.3 ± 0.4
PLAN (10 wt %)	3.89 ± 0.6	63.0 ± 0.8	5.5 ± 0.2
PLAN (20 wt %)	3.25 ± 0.4	55.3 ± 1.0	4.0 ± 0.4
PLAN (30 wt %)	2.62 ± 0.5	51.6 ± 0.6	3.6 ± 0.2





ภาพประกอบ 5 SEM micrographs of the fracture surfaces of tensile specimens: (a) neat PLA, (b) 2.5 wt% NPCC, (c) 5 wt% NPCC, (d) 7.5 wt% NPCC [18]

ตาราง 4 เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุผสม PLA ที่ไม่เติมและเติม CaCO_3 ในปริมาณต่าง ๆ [26]

Materials	T_{onset} ($^{\circ}\text{C}$)	T_d ($^{\circ}\text{C}$)	T_{end} ($^{\circ}\text{C}$)
Neat PLA	376.24	392.54	412.98
Extruded PLA	346.33	365.47	375.11
5% Nano- CaCO_3 -1041	329.08	347.06	351.60
10% Nano- CaCO_3 -1041	313.78	333.86	337.65
15% Nano- CaCO_3 -1041	284.98	309.75	314.94
20% Nano- CaCO_3 -1041	277.29	296.20	306.20
5% Nano- CaCO_3 -280	330.05	347.77	351.47
10% Nano- CaCO_3 -280	311.93	333.60	337.68
15% Nano- CaCO_3 -280	280.52	306.35	311.28
20% Nano- CaCO_3 -280	278.14	295.24	304.42

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาของ Racha Al-Itry และคณะ [5] โดยการนำพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมกับพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (PBAT) ในอัตราส่วน PLA/PBAT 80/20 พบว่าค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) เพิ่มขึ้นจาก 14 เปอร์เซ็นต์ เป็น 50 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อผสมสารเพิ่มความยาวสายโซ่ (chain extender: CE) 0.5 เปอร์เซ็นต์ (PLA/PBAT/ chain extender: 80/20/0.5) ทำให้ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเป็น 135 เปอร์เซ็นต์ ดังตาราง 5

ตาราง 5 ผลการทดสอบการดึงของ PLA/PBAT/ chain extender [5]

ตัวอย่าง	ความเค้นแรงดึง (MPa)	ยังมอดูลัส (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)
PLA_180 °C	1350 ± 90	68.5 ± 5	14 ± 3
PLA_PBAT_0_180 °C	820 ± 70	48 ± 2	50 ± 10
PLA_PBAT_0.25_3min_180 °C	822 ± 65	37 ± 2	116 ± 4
PLA_PBAT_0.5_3min_180 °C	1095 ± 60	47 ± 2	135 ± 9

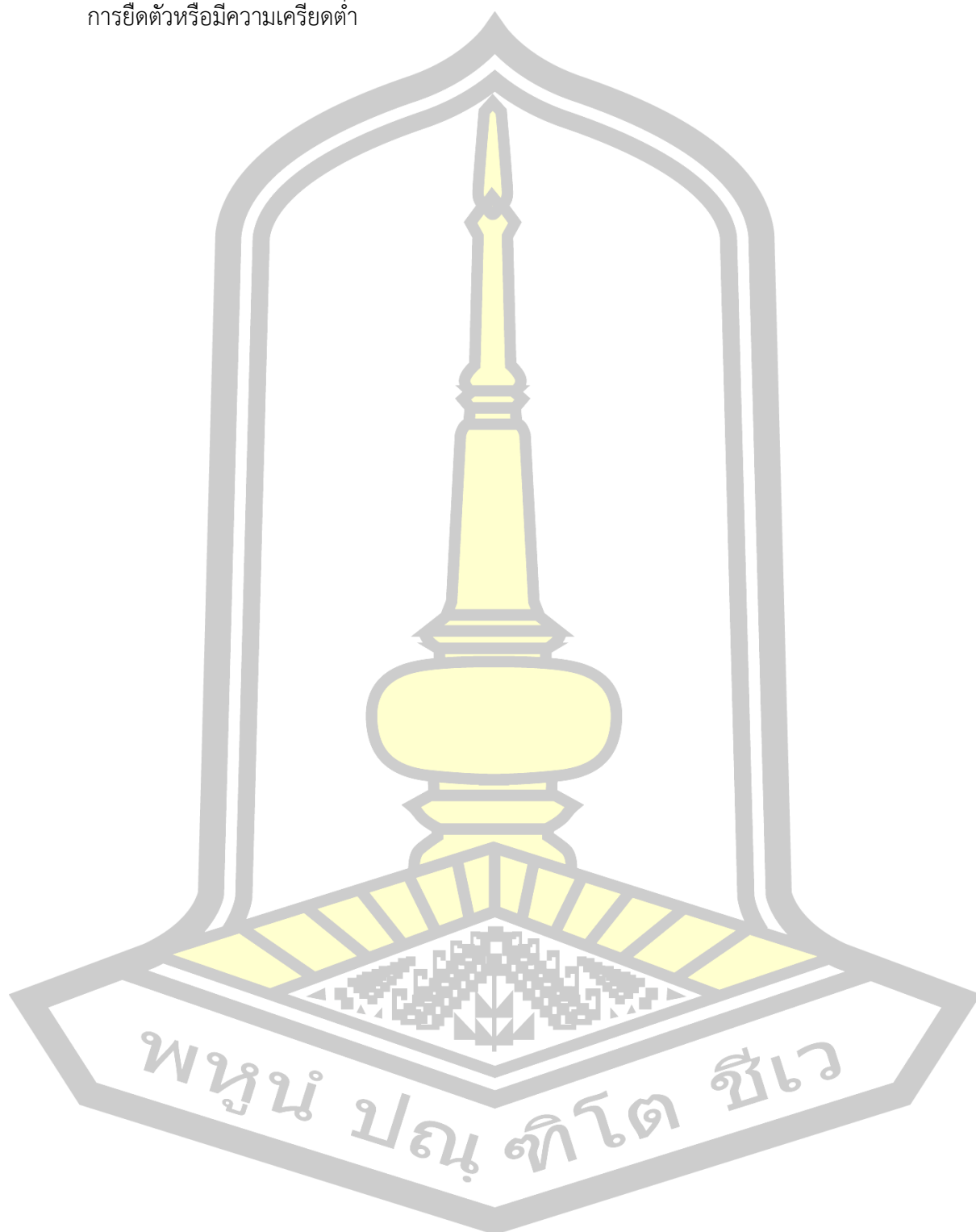
จากการศึกษาของ Weraporn Pivsa-Art และคณะ [29] ได้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต-โค-อะดิเพท (PBSA) และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (PBAT) สำหรับเป่าฟิล์มใช้ในอุตสาหกรรม พบว่า การทดสอบสมบัติทางความร้อน (DSC) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBSA และ PBAT เกิดการแยกเฟสของอุณหภูมิการหลอมเหลวออกเป็นสองเฟส เนื่องจากการผสมที่ไม่เข้ากัน การทดสอบทางสัณฐานวิทยา (SEM) จะได้ว่าพอลิเมอร์ทั้งสอง (PLA และ PBSA) มีส่วนที่เข้ากันได้น้อยและเกิดการแยกเฟสกันอย่างชัดเจน การทดสอบสมบัติทางกลในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBSA ที่อัตราส่วนคงที่ 80/20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีการผสม PBAT ในอัตราส่วน 10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีการผสม PBAT ในอัตราส่วน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะแสดงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ 40.71 MPa และแรงกระแทกที่ 26.97 J/m ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PBAT มีผลต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมและการทดสอบหาสมบัติเชิงรีโอโลยีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBSA และ PBAT เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ PBAT มากขึ้นจะทำให้ค่าดัชนีการไหลเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงให้เห็นว่า PBAT เป็นตัวช่วยลดความหนืดของพอลิเมอร์ผสม

จากการศึกษาของ Long-Feng Wang และคณะ [30] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิแลคไทด์ (PLA) ผสมพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT) โดยวิธีการหล่อตัวทำละลายและการประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร พบว่า การนำ PBAT ผสมเข้ากับ PLA ในการขึ้นรูปเป็นฟิล์ม โดยวิธีการหล่อตัวทำละลาย เป็นการช่วยลดความเปราะและปรับปรุงความยืดหยุ่นของฟิล์ม PLA แล้วยังช่วยในการป้องกันแสง UV สูง ซึ่งในการนำไปทดสอบบรรจุหัวหอมสดพบว่า ฟิล์มที่ผสม PBAT สามารถรักษาความสดของหัวหอมได้เป็นอย่างดีและป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้สูง ส่วนการนำไปทดสอบบรรจุมันฝรั่งสดพบว่า ฟิล์มที่ผสม PBAT มีประสิทธิภาพในการป้องกันแสง UV ทำให้ช่วยในการรักษาสีเขียวของมันฝรั่งไว้ได้ เพราะตัวฟิล์มจะช่วยในการคัดกรองแสง จากการกล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าสามารถผลิตฟิล์ม PLA ผสม PBAT ได้ในระดับอุตสาหกรรม ฟิล์มที่ผสม PLA ผสม PBAT เข้าไปด้วยกันมีศักยภาพสูงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ผลไม้ และผักที่ต้องการขยายอายุการเก็บรักษา

จากการศึกษาของ Natalia Herrera และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางแสง และสมบัติทางความร้อนของฟิล์มนาโนคอมโพสิตเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่มีการเติม โดยทำการ masterbatch นาโนคอมโพสิตที่อัตราส่วน 75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ chitin nanocrystals (ChNCs) และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ glycerol triacetate plasticizer (GTA) จากนั้นทำการเจือจางให้ ChNCs เหลือ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับ PLA และ พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT) ก่อนการเป่าขึ้นรูป ซึ่งผลที่ได้พบว่า การเติม ChNCs 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ความต้านทานการฉีกขาด (tear strength) เพิ่มขึ้น 175 เปอร์เซ็นต์และความต้านทานแรงที่มทะลุ (puncture strength) เพิ่มขึ้น 300 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ ChNCs มีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ที่เพิ่มขึ้น 4 องศาเซลเซียส และมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลึกเล็กน้อย ChNCs ยังทำให้เกิดเชื้อราในฟิล์มลดลง ลดการสะสมไฟฟ้าสถิตระหว่างผิวฟิล์ม ทำให้เปิดปากถุงพลาสติกได้ง่าย สมบัติทางแสงและการย่อยสลายทางความร้อนของฟิล์มไม่ได้รับอิทธิพลจากการเติม ChNCs

จากการศึกษาของ Nattakarn Hongsriphan และคณะ [27] ได้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NPCC) ที่มีผลต่อพฤติกรรมทางกลของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) พบว่า ผลการทดสอบแรงดึงที่ PLA/PBS ผสมที่ 50/50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) สูงสุด การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา (SEM) ยังพบว่า NPCC กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโครงสร้างของพลาสติกผสม และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ NPCC ขึ้นไปเรื่อย ๆ จาก 1 PHR พบว่าค่าการยืดตัว ณ จุดขาดและค่าแรงกระทำ

มีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามปริมาณของ NPCC แต่เมื่อมีการเพิ่ม NPCC ที่ 5 PHR ทำให้เกิดผลกระทบต่อ
การยืดตัวหรือมีความเครียดต่ำ



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 พอลิแลคติกแอซิด (PLA) เกรด 4043D มีความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) 1.24 g/cc ความหนืดสัมพัทธ์ (relative viscosity) 4.0 อุณหภูมิหลอมเหลว 145-160°C

3.1.2 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (PBAT) หรือชื่อทางการค้า ECOFLEX[®] อุณหภูมิหลอมเหลว 110-120°C

3.1.3 พลาสติกไซเซอร์ (plasticizers) ชนิด Triacetin - 99% (FCC,FG) มีจุดวาบไฟ (flash point) ที่ 138°C และความหนาแน่น 1.16 g/mL ที่ 25°C

3.1.4 แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ขนาด 1 ไมโครเมตร 2 ไมโครเมตร และ 40 นาโนเมตร (เกรด NPCC 101)

3.1.5 ตัวทำละลาย ชนิด คลอโรฟอร์ม (chloroform: CHCl₃) ชนิดที่มีความเสถียรด้วยเอทานอลประมาณ 0.6% มีจุดเดือดที่อุณหภูมิ 61°C ความหนาแน่น 1.498 g/mL

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องชั่งดิจิทัล ของบริษัท AND Company, Limited. รุ่น HR-300i

3.2.2 เครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer)

3.2.3 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer รุ่น UV-1800 ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสง (optical property)

3.2.4 เครื่องทดสอบแรงดึง (texture analyser) รุ่น TA.XT Plus

3.2.5 เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (differential scanning calorimeter: DSC) รุ่น DSC-4000

3.2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (MiniSEM) รุ่น SNE-4500M

3.2.7 เครื่องทดสอบอัตราการหลอมไหลพลาสติก Melt Flow Indexer รุ่น MP1200

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 ผลของการเติมพลาสติกไซเซออร์

การศึกษาผลของการเติมพลาสติกไซเซออร์ โดยนำเม็ดพลาสติกและพลาสติกไซเซออร์ไปละลายด้วยตัวทำละลายคลอโรฟอร์มที่อัตราส่วนคลอโรฟอร์ม 90 เปอร์เซ็นต์ เม็ดพลาสติกทั้งสองชนิดรวมกัน (PLA/PBAT) 10 เปอร์เซ็นต์ และเติมพลาสติกไซเซออร์เพิ่มเติมจาก 10 เปอร์เซ็นต์ ของ PLA/PBAT โดยจะทำการศึกษาที่อัตราส่วนผสม ดังตาราง 6 เมื่อละลายส่วนผสมต่างๆ จนเป็นของเหลวและเป็นเนื้อเดียวกัน ทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยการเทของเหลวดังกล่าวลงภาดแก้วที่ปริมาตร 6 มิลลิลิตร จากนั้นปล่อยให้แห้งแล้วทำการลอกออกก็จะได้ฟิล์มพลาสติกที่จะใช้ในการทดสอบสมบัติต่างๆ

ตาราง 6 สัดส่วนของการเติมพลาสติกไซเซออร์ (Plasticizer) ชนิด Triacetin ที่ต้องการศึกษา

ตัวอย่างที่ PLA/PBAT/Plasticizer	PLA (%)	PBAT (%)	Plasticizer ชนิด Triacetin (phr)	
1. 100/0/0	100	0	0	
2. 0/100/0	0	100		
3. 80/20/0	80	20		
4. 80/20/2				2
5. 80/20/5				5
6. 80/20/10				10
7. 80/20/15				15

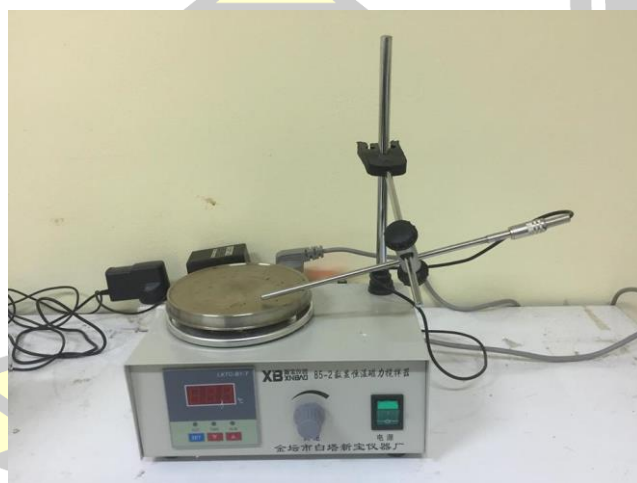
หมายเหตุ Phr (parts per hundred parts of resin) หมายถึง ปริมาณพลาสติกไซเซออร์ที่ใช้ต่อ 100 ส่วนของ PLA/PBAT

3.3.2 ผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต

หลังจากเลือกอัตราส่วนการเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ดีที่สุด แล้วนำอัตราส่วนที่ได้มาทำการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และนำไปละลายด้วยกระบวนการเดียวกันกับขั้นแรก ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตทั้งหมด 3 ขนาด คือ ขนาด 1 μm 2 μm และ 40 nm ดังตาราง 7

ตาราง 7 ขนาดและสัดส่วนของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3)

ตัวอย่างที่ PLA/PBAT/Plasticizer/ CaCO_3	PLA (%)	PBAT (%)	Triacetin (phr)	CaCO_3 40 nm (phr)	CaCO_3 1 μm (phr)	CaCO_3 2 μm (phr)
8. 80/20/10/5	80	20	10	-	5	-
9. 80/20/10/5				-	10	-
10. 80/20/10/5				-	15	-
11. 80/20/10/5				-	-	5
12. 80/20/10/5				-	-	10
13. 80/20/10/5				-	-	15
14. 80/20/10/5				5	-	-
15. 80/20/10/5				10	-	-
16. 80/20/10/5				15	-	-



ภาพประกอบ 6 เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic Stirrer)

3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางแสง

การวิเคราะห์สมบัติทางแสง (optical property) เป็นการทดสอบเพื่อหาร้อยละการส่องผ่านของแสง เนื่องจากเมื่อนำพลาสติกต่างชนิดกันมาผสมกันหรือทำการผสมเข้ากับสารเติมแต่งจะทำให้

ให้มีการเปลี่ยนแปลงของสีและความขุ่น แต่อย่างไรก็ตามยังเป็นเพียงผลจากการสังเกตด้วยสายตา ดังนั้นเพื่อให้เป็นผลเชิงตัวเลขที่สามารถนำไปเปรียบเทียบได้จึงมีการวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer รุ่น UV-1800 จากบริษัท Shimadzu เป็นเครื่องวิเคราะห์สารเคมีชนิดลำแสงคู่ โดยใช้หลักการดูดกลืนแสงของสารประกอบที่สามารถตรวจวัดได้ในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ต (uv) และในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (visible) ซึ่งควบคุมและประมวลผลด้วยตัวเครื่องเอง (standalone) หรือควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ การเตรียมชิ้นงานทดสอบจะตัดชิ้นงานขนาดประมาณ 1×4 cm จากนั้นนำไปเข้าเครื่องทดสอบ โดยใช้ค่าความยาวคลื่นแสง 600 nm [30]



ภาพประกอบ 7 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer รุ่น UV-1800 [31]

3.5 การทดสอบสมบัติทางกล

ทำการทดสอบแรงดึง (tension test หรือ tensile test) ด้วยเครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส (texture analyzer) โดยใช้แรงดึง (tensile force) ดึงวัสดุอย่างช้า ๆ ทำให้วัสดุยืดออก มีความยาวเพิ่มมากขึ้น อาจให้แรงดึงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งชิ้นทดสอบขาด แล้วบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึง (tensile stress) กับความเครียดตามแนวดึง (tensile strain) แสดงผลเป็นกราฟความเค้นกับความเครียด (stress-strain curve) หรือ แรงดึงกับระยะการเปลี่ยนรูป (deformation) ซึ่งเป็นระยะที่วัสดุยืดตัวออกจากระยะเดิม โดยจะทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (texture analyser) บริษัท Stable Micro System รุ่น TA.XT Plus การเตรียมชิ้นงานทดสอบจะทำการตัดฟิล์มด้วยคัตเตอร์ที่ขนาด 1.5×4.5 cm จำนวนตัวอย่างละ 3 ชิ้นงานทดสอบ ตามมาตรฐาน ASTM D638-10 ใช้ความเร็วในการดึงเท่ากับ 2 mm/min ทำการดึงจนชิ้นงานทดสอบขาดออกจากกัน



ภาพประกอบ 8 เครื่องทดสอบแรงดึง (texture analyser)

3.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนทำการทดสอบด้วยเทคนิค Differential scanning Calorimeter (DSC) โดยใช้เครื่อง DSC-4000 เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบวัสดุโดยการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การหลอมเหลว การเปลี่ยนสถานะ การเปลี่ยนรูปผลึก การเกิดปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น โดยในการทดสอบจะตัดชิ้นงานทดสอบให้มีน้ำหนัก 3 - 5 mg บรรจุในถาดอลูมิเนียม และให้ความร้อนแก่ชิ้นงานทดสอบตั้งแต่ -10 ถึง 200°C โดยใช้อัตราในการให้ความร้อน (heating rate) 10°C/min ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ของชิ้นงานทดสอบหาได้จากการพิจารณา Thermogram ค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (X_c) หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H_m}{(f \times \Delta H_c^0)} \times 100$$

โดยที่ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (ΔH_m^0) ของผลึก PLA 100 เปอร์เซ็นต์ มีค่า 93 จูลต่อกรัม และ f เป็นสัดส่วนส่วนน้ำหนักในการผสมของ PLA [30]



ภาพประกอบ 9 เครื่อง Differential scanning Calorimeter (DSC) รุ่น DSC-4000

3.7 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (MiniSEM) รุ่น SNE-4500M เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ electron เป็นแหล่งกำเนิดแสงใช้ศึกษาลักษณะสัณฐานของตัวอย่างวัสดุที่แสดงออกมาเป็นภาพ 3 มิติ มีรายละเอียดที่เล็กมาก สามารถให้รายละเอียดของภาพได้ตั้งแต่ 3 ถึง 100 นาโนเมตร ดังนั้นเครื่อง MiniSEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น ในการทดสอบจะทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบ 2 แบบ คือ แบบที่หนึ่งชิ้นงานทดสอบจะถูกหักด้วยไนโตรเจนเหลวเพื่อดูพื้นที่หน้าตัด และแบบที่สองจะตัดชิ้นงานทดสอบเป็นแผ่นขนาดเล็กประมาณ 1×1 เซนติเมตร นำไปวางบน carbon tape (tape ติดตัวอย่างที่นำไฟฟ้าได้) ที่ติดตั้งกับ stub วางชิ้นงานทดสอบในแนวตั้ง จากนั้นนำ stub ไปเคลือบด้วยทองคำหนา 20 นาโนเมตร



ภาพประกอบ 10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (MiniSEM)

3.8 การทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก

การทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก (melt flow index, MFI) เป็นการทดสอบเพื่อหาสมบัติการไหลตัวของพลาสติกเหลวจำพวก Thermoplastics เนื่องจากค่า MFI เป็นตัวบ่งชี้ถึงสมบัติของพลาสติกในการนำไปใช้งานแต่ละประเภท และค่า MFI ยังเป็นค่าพื้นฐานสำหรับการควบคุมคุณภาพของเม็ดพลาสติกอีกด้วย ในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1238 และ ISO 1133 ด้วยเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก Melt Flow Indexer รุ่น MP1200 ดังภาพประกอบ 11 ซึ่งการทดสอบจะคล้ายกับการ Extrusion คือเป็นการหลอมเหลวพลาสติกในกระบอกทดสอบ (cylinder) ที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ใช้น้ำหนักกดที่ 2.16 กิโลกรัม กดลงบนแท่งกด (piston) โดยให้แท่งกดกระทำกับพลาสติกเหลวที่อยู่ในกระบอกทดสอบ พลาสติกเหลวจะไหลผ่านหัวดาย์นออกมาและทำการตัดทุก 10 วินาที ตัดจนพลาสติกเหลวที่อยู่ในกระบอกทดสอบไหลออกมาหมด ทำการชั่งน้ำหนักพลาสติกที่ไหลออกมาเทียบกับเวลา 10 นาทีที่จะได้ค่า MFI ของพลาสติก ซึ่งมีหน่วยเป็น กรัม /10 นาที (g/10min) [32,33]



ภาพประกอบ 11 เครื่องทดสอบอัตราการหลอมไหลพลาสติก Melt Flow Indexer รุ่น MP1200

3.9 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ

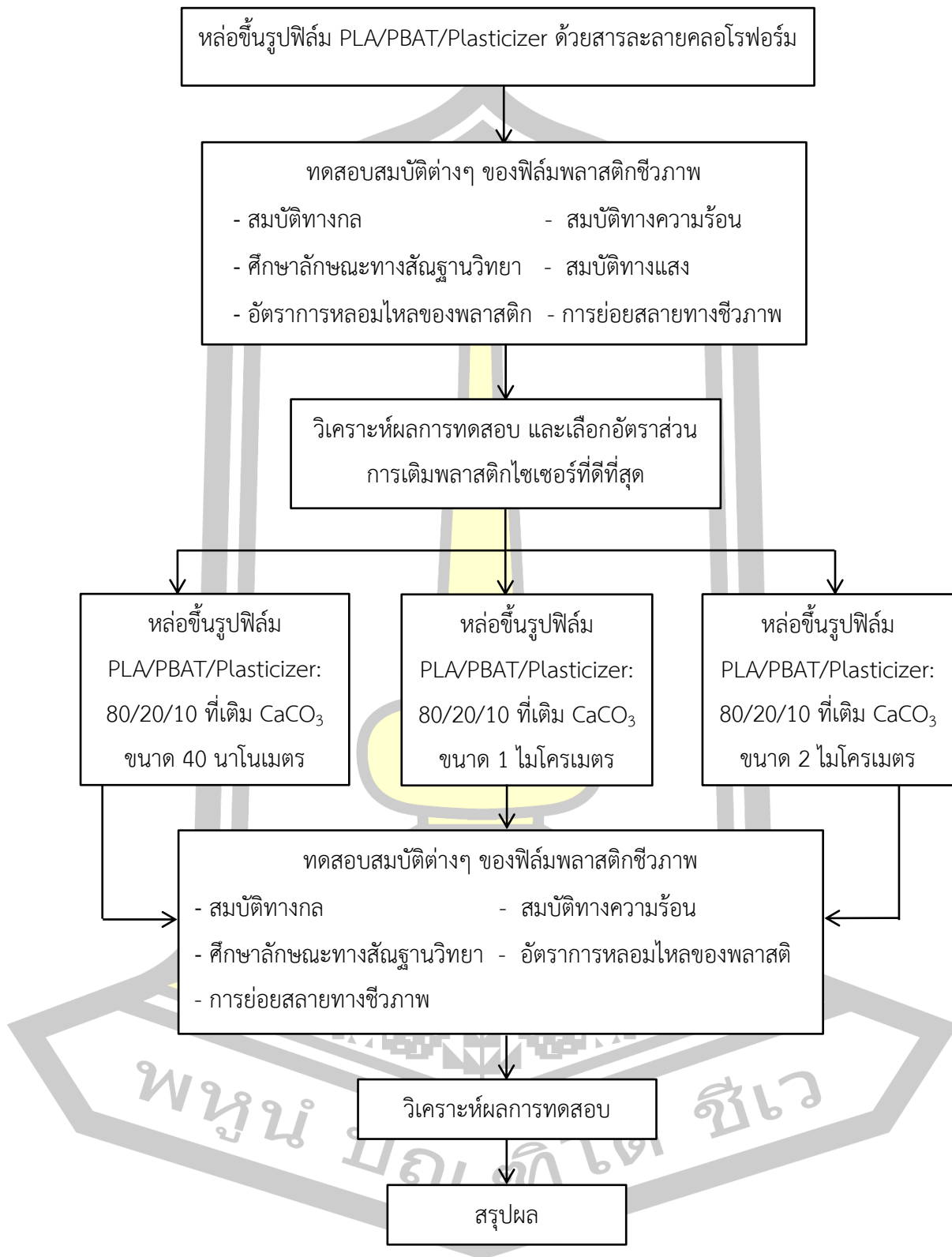
การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพเป็นการทดสอบการเสื่อมสภาพของวัสดุตามสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ เช่น แสง อุณหภูมิ ความชื้น และการย่อยสลายทางชีวภาพจากการทำงานของจุลินทรีย์ การย่อยสลายของพอลิเมอร์ทางชีวภาพโดยกระบวนการเมแทบอลิซึม (metabolism) ของจุลินทรีย์เป็นการสลายตัวของพอลิเมอร์กลายเป็นสารประกอบพื้นฐาน เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และน้ำ เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบโดยนำแผ่นฟิล์มที่ได้จากกระบวนการหล่อขึ้นรูปไปฝังกลบลงดินที่บรรจุอยู่ภายในกระถางปลูกต้นไม้ ดังภาพประกอบ 12 ทำการรดน้ำสัปดาห์ละ 1 ครั้ง เป็นระยะเวลา 90 วัน หลังการฝังกลบจนครบระยะเวลาที่ต้องการศึกษานำแผ่นฟิล์มไปทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (texture analyzer) รุ่น TA.XT Plus เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ เช่น ค่าความเค้นแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และการสังเกตด้วยตาเปล่า และเครื่อง Gel Permeation Chromatography (GPC) รุ่น Agilent 1260 Infinity II เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุล [1]



ภาพประกอบ 12 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังกลบในดิน



พหุพันธ์ ปณฺ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ 13 แผนผังการทำงานวิจัย

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัยและอภิปรายผล

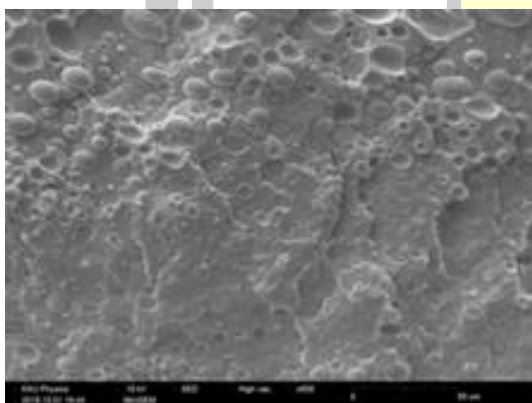
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาต่อยอดจากงานวิจัยเรื่อง การผลิตถุงพลาสติกชีวภาพจากพอลิ(แลคติก-แอซิด) (PLA) ผสมพอลิ(บิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท) (PBAT) และสารเพิ่มความยาวสายโซ่ (CE) โดยกระบวนการเป่าขึ้นรูปด้วยเครื่องเป่าถุงพลาสติก (Blown film extrusion) ที่ได้ตีพิมพ์ในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ฉบับพิเศษ ประจำปี 2560 จากผลการทดสอบ พบว่า เมื่อผสม PBAT และเติม CE จะทำให้ฟิล์มมีความขุ่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม แสดงให้เห็นว่าการส่องผ่านของแสงลดลง ผลการทดสอบสมบัติทางกลของการเติม PBAT ส่งผลให้ความแข็งแรงลดลง แต่ระยะยืดและค่าความต้านแรงที่มทะลุจะเพิ่มขึ้น เกิดจากฟิล์มมีความเหนียวและยืดหยุ่นมากขึ้น ในกรณีการผสม CE ทำให้ทั้งความแข็งแรงและระยะยืดเพิ่มขึ้นเนื่องจาก CE เพิ่มความยาวสายโซ่ของ PLA และ PBAT การเติม PBAT ทำให้ปริมาณผลึกลดลง และเมื่อเติม CE จะช่วยลดการเกิดผลึก เนื่องจาก CE ทำให้ PLA และ PBAT เข้ากันได้ดีขึ้นและทำให้ PBAT ชัดขวางการเกิดผลึกใน PLA อุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม PBAT และ CE ลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่าวัสดุทั้งสามชนิดมีความเข้ากันได้ดี ซึ่งนำมาสู่การวิจัยพัฒนาต่อยอดเพื่อเพิ่มสมบัติความเหนียว ความยืดหยุ่น และลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากคุณสมบัติที่ได้ยังไม่เพียงพอต่อการนำไปประยุกต์งานในเชิงอุตสาหกรรมและยังมีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่าถุงพลาสติกที่ใช้กันในปัจจุบัน 3-4 เท่า [6]

ในงานวิจัยนี้ได้นำอัตราส่วนผสมระหว่าง PLA 80 เปอร์เซ็นต์ และ PBAT 20 เปอร์เซ็นต์ ที่ได้จากการศึกษามาแล้วข้างต้น มาทำการศึกษาผลของการเติมพลาสติกไซเซอร์ในการช่วยเพิ่มสมบัติความเหนียวลดความยืดหยุ่น และแคลเซียมคาร์บอเนตในการช่วยลดต้นทุนการผลิต โดยกระบวนการหล่อขึ้นรูปฟิล์มพอลิ(แลคติก-แอซิด) ด้วยตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม ซึ่งเป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) เพื่อเป็นการศึกษาสมบัติเบื้องต้นของฟิล์มพลาสติกก่อนการนำไปประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม โดยแบ่งการอภิปรายผลออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลของการเติมพลาสติกไซเซอร์ และผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต โดยใช้อัตราส่วนการเติมพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมแล้วนำไปศึกษาผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ดังนั้นผลที่ได้จากการดำเนินงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

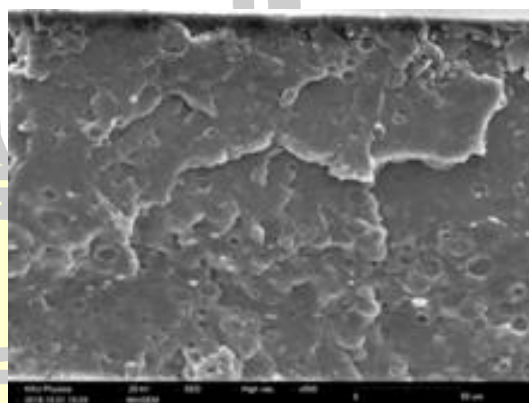
4.1 ผลของการเติมพลาสติกไซเซออร์

4.1.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

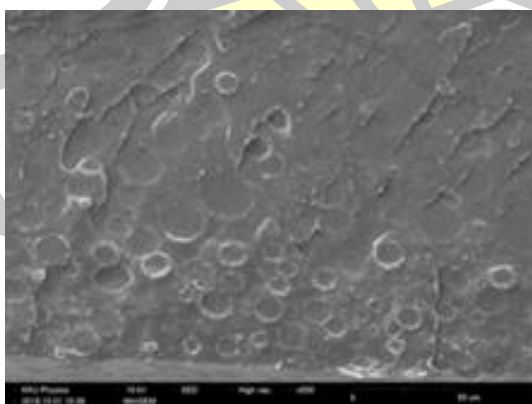
จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่า ที่อัตราส่วน PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์: 80/20/0 ดังภาพประกอบ 14 (a) จะเห็นโครงสร้างภายในมีลักษณะขรุขระ เป็นผลมาจากพลาสติกทั้งสองชนิดยังเข้ากันได้ไม่ดี และเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr ดังภาพประกอบ 14 (b-e) พบว่า ลักษณะของพื้นที่หน้าตัดมีความเรียบเนียนเป็นเนื้อเดียวกันขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณการเติมพลาสติกไซเซออร์ ที่ปริมาณการเติมพลาสติกไซเซออร์ 15 phr โครงสร้างภายในมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน เกะกะกันเป็นแผ่นใหญ่ มีความเรียบเนียน แสดงให้เห็นว่าพลาสติกไซเซออร์มีผลต่อความเข้ากันได้ของฟิล์มพลาสติกชีวภาพ ส่งผลให้พลาสติกมีความเหนียว ความนิ่มมากยิ่งขึ้น และยังช่วยให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดสามารถเข้ากันได้ดีมากยิ่งขึ้น



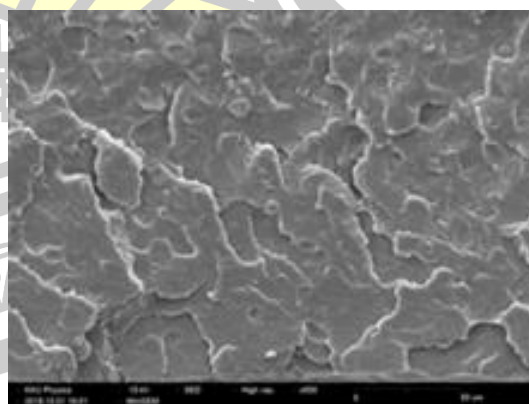
(a) 80/20/0



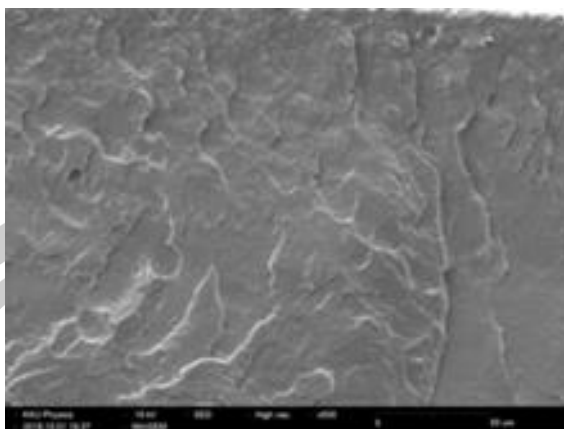
(b) 80/20/2



(c) 80/20/5



(d) 80/20/10



(e) 80/20/15

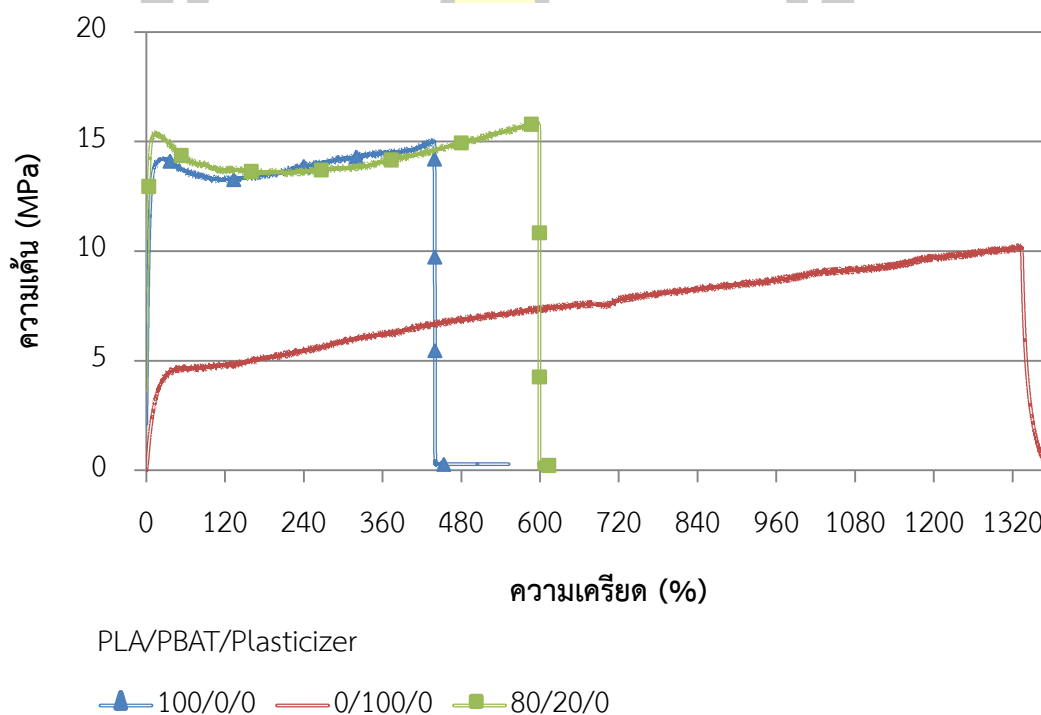
ภาพประกอบ 14 พื้นที่หน้าตัดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์: (a) 80/20/0, (b) 80/20/2, (c) 80/20/5, (d) 80/20/10, (e) 80/20/15

4.1.2 สมบัติทางกล

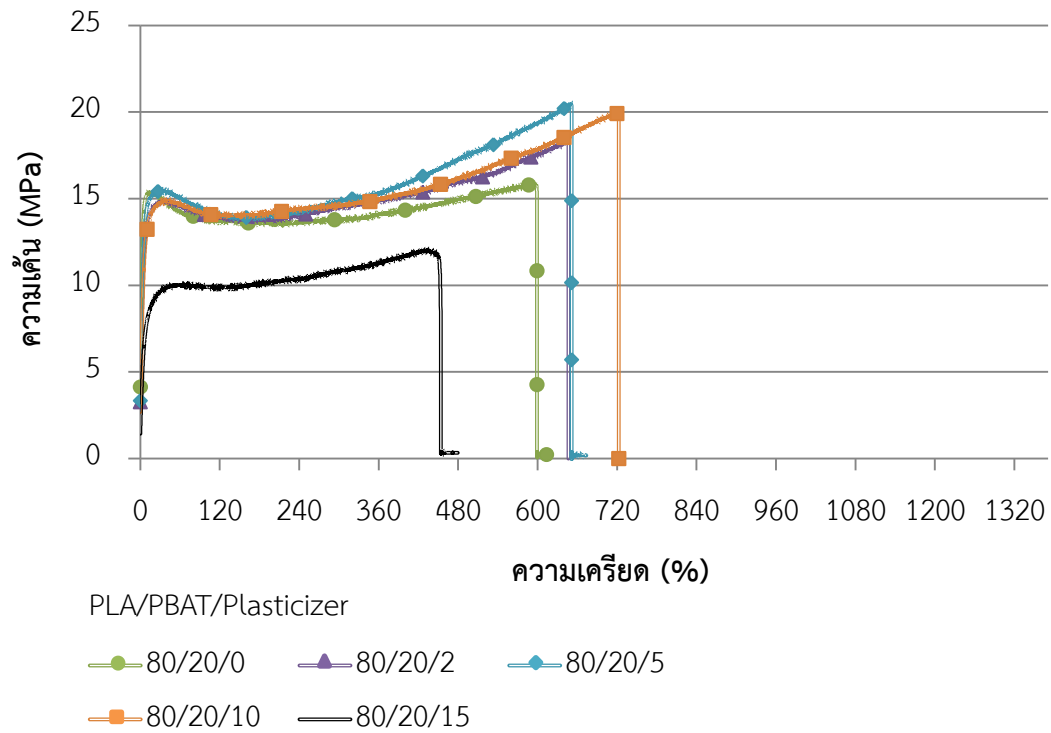
ผลการทดสอบแรงดึงแสดงดังตาราง 8 ภาพประกอบ 15 และ 16 ตามลำดับ พบว่า ค่าความเค้นแรงดึง (tensile strength) ที่ใช้ในการดึง PBAT บริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 4.65 เมกะปาสคาล (MPa) และ PLA บริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 14.21 MPa เมื่อนำ PLA ผสมกับ PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 ค่าความเค้นแรงดึงมีค่าเท่ากับ 14.37 MPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ PLA บริสุทธิ์ จากนั้นทำการเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr พบว่าความเค้นแรงดึงมีค่าเท่ากับ 14.67 15.18 16.39 และ 10.00 MPa ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ 2 5 และ 10 phr ค่าความเค้นแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ 15 phr ค่าความเค้นแรงดึงลดลง ดังภาพประกอบ 17 ซึ่งเป็นแผนภูมิค่าความเค้นแรงดึงที่ใช้ในการดึง

พิจารณาการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) พบว่า PBAT บริสุทธิ์มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดมากกว่า 1,333 เปอร์เซ็นต์ (ในการทดสอบชิ้นงานทดสอบไม่ขาดออกจากกัน เนื่องจากหดรยะที่เครื่องมือทดสอบสามารถยืดออกได้) ส่วน PLA บริสุทธิ์มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ 453 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำ PLA ผสมกับ PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเท่ากับ 587 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเท่ากับ 600 633 648 และ 362 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ปริมาณ 2 ถึง 10 phr การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่ปริมาณการเติมพลาสติกไซเซออร์ 15 phr ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง ดังภาพประกอบ 18

เมื่อพิจารณาค่ามอดูลัส (modulus) พบว่า PLA บริสุทธิ์มีค่ามอดูลัสสูงที่สุดเท่ากับ 33.15 กิโลปาสคาล (kPa) แสดงให้เห็นว่า PLA มีความแข็งแรงสูง แต่เปราะและเกิดการแตกหักได้ง่าย ที่ PBAT บริสุทธิ์มีค่ามอดูลัสน้อยที่สุดคือ 7.64 kPa หมายความว่า PBAT มีความเหนียวและยืดหยุ่นสูง เมื่อผสม PLA เข้ากับ PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 ค่ามอดูลัสเท่ากับ 27.02 kPa ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่างค่ามอดูลัสของ PLA และ PBAT เป็นผลจากการนำพอลิเมอร์ที่มีสมบัติแตกต่างกันทั้งสองชนิดมาผสมเข้าด้วยกัน ทำให้ฟิล์มมีทั้งความเหนียวและความแข็งแรง จากนั้นเติมพลาสติกไซเซอร์ที่ปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr ค่ามอดูลัสเท่ากับ 30.54 32.30 30.79 และ 33.05 kPa ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 19 ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่า พลาสติกไซเซอร์มีผลต่อสมบัติทางกลของฟิล์มพลาสติกชีวภาพ เนื่องจากพลาสติกไซเซอร์ส่งผลให้ค่าความเค้นแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นที่ปริมาณการเติมไม่เกิน 10 phr ซึ่งเป็นผลมาจากพลาสติกไซเซอร์เข้าไปแทรกตัวอยู่ภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด (PLA/PBAT) ทำให้โมเลกุลขยับตัวได้ง่ายส่งผลให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น



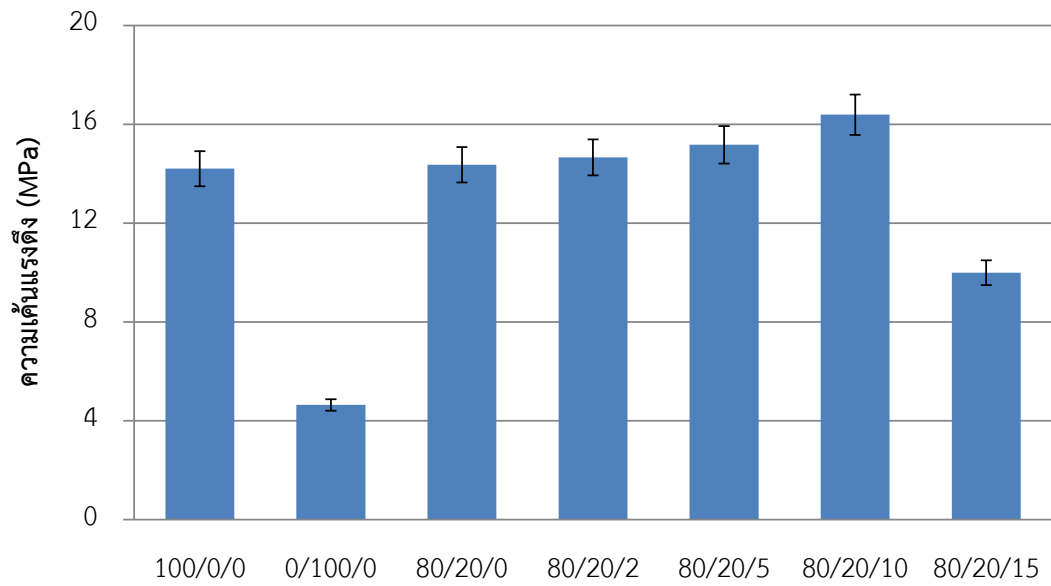
ภาพประกอบ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของฟิล์ม PLA PBAT และ PLA/PBAT: 80/20



ภาพประกอบ 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของฟิล์ม
PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์

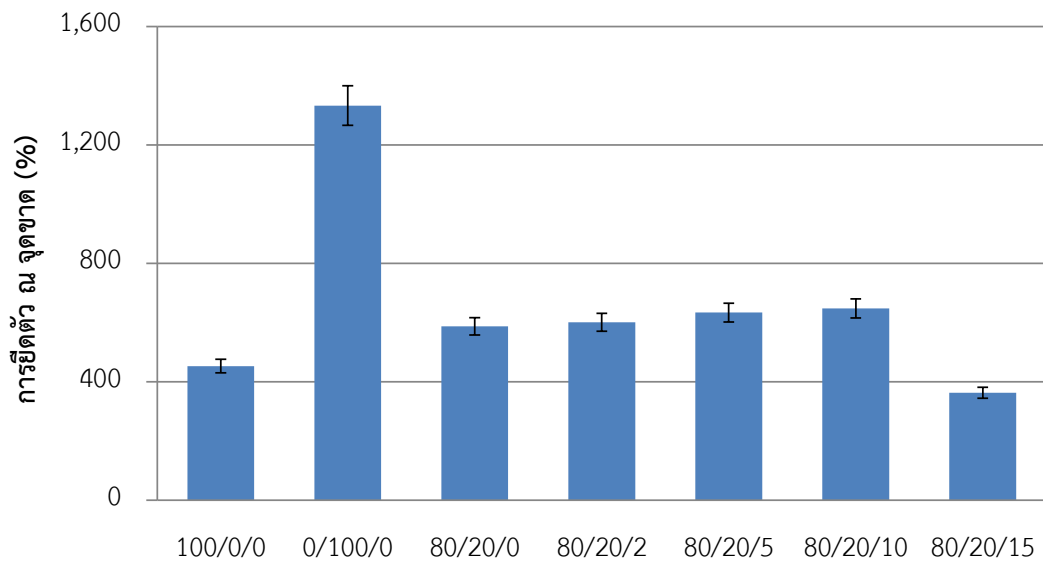
ตาราง 8 ผลการทดสอบแรงดึงของฟิล์มพลาสติก PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์

ตัวอย่าง	ความเค้นแรงดึง (MPa)	มอดูลัส (kPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)
100/0/0	14.21	33.15	453
0/100/0	4.65	7.64	1,333
80/20/0	14.37	27.02	587
80/20/2	14.67	30.54	600
80/20/5	15.18	32.30	633
80/20/10	16.39	30.79	648
80/20/15	10.00	33.05	362



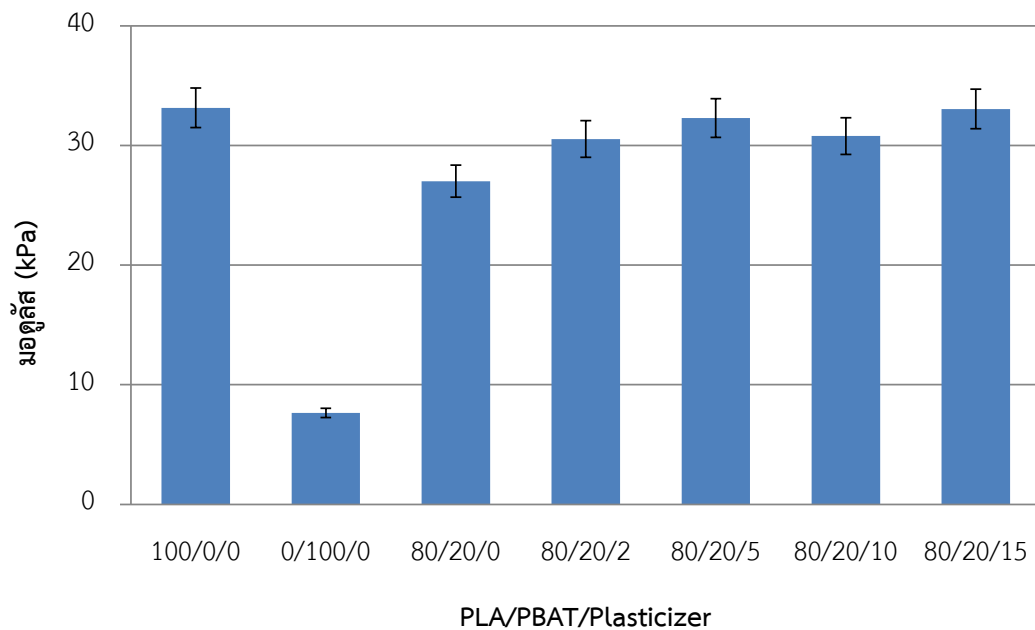
PLA/PBAT/Plasticizer

ภาพประกอบ 17 ค่าความเค้นแรงดึงที่ใช้ในการดึงจนชิ้นงานทดสอบเกิดการเสียรูป



PLA/PBAT/Plasticizer

ภาพประกอบ 18 การยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มพลาสติกแต่ละอัตราส่วน



ภาพประกอบ 19 ค่ามอดูลัสของฟิล์มพลาสติกแต่ละอัตราส่วนผสม

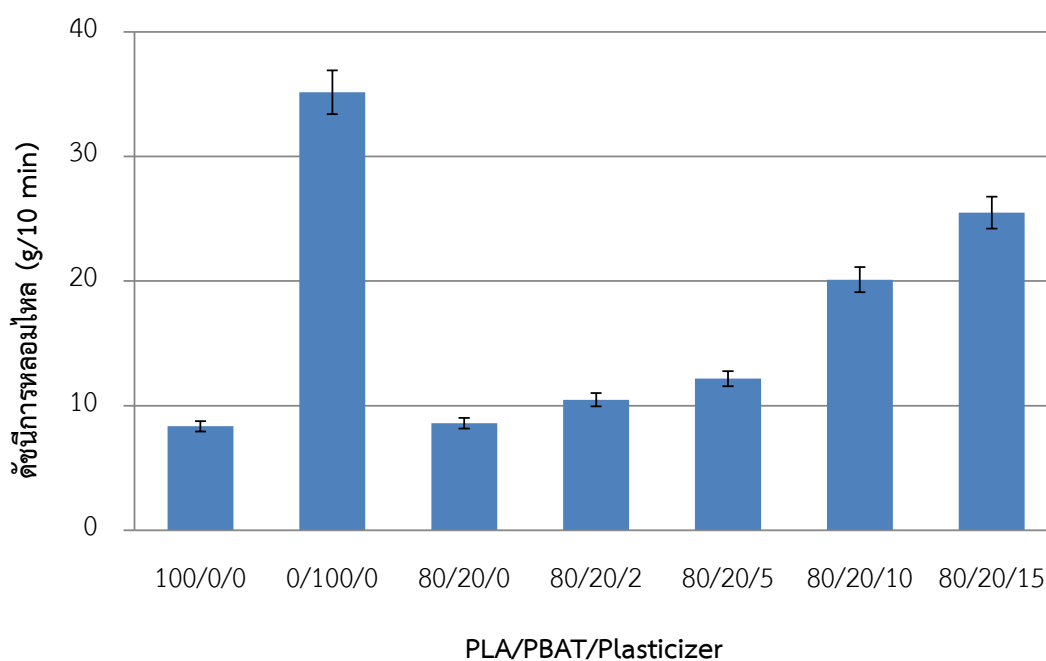
4.1.3 อัตราการไหลของพลาสติก

จากตาราง 9 ผลการทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกพบว่า PLA บริสุทธิ์มีค่าดัชนีการหลอมไหล (MFI) เท่ากับ 8.34 กรัมต่อ 10 นาที และ PBAT บริสุทธิ์มีค่าดัชนีการหลอมไหลเท่ากับ 35.16 กรัมต่อ 10 นาที เมื่อนำ PLA ผสมกับ PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 ค่าดัชนีการหลอมไหลเท่ากับ 8.59 กรัมต่อ 10 นาที จากนั้นเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr ดัชนีการหลอมไหลมีค่าเท่ากับ 10.47 12.17 20.11 และ 25.49 กรัมต่อ 10 นาที ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 20 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าพลาสติกไซเซออร์ส่งผลต่ออัตราการไหลของพลาสติกในสถานะหลอมเหลว เนื่องจากสมบัติของพลาสติกไซเซออร์ที่เข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของพลาสติกทั้งสองชนิด ทำให้โมเลกุลยับตัวได้ง่ายขึ้นส่งผลให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมพลาสติกไซเซออร์ [23]

พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์

ตาราง 9 ผลการทดสอบอัตราการไหลของฟิล์มพลาสติก PLA/PBAT/Plasticizer

ตัวอย่าง (PLA/PBAT/พลาสติกไซเซอร์)	ดัชนีการหลอมไหล (g/10 min)
100/0/0	8.34
0/100/0	35.16
80/20/0	8.59
80/20/2	10.47
80/20/5	12.17
80/20/10	20.11
80/20/15	25.49



ภาพประกอบ 20 แผนภูมิเปรียบเทียบอัตราการไหลของพลาสติก (MFI) แต่ละอัตราส่วน

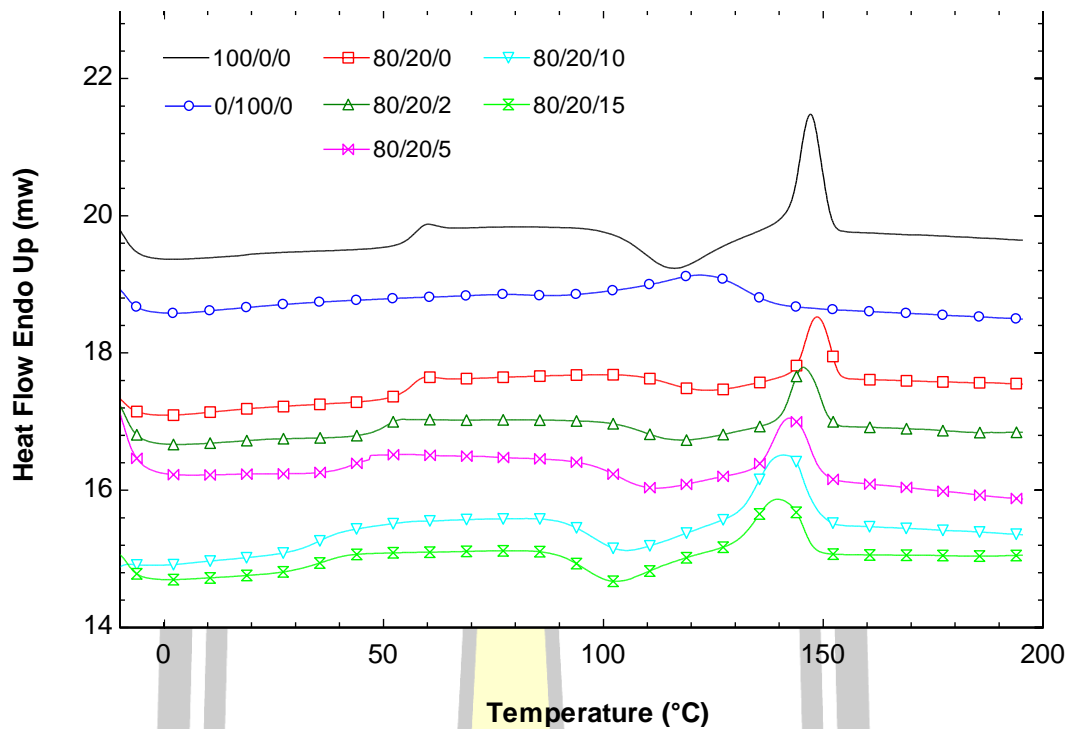
4.1.4 สมบัติทางความร้อน

จากตาราง 10 และภาพประกอบ 21 แสดงกราฟ DSC ของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซอร์ พบว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ PLA บริสุทธิ์มีค่า 56.06 องศา

เซลเซียส เมื่อนำ PLA ผสมกับ PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 ค่า T_g ลดลงเล็กน้อยที่ 55.63 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr จะมีค่า T_g คือ 49.86 43.73 37.20 และ 35.83 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) จะมีค่าลดลงตามปริมาณพลาสติกไซเซออร์เช่นเดียวกับอุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการหลอมเหลว พบว่าอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_{cc}) ของ PLA บริสุทธิ์มีค่า 116.22 องศาเซลเซียส PLA ผสมกับ PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 ค่า T_{cc} เพิ่มขึ้นเป็น 122.88 องศาเซลเซียส เมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr จะมีค่า T_{cc} คือ 117.55 111.24 105.20 และ 102.88 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ของ PLA บริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 147.18 องศาเซลเซียส และ PBAT บริสุทธิ์มีค่าเท่ากับ 122.20 องศาเซลเซียส เมื่อผสม PLA เข้ากับ PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 ทำให้ค่า T_m เพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ 148.52 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr พบว่าค่า T_m เท่ากับ 145.53 142.54 141.00 และ 139.86 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังนั้นจากการทดสอบสมบัติทางความร้อนสามารถสรุปได้ว่า PLA และ PBAT เข้ากันได้ดีมากยิ่งขึ้น เป็นผลมาจากพลาสติกไซเซออร์ช่วยให้โมเลกุลเกิดการขยับตัวได้ง่ายขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของพลาสติกไซเซออร์ไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดและเข้าไปเพิ่มที่ว่างระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการหลอมเหลวลดลง [34]

ตาราง 10 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์

ตัวอย่าง (PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์)	T_g (°C)	การเกิดผลึก		จุดหลอมเหลว		X_c (%)
		ΔH_{cc} (J/g)	T_{cc} (°C)	ΔH_m (J/g)	T_m (°C)	
100/0/0	56.06	-18.58	116.22	17.67	147.18	0.98
0/100/0	-	-	-	13.80	122.20	14.84
80/20/0	55.63	-5.82	122.88	7.39	148.52	2.10
80/20/2	49.86	-7.56	117.55	9.92	145.53	3.18
80/20/5	43.73	-9.42	111.24	11.91	142.54	3.35
80/20/10	37.20	-13.12	105.20	15.82	141.00	3.64
80/20/15	35.83	-12.06	102.88	11.89	139.86	0.23

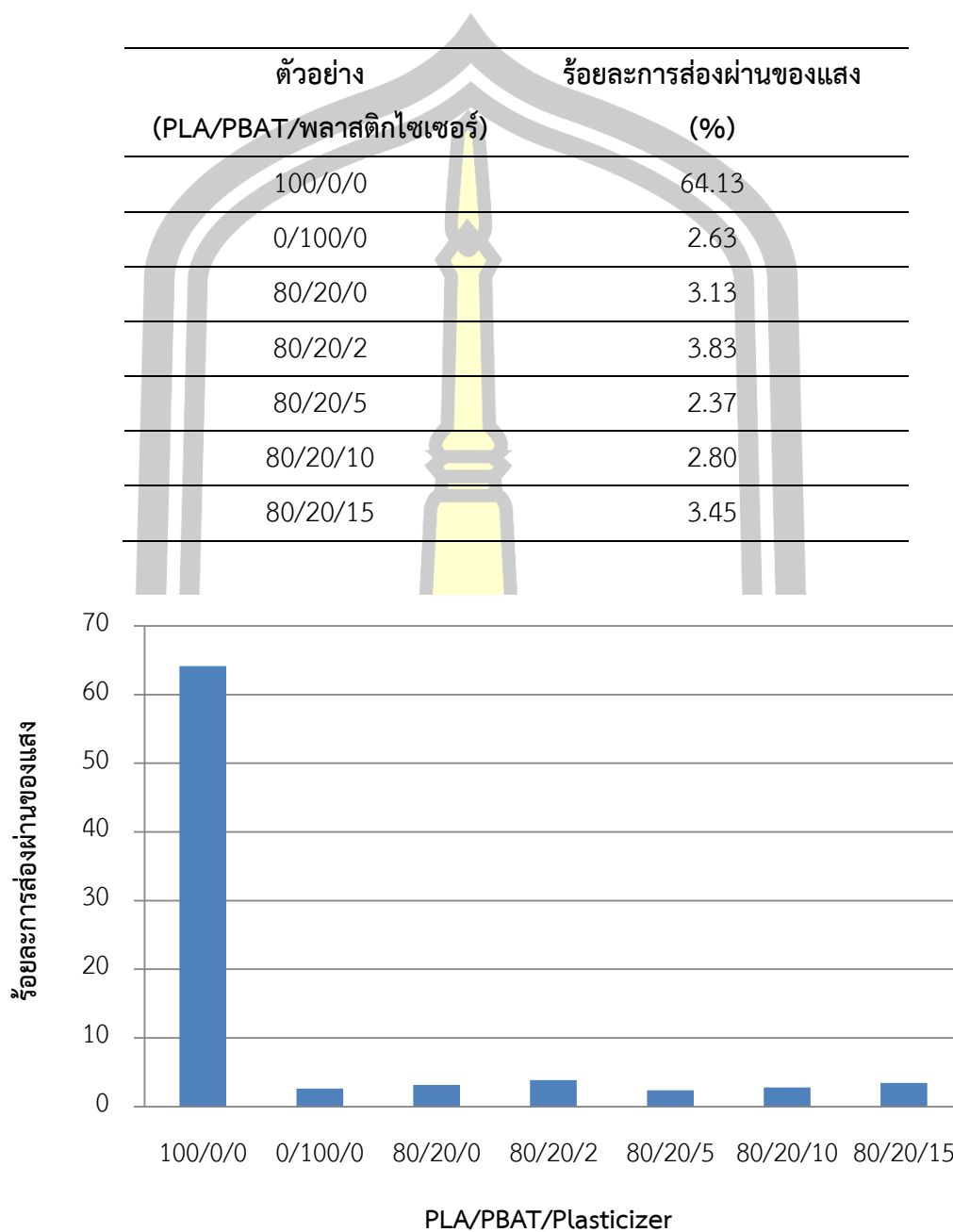


ภาพประกอบ 21 DSC thermograms of PLA/PBAT/Plasticizer

4.1.5 สมบัติทางแสง

จากการวิเคราะห์สมบัติทางแสงผลที่ได้คือร้อยละการส่องผ่านของแสงดังตาราง 11 จะเห็นว่า PLA บริสุทธิ์มีค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงสูงที่สุดเท่ากับ 64.13 และ PBAT บริสุทธิ์มีค่าร้อยละการส่องผ่านเท่ากับ 2.63 เมื่อนำ PLA ผสมเข้ากับ PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 พบว่าร้อยละการส่องผ่านของแสงมีค่าเท่ากับ 3.13 แสดงให้เห็นว่าร้อยละการส่องของแสงจะลดลงเมื่อเติม PBAT เนื่องจาก PBAT เป็นพลาสติกที่มีผลึกเป็นจำนวนมากในโครงสร้างและมีสีที่ขุ่น ส่วน PLA ไม่มีสี มีความโปร่งแสง และโครงสร้างภายในมีผลึกน้อย จึงส่งผลให้ฟิล์มพลาสติกมีสีขุ่นขึ้นตามปริมาณผลึกของ PBAT เมื่อเติมพลาสติกไซเซอร์ที่ปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr พบว่าร้อยละการส่องของแสงมีค่าเท่ากับ 3.83 2.37 2.80 และ 3.45 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 22 ซึ่งจะเห็นได้ว่าร้อยละการส่องผ่านของแสงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน จึงสามารถกล่าวได้ว่าพลาสติกไซเซอร์ไม่ส่งผลต่อร้อยละการส่องผ่านของแสง เนื่องจากพลาสติกไซเซอร์ชนิดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสารเติมแต่งที่ไม่มีสีเหมือนกับ PLA และจะเข้าไปแทรกตัวอยู่ตามโครงสร้างของ PLA/PBAT เท่านั้น มีหน้าที่ทำให้ฟิล์มพลาสติกสามารถเข้ากันได้ดีมากยิ่งขึ้น และเพิ่มความเหนียวให้แก่ฟิล์มพลาสติก

ตาราง 11 ร้อยละการส่องผ่านของแสงของฟิล์มพลาสติก PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์



ภาพประกอบ 22 ร้อยละการส่องผ่านของแสงของฟิล์มพลาสติก PLA/PBAT/Plasticizer

4.1.6 การย่อยสลายทางชีวภาพ

จากการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยการนำฟิล์มไปฝังกลบด้วยดินเป็นเวลา 90 วัน พบว่า ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม PLA บริสุทธิ์ ดังภาพประกอบ 23 (a) มีรอยขาดขนาด

เล็กบริเวณขอบแผ่นฟิล์ม ส่วนฟิล์ม PBAT บริสุทธิ์ ดังภาพประกอบ 23 (b) มีจุดสีดำทั่วทั้งพื้นผิวและมีรอยขาดขนาดเล็กแฝงอยู่ตามจุดสีดำที่เกิดขึ้น คาดว่าเกิดจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในดิน เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม PLA ผสม PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 และการเติมพลาสติกไฮเซออร์ที่ปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr ดังภาพประกอบ 23 (c-g) พบว่า ฟิล์มมีลักษณะทางกายภาพคล้ายกันคือ บริเวณขอบฟิล์มมีรอยขาด และสีของฟิล์มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองตามปริมาณการเติมพลาสติกไฮเซออร์ โดยคาดว่าเกิดจากกระบวนการเมแทบอลิซึม (metabolism) ของจุลินทรีย์ในขั้นตอนการย่อยทางชีวภาพของฟิล์ม [1]



(a) 100/0/0



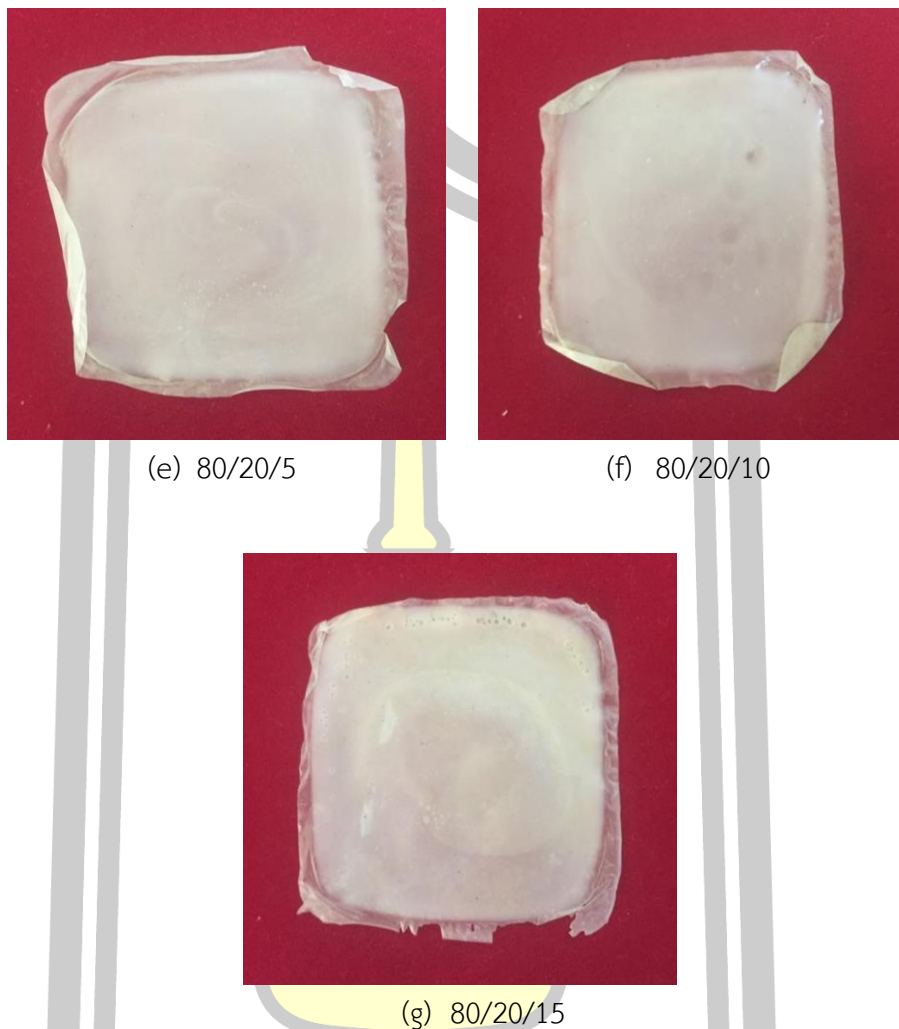
(b) 0/100/0



(c) 80/20/0



(d) 80/20/2



ภาพประกอบ 23 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพลาสติกหลังการฝังกลบเป็นเวลา 90 วัน

การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของฟิล์ม โดยวัดค่าความเค้นแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดที่เปลี่ยนแปลงไปดังตาราง 12 พบว่า ความเค้นแรงดึงของ PLA บริสุทธิ์มีค่าเพิ่มขึ้น จากเดิมคือ 14.21 MPa เป็น 32.34 MPa ส่วน PBAT บริสุทธิ์จะลดลง จากเดิมคือ 4.65 MPa เป็น 3.64 MPa และการผสม PLA กับ PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 ทำให้ความเค้นแรงดึงเพิ่มขึ้นจาก 14.37 MPa เป็น 27.41 MPa การเติมพลาสติกไซเซอร်ทำให้ความเค้นแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ก่อนการฝังกลบความเค้นแรงดึงมีค่าเท่ากับ 14.67 15.18 16.39 และ 10.00 MPa ตามลำดับ ในการเติมพลาสติกไซเซอร်ที่ปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr และเมื่อผ่านการฝังกลบ 90 วัน ความเค้นแรงดึงเท่ากับ 22.64 23.19 16.24 และ 15.36 MPa ตามลำดับ ภาพประกอบ 24 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบความเค้นแรงดึงก่อนการฝังกลบและหลังการฝังกลบเป็นเวลา 90 วัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าการ

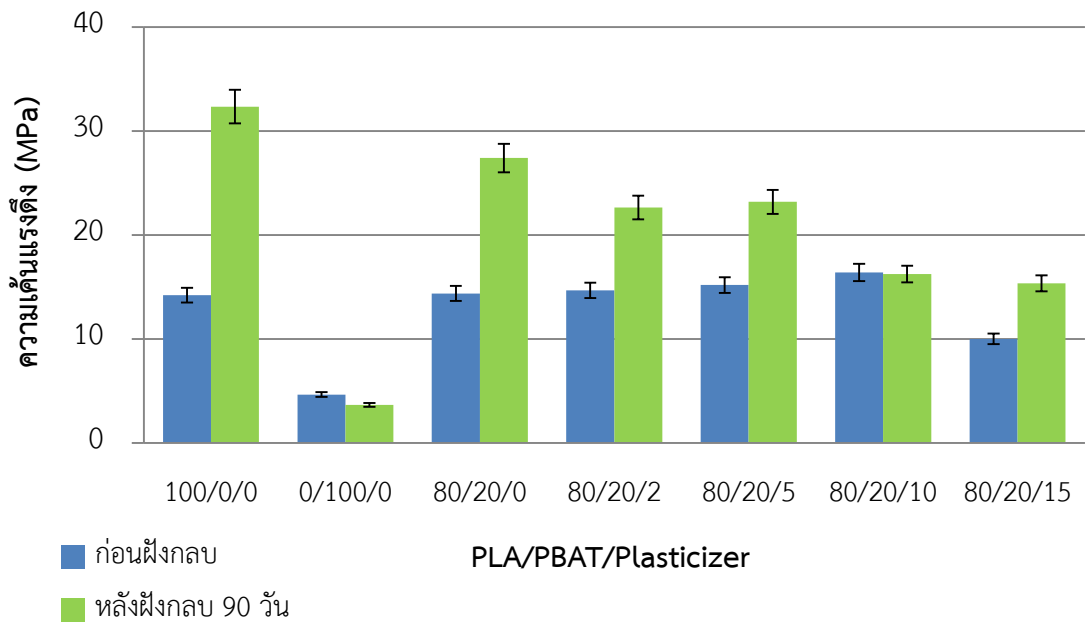
เพิ่มขึ้นของค่าความเค้นแรงดึงเป็นผลมาจากผลึกภายในโครงสร้างเกิดการเรียงตัวกัน อาจเกิดจากโมเลกุลที่สั้นลง จึงส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งเพิ่มขึ้น

ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงานทดสอบแสดงดังภาพประกอบ 25 พบว่า เมื่อนำชิ้นงานไปฝังกลบในดินเป็นเวลา 90 วัน จะทำให้การยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มแต่ละอัตราส่วนมีค่าลดลงอย่างชัดเจน ในกรณี PLA บริสุทธิ์ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดจากเดิม 453 เปอร์เซ็นต์ ลดลงเหลือ 9 เปอร์เซ็นต์ PBAT บริสุทธิ์ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดจากเดิม 1,333 เปอร์เซ็นต์ ลดลงเหลือ 455 เปอร์เซ็นต์ PLA ผสม PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดจากเดิม 587 เปอร์เซ็นต์ ลดลงเหลือ 97 เปอร์เซ็นต์ และการเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ปริมาณ 2 5 10 ละ 15 phr ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดจากเดิม 600 633 648 และ 362 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ลดลงเหลือ 28 11 8 และ 7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ คาดว่าพลาสติกไซเซออร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์ม เนื่องจากการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามปริมาณการเติมพลาสติกไซเซออร์ จะเห็นได้ชัดที่ปริมาณการเติม 15 phr

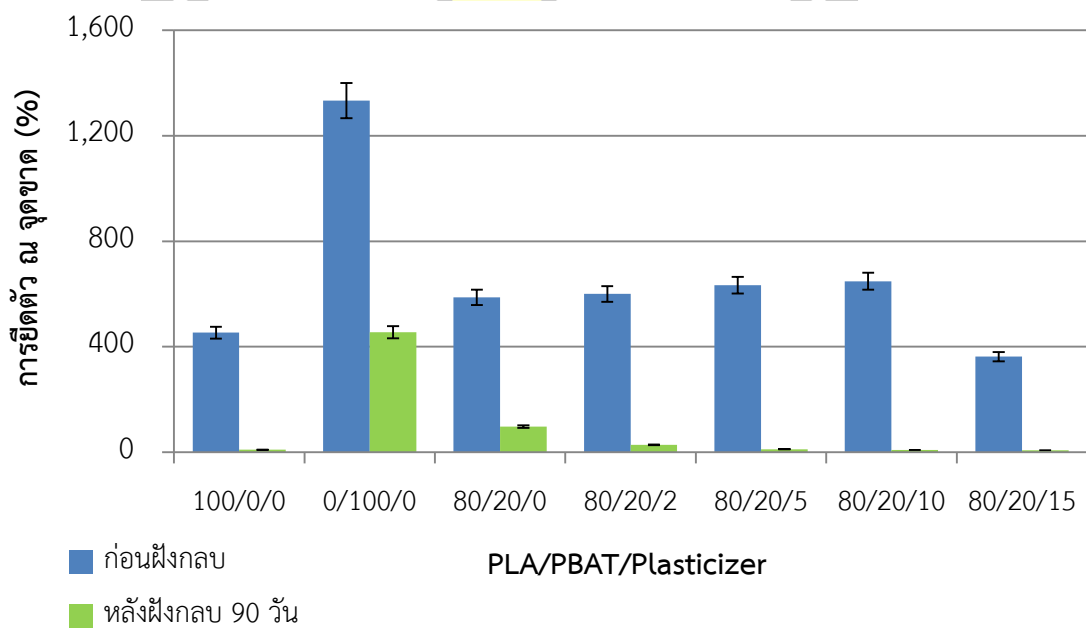
เมื่อพิจารณาค่าความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดจะเห็นว่าฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ความเหนียวลดลง เป็นผลจากผลึกภายในโครงสร้างมีการยับตัวและเรียงตัวกันใหม่ ซึ่งเมื่อฝังกลบในดินเป็นเวลานานมากกว่า 90 วัน สันนิษฐานว่าฟิล์มจะเกิดการแตกหักและย่อยสลายไปเป็นธาตุพื้นฐาน เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และน้ำ เป็นต้น [1]

ตาราง 12 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มก่อนและหลังการฝังกลบในดินเป็นเวลา 90 วัน

ตัวอย่าง (PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์)	ความเค้นแรงดึง (MPa)		การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	
	ก่อนฝังกลบ	หลังฝังกลบ 90 วัน	ก่อนฝัง กลบ	หลังฝังกลบ 90 วัน
100/0/0	14.21	32.34	453	9
0/100/0	4.65	3.64	1,333	455
80/20/0	14.37	27.41	587	97
80/20/2	14.67	22.64	600	28
80/20/5	15.18	23.19	633	11
80/20/10	16.39	16.24	648	8
80/20/15	10.00	15.36	362	7



ภาพประกอบ 24 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงก่อนและหลังการฝังกลบในดินเป็นเวลา 90 วัน



ภาพประกอบ 25 เปรียบเทียบค่าการยืดตัว ณ จุดขาดก่อนและหลังการฝังกลบในดินเป็นเวลา 90 วัน

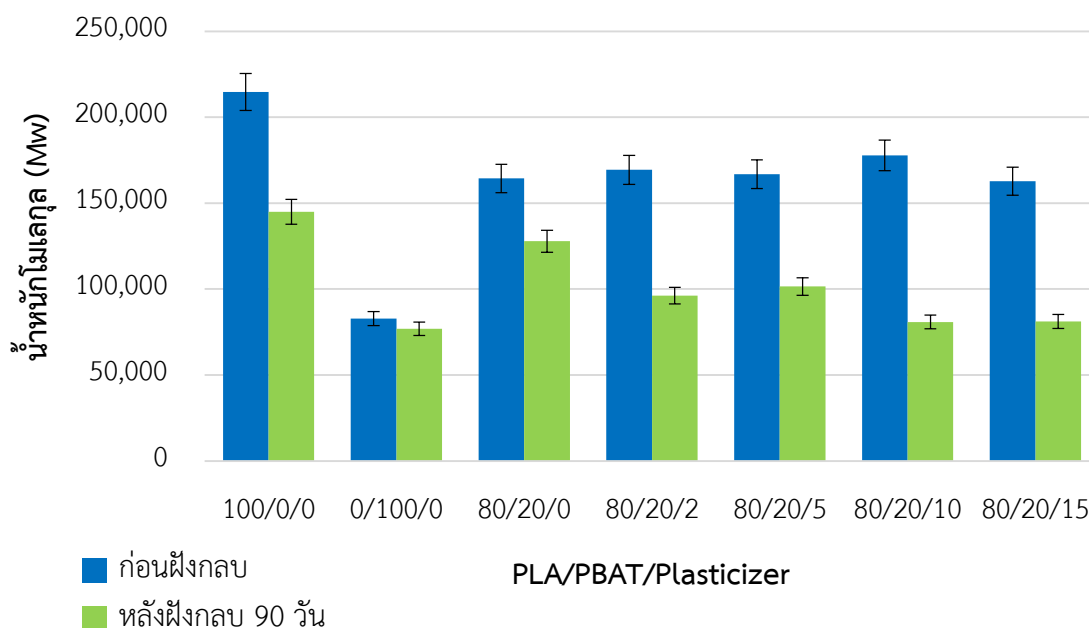
ผลของการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลดังตาราง 13 พบว่า PLA และ PBAT บริสุทธิ์ก่อนฝังกลบมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 214,658 และ 82,853 ตามลำดับ หลังฝังกลบ 90 วัน

น้ำหนักโมเลกุลลดลงเหลือ 144,986 และ 76,871 ตามลำดับ น้ำหนักโมเลกุลของ PLA ผสม PBAT ที่อัตราส่วน 80/20 ก่อนฝังกลบมีค่าเท่ากับ 164,407 หลังฝังกลบลดลงเหลือ 127,878 และน้ำหนักโมเลกุลของฟิล์ม PLA/PBAT ที่เติมพลาสติกไซเซออร์ในปริมาณ 2 5 10 และ 15 phr ก่อนฝังกลบมีค่าเท่ากับ 169,403 166,845 177,781 และ 162,733 ตามลำดับ หลังฝังกลบน้ำหนักโมเลกุลลดลงเหลือ 96,136 101,509 80,865 และ 81,174 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 26 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักโมเลกุลมีแนวโน้มลดลงหลังจากนำฟิล์มไปฝังกลบในดินเป็นเวลา 90 วัน เป็นผลมาจากเกิดการแตกหักของพันธะภายในสายโซ่โมเลกุล [1] ทำให้สายโซ่โมเลกุลสั้นลง และอาจเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลง่ายขึ้น ส่งผลให้ค่าความเค้นแรงดึงเพิ่มขึ้น

ตาราง 13 น้ำหนักโมเลกุลของฟิล์มก่อนและหลังการฝังกลบในดินเป็นเวลา 90 วัน

ตัวอย่าง (PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์)	น้ำหนักโมเลกุล (Mw)	
	ก่อนฝังกลบ	หลังฝังกลบ 90 วัน
100/0/0	214,658	144,986
0/100/0	82,853	76,871
80/20/0	164,407	127,878
80/20/2	169,403	96,136
80/20/5	166,845	101,509
80/20/10	177,781	80,865
80/20/15	162,733	81,174

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ



ภาพประกอบ 26 เปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลของฟิล์มก่อนและหลังการฝังกกลบเป็นเวลา 90 วัน

4.2 ผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต

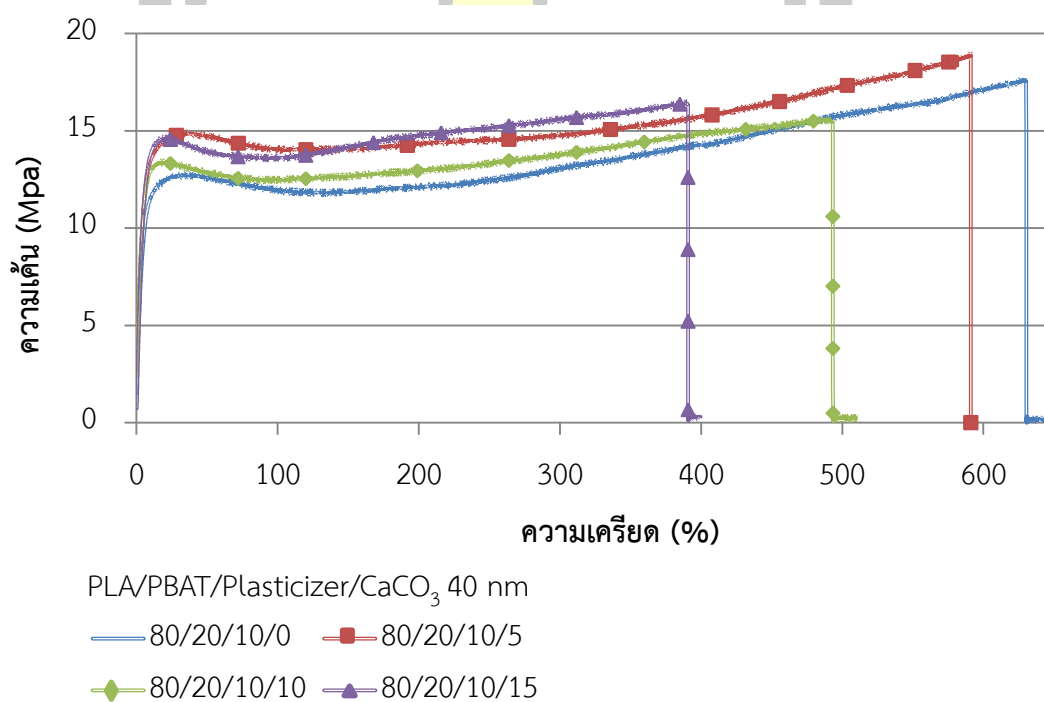
การเติมพลาสติกไซเซอร์มุ่งเน้นเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มพลาสติกนี้ให้มีความเหนียวและยืดหยุ่น จากการทดสอบสมบัติทางกลพบว่า ที่ปริมาณการเติมพลาสติกไซเซอร์ 10 phr ฟิล์มมีความเหนียวและยืดหยุ่นมากที่สุด เนื่องจากค่าความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มมีค่าสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วนผสม PLA/PBAT: 80/20 ที่ปริมาณการเติมพลาสติกไซเซอร์ 10 phr มาทำการศึกษาผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ขนาด 1 ไมโครเมตร 2 ไมโครเมตร และ 40 นาโนเมตร และศึกษาปริมาณการเติมที่เหมาะสมของแคลเซียมคาร์บอเนตทั้ง 3 ขนาด โดยจะเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 5 10 และ 15 phr ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบมีดังต่อไปนี้

4.2.1 สมบัติทางกล

การทดสอบสมบัติทางกลของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซอร์ ที่ทำการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร 1 ไมโครเมตร และ 2 ไมโครเมตร ผลที่ได้จากการทดสอบมีดังต่อไปนี้

1. ฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซอร์ ที่ทำการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร

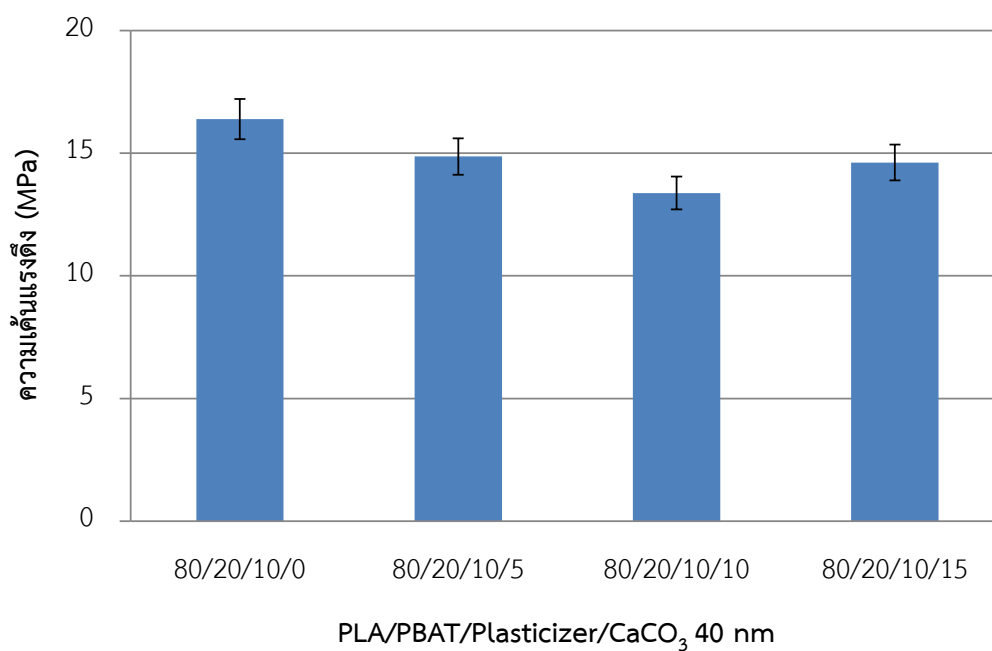
จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางกล ดังตาราง 14 และภาพประกอบ 27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) กับความเครียด (strain) ของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซอร์ ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร พบว่า ความเค้นแรงดึงของชิ้นงานที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ 16.39 MPa และชิ้นงานที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต 5 10 และ 15 phr มีค่าความเค้นแรงดึงเท่ากับ 14.87 13.38 และ 14.62 MPa ตามลำดับ ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด พบว่า ในชิ้นงานที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ 648 เปอร์เซ็นต์ ชิ้นงานที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต 5 10 และ 15 phr มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ 590 488 และ 390 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสรุปได้ว่าความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงดังภาพประกอบ 28 และ 29 ค่ามอดูลัส (modulus) ของชิ้นงานที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตเท่ากับ 30.79 kPa เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 5 10 และ 15 phr มอดูลัสมีค่าเท่ากับ 31.94 31.85 และ 42.06 kPa ตามลำดับ จากการพิจารณาค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ดังภาพประกอบ 30



ภาพประกอบ 27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซอร์ ที่เติม CaCO₃ ขนาด 40 นาโนเมตร

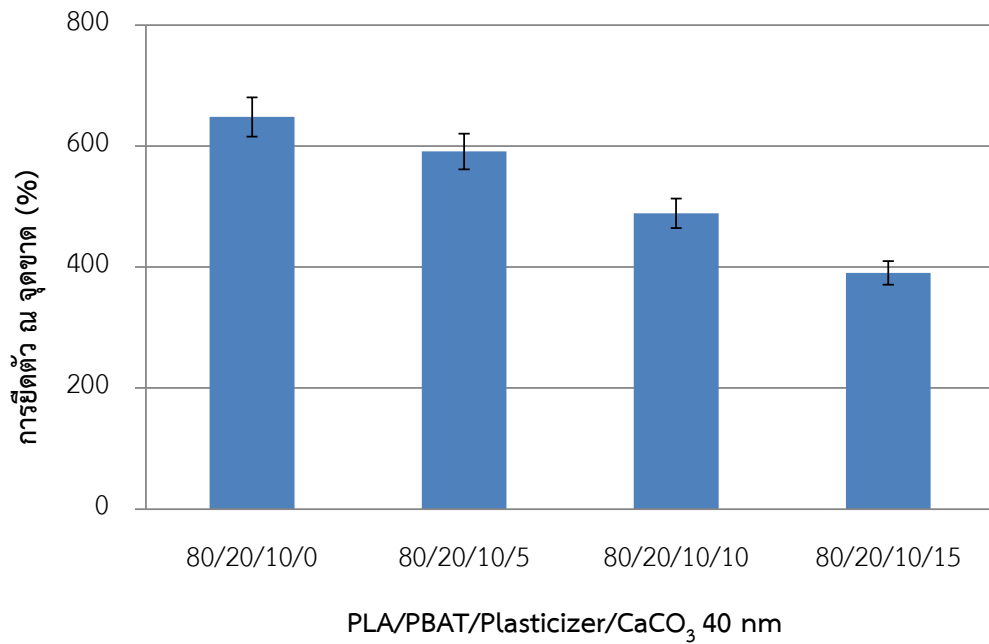
ตาราง 14 สมบัติทางกลของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO₃ ขนาด 40 นาโนเมตร

ตัวอย่าง PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์/CaCO ₃ 40 nm	ความเค้นแรงดึง (MPa)	มอดูลัส (kPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)
80/20/10/0	16.39	30.79	648
80/20/10/5	14.87	31.94	590
80/20/10/10	13.38	31.85	488
80/20/10/15	14.62	42.06	390

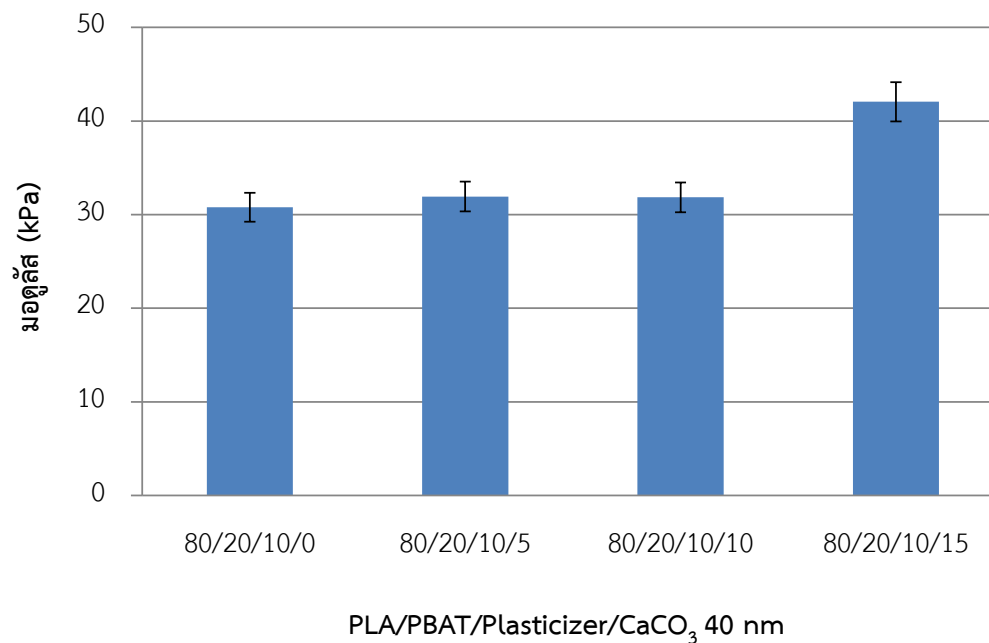


ภาพประกอบ 28 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO₃ ขนาด 40 นาโนเมตร

พหุบัณฑิตวิทยา



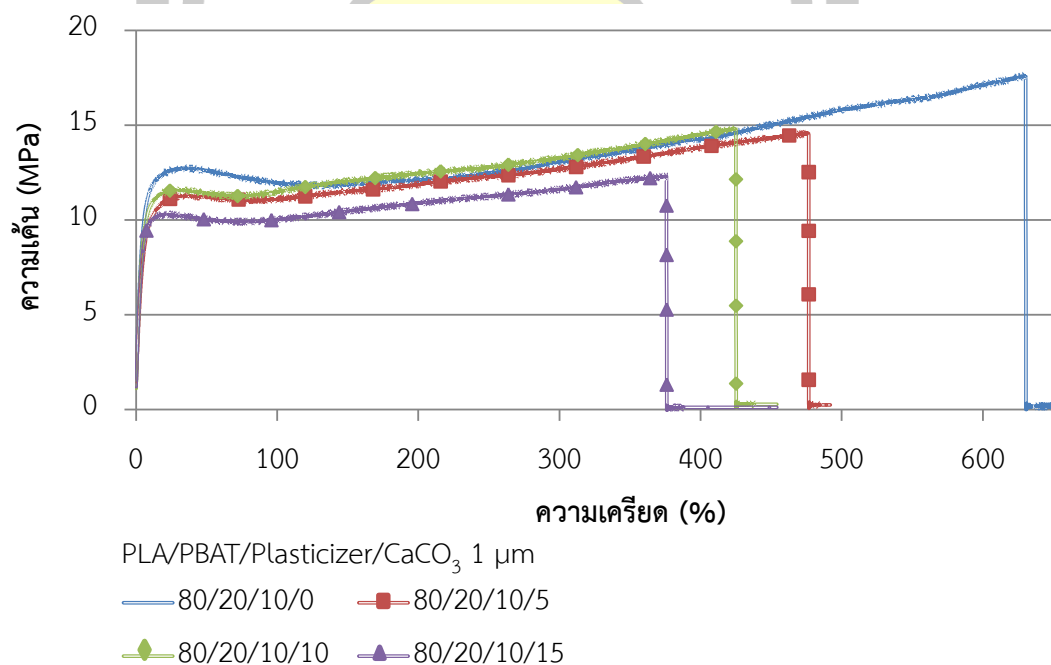
ภาพประกอบ 29 เปรียบเทียบค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO₃ ขนาด 40 นาโนเมตร



ภาพประกอบ 30 เปรียบเทียบค่ามอดูลัสของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO₃ ขนาด 40 นาโนเมตร

2. พิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่ทำการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 1 ไมโครเมตร

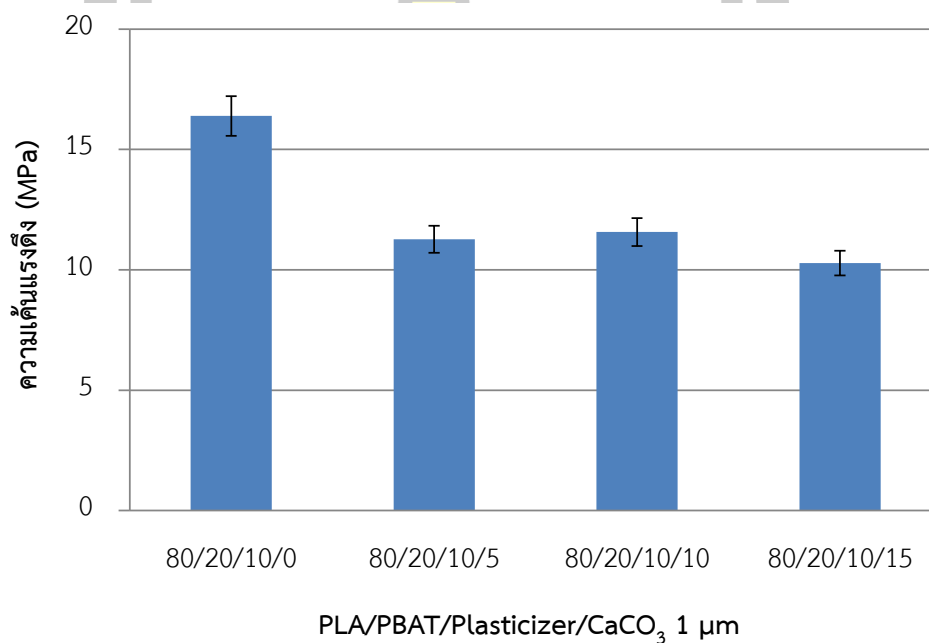
จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางกล ดังตาราง 15 และภาพประกอบ 31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 1 ไมโครเมตร พบว่า ความเค้นแรงดึงของชิ้นงานที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ 16.39 MPa และชิ้นงานที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต 5 10 และ 15 phr มีค่าความเค้นแรงดึงเท่ากับ 11.27 11.57 และ 10.28 MPa ตามลำดับ ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด พบว่า ในชิ้นงานที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ 648 เปอร์เซ็นต์ ชิ้นงานที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต 5 10 และ 15 phr มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ 475 425 และ 375 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสรุปได้ว่าความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงดังภาพประกอบ 32 และ 33 ค่ามอดูลัสของชิ้นงานที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตเท่ากับ 30.79 kPa เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 5 10 และ 15 phr มอดูลัสมีค่าเท่ากับ 30.65 34.83 และ 32.72 kPa ตามลำดับ จากการพิจารณาค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ดังภาพประกอบ 34 เช่นเดียวกับผลการทดสอบสมบัติทางกลของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร



ภาพประกอบ 31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO₃ ขนาด 1 ไมโครเมตร

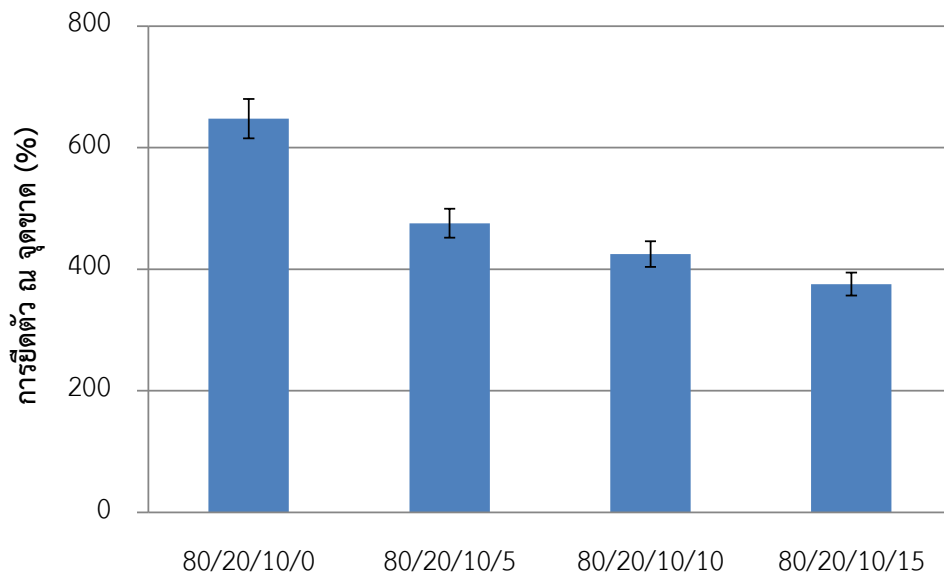
ตาราง 15 สมบัติทางกลของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO_3 ขนาด 1 ไมโครเมตร

ตัวอย่าง PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์/ CaCO_3 1 μm	ความเค้นแรงดึง (MPa)	มอดุลัส (kPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)
80/20/10/0	16.39	30.79	648
80/20/10/5	11.27	30.65	475
80/20/10/10	11.57	34.83	425
80/20/10/15	10.28	32.72	375



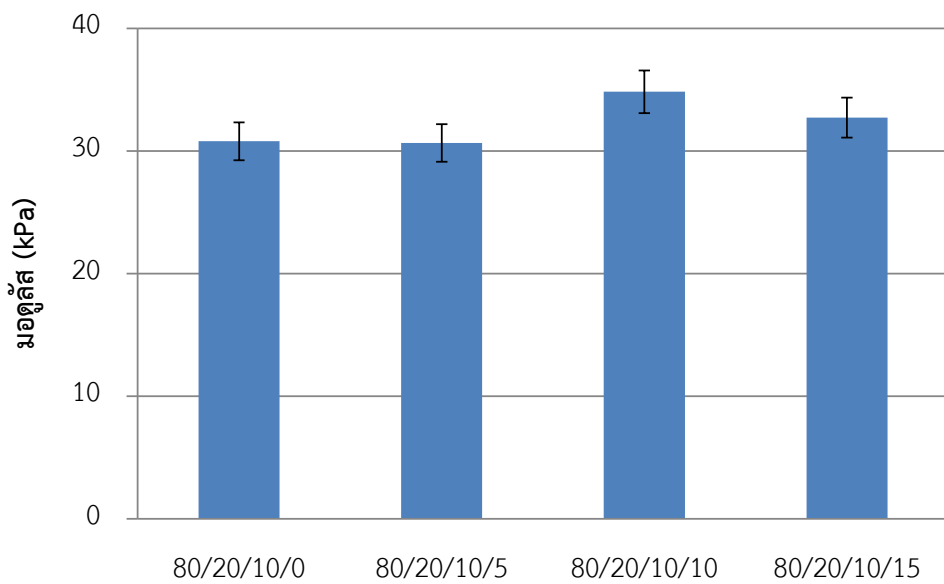
ภาพประกอบ 32 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO_3 ขนาด 1 ไมโครเมตร

พหุ มบัณฑิต ชีวะ



PLA/PBAT/Plasticizer/CaCO₃ 1 μm

ภาพประกอบ 33 เปรียบเทียบค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO₃ ขนาด 1 ไมโครเมตร



PLA/PBAT/Plasticizer/CaCO₃ 1 μm

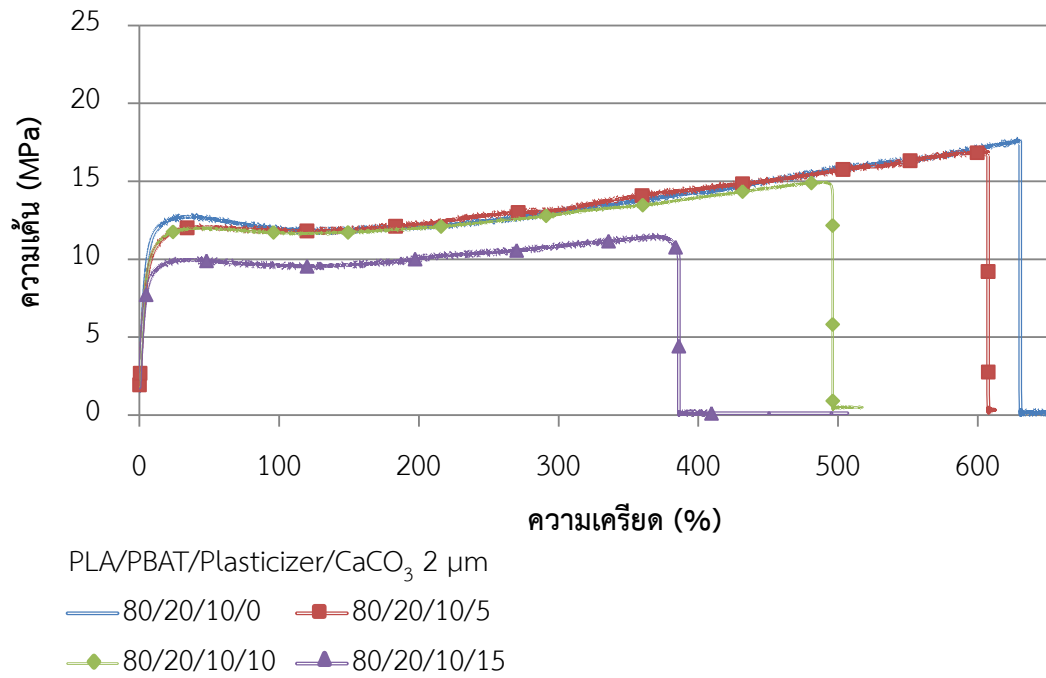
ภาพประกอบ 34 เปรียบเทียบค่ามอดูลัสของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO₃ ขนาด 1 ไมโครเมตร

3. फिल्म PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่ทำการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร

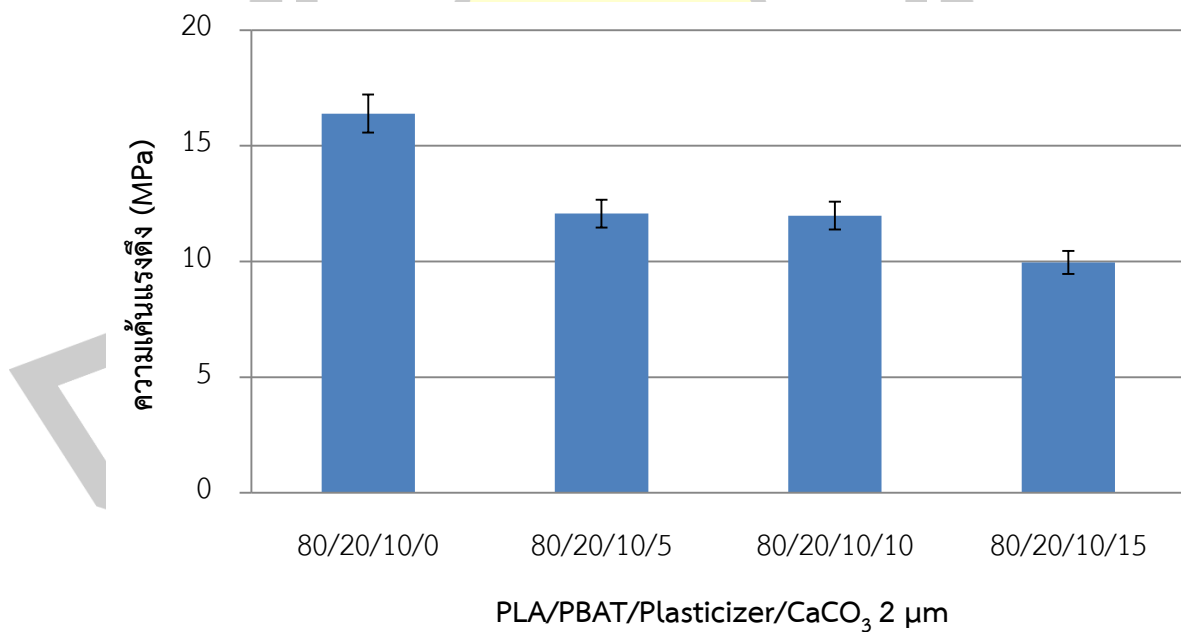
จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางกล ดังตาราง 16 และภาพประกอบ 35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร พบว่า ความเค้นแรงดึงของชิ้นงานที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ 16.39 MPa และชิ้นงานที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต 5 10 และ 15 phr มีค่าความเค้นแรงดึงเท่ากับ 12.07 11.98 และ 9.96 MPa ตามลำดับ ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด พบว่า ในชิ้นงานที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ 648 เปอร์เซ็นต์ ชิ้นงานที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต 5 10 และ 15 phr มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ 607 489 และ 371 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสรุปได้ว่าความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงดังภาพประกอบ 36 และ 37 ค่ามอดูลัสของชิ้นงานที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตเท่ากับ 30.79 kPa เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 5 10 และ 15 phr มอดูลัสมีค่าเท่ากับ 27.79 30.54 และ 30.83 kPa ตามลำดับ จากการพิจารณาค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ดังภาพประกอบ 38 เช่นเดียวกับผลการทดสอบสมบัติทางกลของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร และ 1 ไมโครเมตร

ตาราง 16 สมบัติทางกลของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO₃ ขนาด 2 ไมโครเมตร

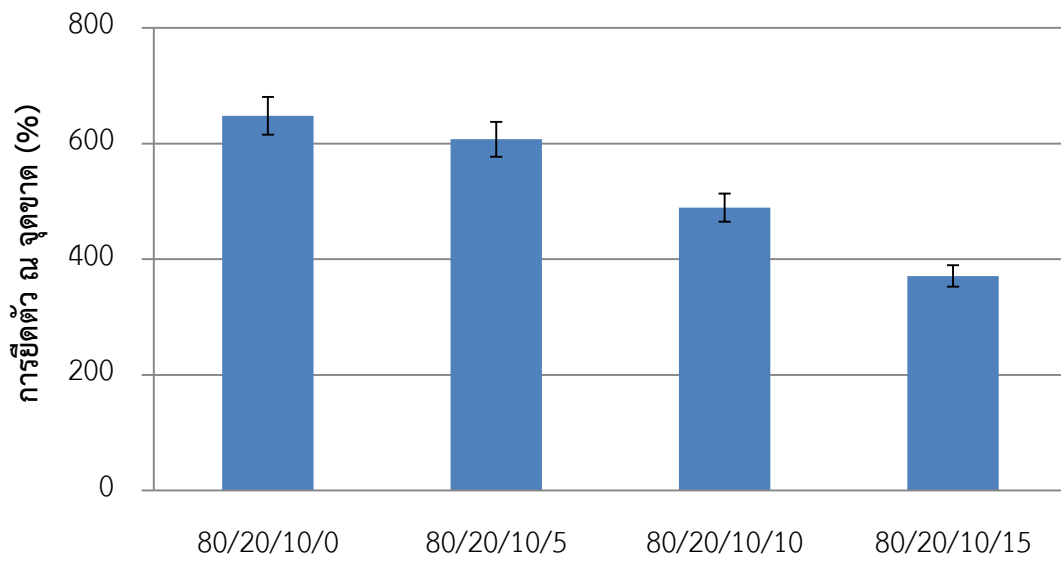
ตัวอย่าง PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์/CaCO ₃ 2 μm	ความเค้นแรงดึง (MPa)	มอดูลัส (kPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)
80/20/10/0	16.39	30.79	648
80/20/10/5	12.07	27.79	607
80/20/10/10	11.98	30.54	489
80/20/10/15	9.96	30.83	371



ภาพประกอบ 35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO₃ ขนาด 2 ไมโครเมตร

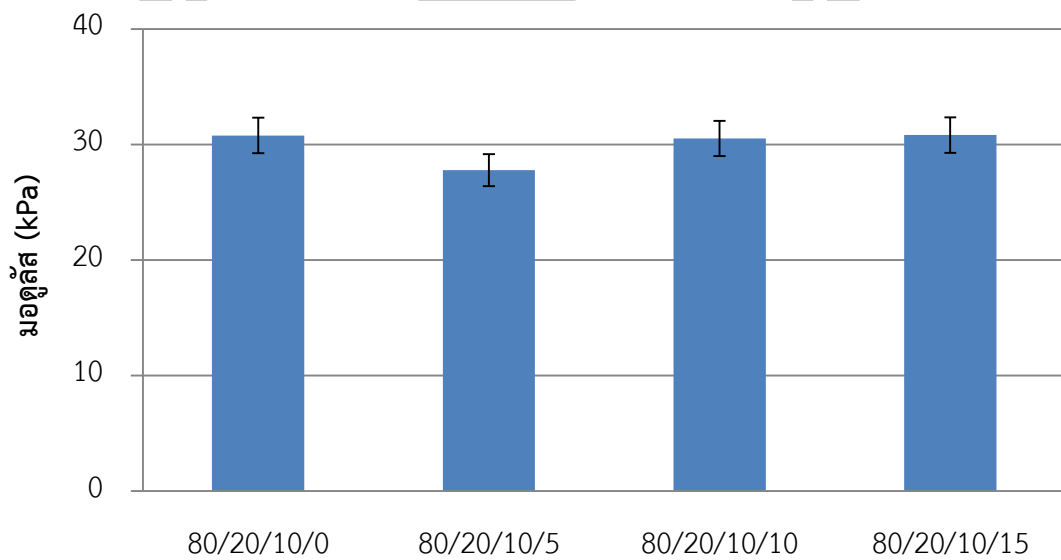


ภาพประกอบ 36 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO₃ ขนาด 2 ไมโครเมตร



PLA/PBAT/Plasticizer/CaCO₃ 2 μm

ภาพประกอบ 37 เปรียบเทียบค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO₃ ขนาด 2 ไมโครเมตร



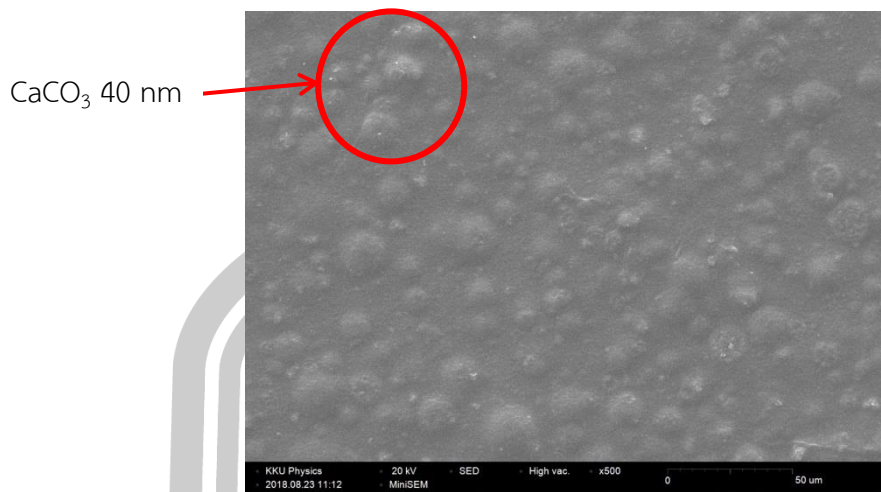
PLA/PBAT/Plasticizer/CaCO₃ 2 μm

ภาพประกอบ 38 เปรียบเทียบค่ามอดูลัสของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติม CaCO₃ ขนาด 2 ไมโครเมตร

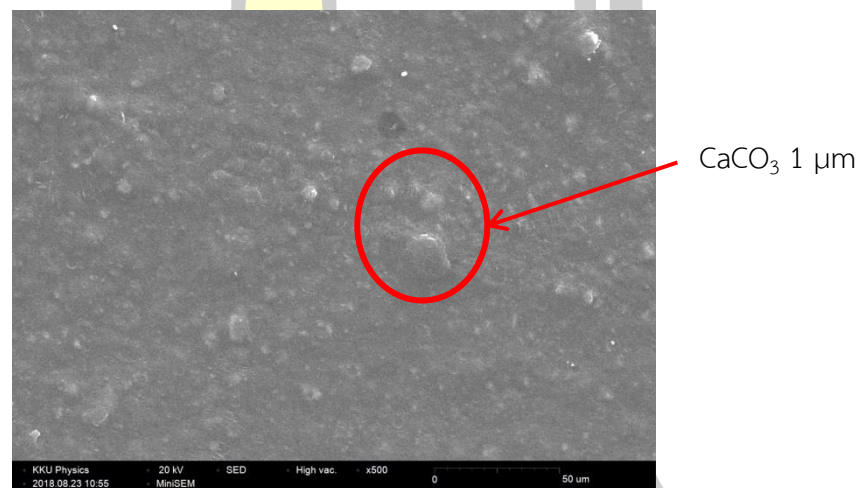
ดังนั้นจากผลการทดสอบสมบัติทางกลของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซอร์ ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตทั้ง 3 ขนาด สามารถอภิปรายผลโดยรวมได้ว่า การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ค่าความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเข้าไปขัดขวางการเชื่อมต่อกันของโมเลกุลภายในโครงสร้าง แต่ด้วยการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ จึงทำให้เมื่อเติมในปริมาณที่ 5 phr ค่าความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตทั้ง 3 ขนาด ที่ปริมาณการเติม 15 phr พบว่า แคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร มีค่าความเค้นแรงดึงเท่ากับ 14.62 MPa และการยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ 390 เปอร์เซ็นต์ แคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 1 ไมโครเมตร มีค่าความเค้นแรงดึงเท่ากับ 10.28 MPa และการยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ 375 เปอร์เซ็นต์ และแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร มีค่าความเค้นแรงดึงเท่ากับ 9.96 MPa และการยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ 371 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบสมบัติทางกลจึงสามารถบอกได้ว่า การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร ที่ปริมาณการเติม 15 phr ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าความเค้นแรงดึงลดลงน้อยที่สุดเช่นเดียวกัน ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร ที่ปริมาณการเติม 15 phr ค่าความเค้นแรงดึงลดลงมากที่สุด เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดใหญ่จึงเข้าไปขัดขวางสายโซ่ภายในโครงสร้างโมเลกุลไม่ให้เชื่อมต่อกันและเกิดช่องว่างระหว่างสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่จึงทำให้ทนแรงดึงได้น้อย [18,26,35]

4.2.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ผลจากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่ปริมาณเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 10 phr พบว่า พื้นผิวของฟิล์มพลาสติกที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร ดังภาพประกอบ 39 มีความขรุขระเล็กน้อย ลักษณะเป็นเม็ดกลมๆ กระจายทั่วพื้นผิวของฟิล์มเป็นผลมาจากการเกาะตัวกันเป็นก้อนของแคลเซียมคาร์บอเนต แต่ไม่พบรอยฉีกขาดบนพื้นผิว อาจเป็นผลมาจากเนื้อของ PLA และ PBAT ที่ห่อหุ้มไว้ พื้นผิวของฟิล์มพลาสติกที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 1 ไมโครเมตร ดังภาพประกอบ 40 พื้นผิวมีความขรุขระ เกิดการฉีกขาดบนพื้นผิวเล็กน้อย มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นผิว และพื้นผิวของฟิล์มพลาสติกที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร ดังภาพประกอบ 41 พื้นผิวมีความขรุขระและเกิดการฉีกขาด เนื่องจากขนาดโมเลกุลที่ใหญ่เกินไปทำให้เนื้อของ PLA และ PBAT ไม่สามารถห่อหุ้มไว้ได้ แต่ยังมีกระจายตัวที่สม่ำเสมอทั่วพื้นผิวของฟิล์ม ดังนั้นจากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาสามารถบอกได้ว่า การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตรดีที่สุด เพราะทำให้พื้นผิวของฟิล์มมีความเรียบที่สุดและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว

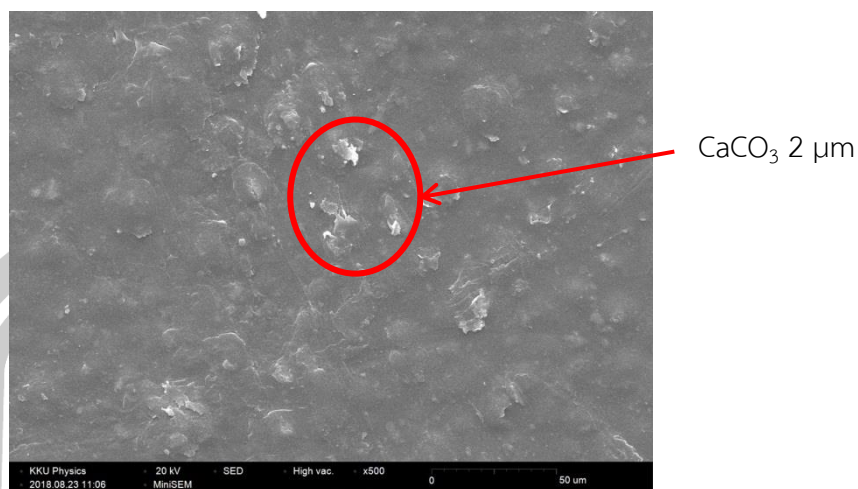


ภาพประกอบ 39 SEM surface images PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์/CaCO₃: 80/20/10/10 ที่
การเติม CaCO₃ ขนาด 40 นาโนเมตร



ภาพประกอบ 40 SEM surface images PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์/CaCO₃: 80/20/10/10 ที่
การเติม CaCO₃ ขนาด 1 ไมโครเมตร

พหุ ประถม ชาติ ชีวะ



ภาพประกอบ 41 SEM surface images PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์/ CaCO_3 : 80/20/10/10 ที่
การเติม CaCO_3 ขนาด 2 ไมโครเมตร

4.2.3 อัตราการไหลของพลาสติก

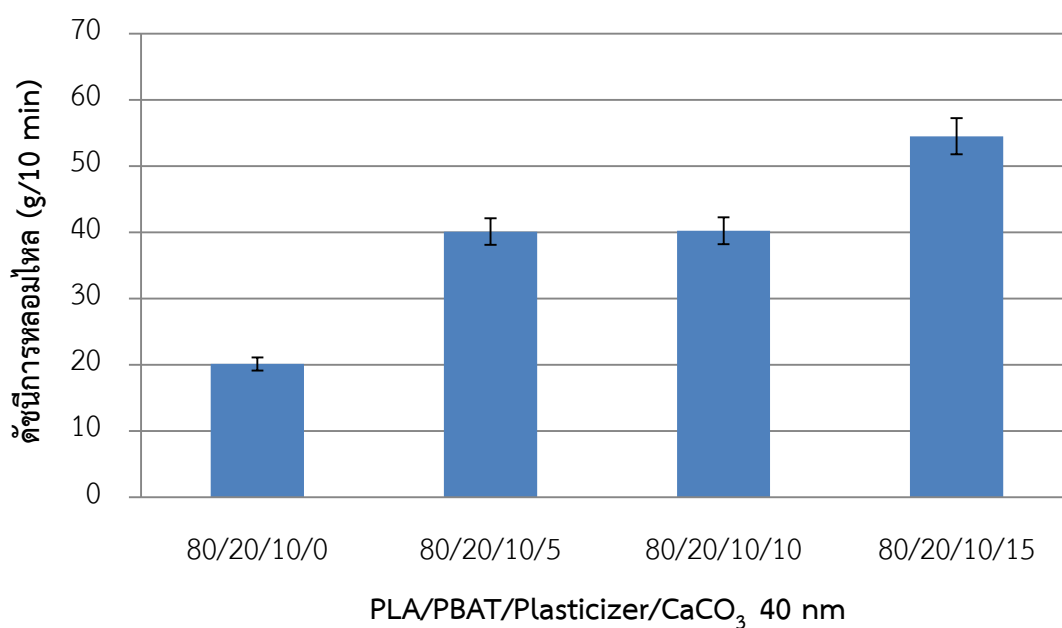
การทดสอบอัตราการไหลของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร 1 ไมโครเมตร และ 2 ไมโครเมตร สามารถอธิบายผลการทดสอบได้ดังนี้ อัตราการไหลของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต มีค่าเท่ากับ 20.11 กรัมต่อ 10 นาที เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร ดังตาราง 17 ที่ปริมาณการเติม 5 10 และ 15 phr มีค่าอัตราการไหลเท่ากับ 40.11 40.23 และ 54.50 กรัมต่อ 10 นาที ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตอัตราการไหลจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม ดังภาพประกอบ 42 และ 43 เช่นเดียวกับอัตราการไหลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 1 ไมโครเมตร ดังตาราง 18 ที่ปริมาณการเติม 5 10 และ 15 phr มีค่าเท่ากับ 32.57 47.77 และ 60.85 กรัมต่อ 10 นาที ตามลำดับ และอัตราการไหลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร ดังตาราง 19 ที่ปริมาณการเติม 5 phr ค่าอัตราการไหลเพิ่มขึ้นเท่ากับ 31.07 กรัมต่อ 10 นาที และเมื่อเติมที่ปริมาณ 10 และ 15 phr ค่าอัตราการไหลมีแนวโน้มลดลงเหลือ 30.23 และ 27.56 กรัมต่อ 10 นาที ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 44 แต่อย่างไรก็ตามค่าอัตราการไหลยังสูงกว่าอัตราการไหลของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต

ดังนั้นจากการทดสอบอัตราการไหลแสดงให้เห็นว่า การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้อัตราการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากในการทดสอบใช้อุณหภูมิในการหลอม 210 องศาเซลเซียส น้อยกว่าจุดหลอมเหลวของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้อุณหภูมิถึง 825 องศาเซลเซียส ทำให้แคลเซียม

คาร์บอนเนตไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับพลาสติกและพลาสติกไซเซออร์ แต่จะแทรกตัวอยู่ในเนื้อของพลาสติกแทน [5,36] จึงสันนิษฐานได้ว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งอัตราการไหลของพลาสติก

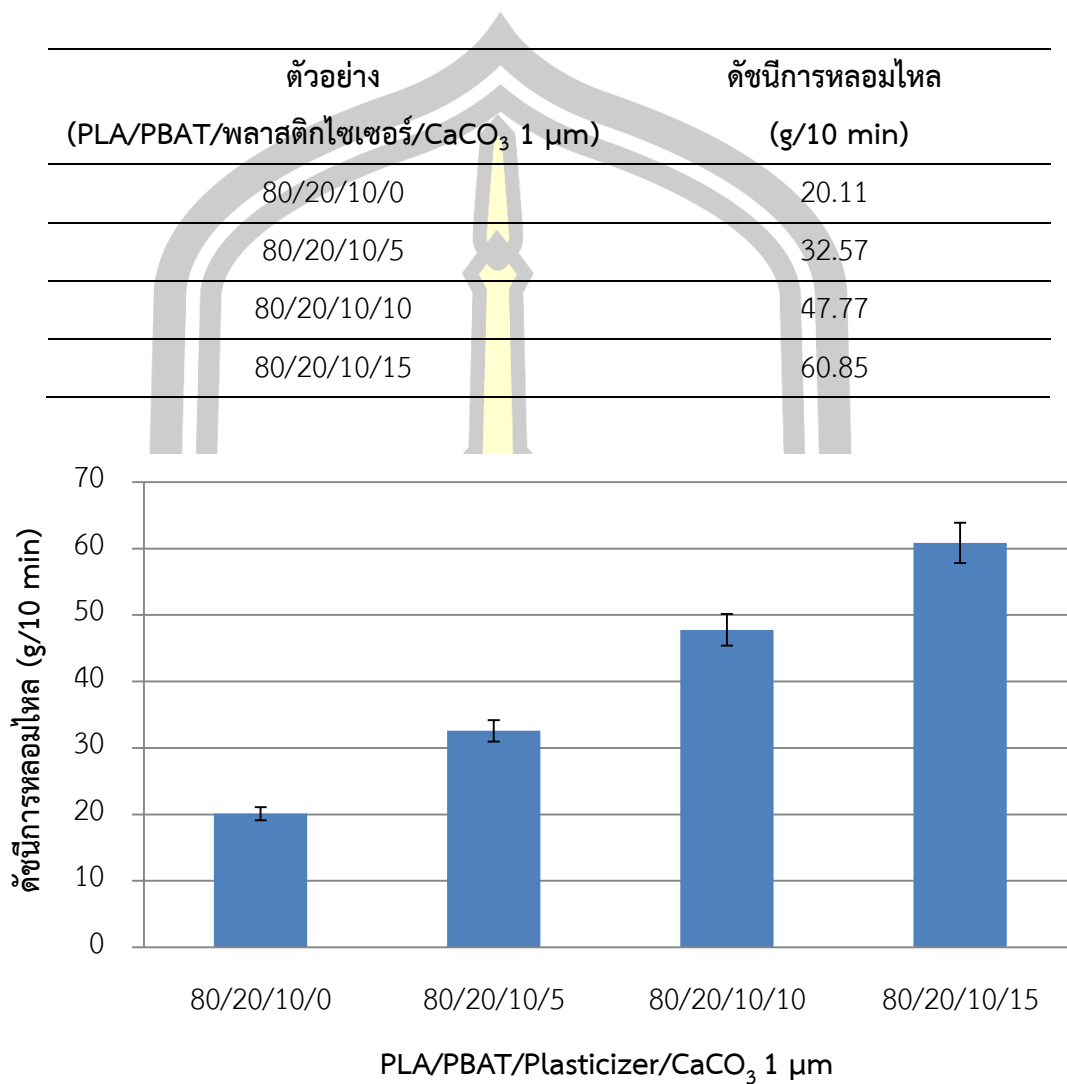
ตาราง 17 ค่าอัตราการไหล (melt flow index, MFI) ของการเติม CaCO_3 ขนาด 40 นาโนเมตร

ตัวอย่าง (PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์/ CaCO_3 40 nm)	ดัชนีการหลอมไหล (g/10 min)
80/20/10/0	20.11
80/20/10/5	40.11
80/20/10/10	40.23
80/20/10/15	54.50



ภาพประกอบ 42 เปรียบเทียบค่าอัตราการหลอมไหลของฟิล์มที่ไม่เติม CaCO_3 และเติม CaCO_3 ขนาด 40 นาโนเมตร ที่ปริมาณ 5 10 และ 15 phr

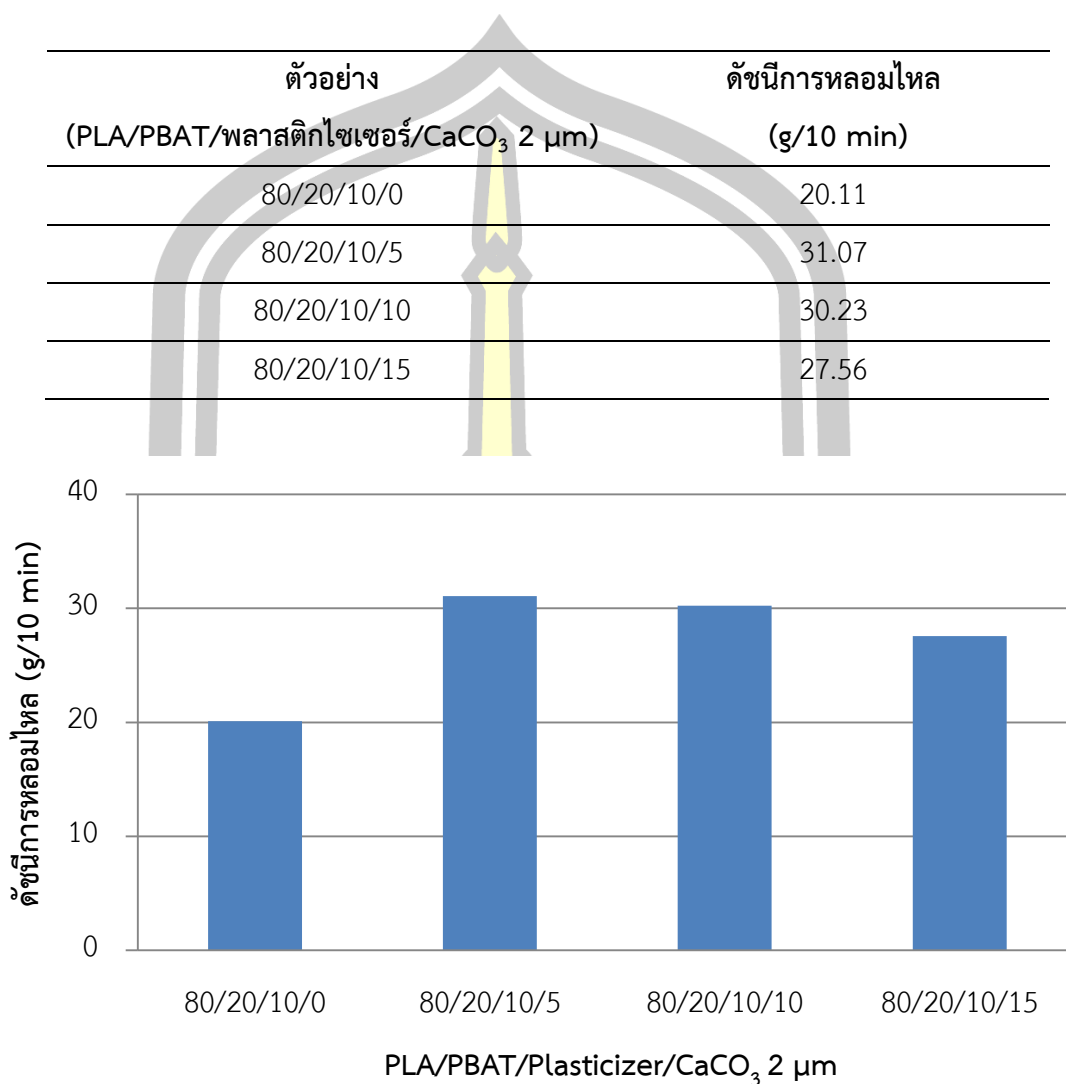
ตาราง 18 ค่าอัตราการไหล (melt flow index, MFI) ของการเติม CaCO_3 ขนาด 1 ไมโครเมตร



ภาพประกอบ 43 เปรียบเทียบค่าอัตราการหลอมไหลของฟิล์มที่ไม่เติม CaCO_3 และเติม CaCO_3 ขนาด 1 ไมโครเมตร ที่ปริมาณ 0 5 10 และ 15 phr

พหุบัณฑิต ชีวะ

ตาราง 19 ค่าอัตราการไหล (melt flow index, MFI) ของการเติม CaCO_3 ขนาด 2 ไมโครเมตร



ภาพประกอบ 44 เปรียบเทียบค่าอัตราการหลอมไหลของฟิล์มที่ไม่เติม CaCO_3 และเติม CaCO_3 ขนาด 2 ไมโครเมตร ที่ปริมาณ 0 5 10 และ 15 phr

4.2.4 สมบัติทางความร้อน

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตทั้ง 3 ขนาดลงในฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซอร์ สามารถแบ่งการวิเคราะห์ผลออกได้ทั้งหมด 3 หัวข้อดังต่อไปนี้

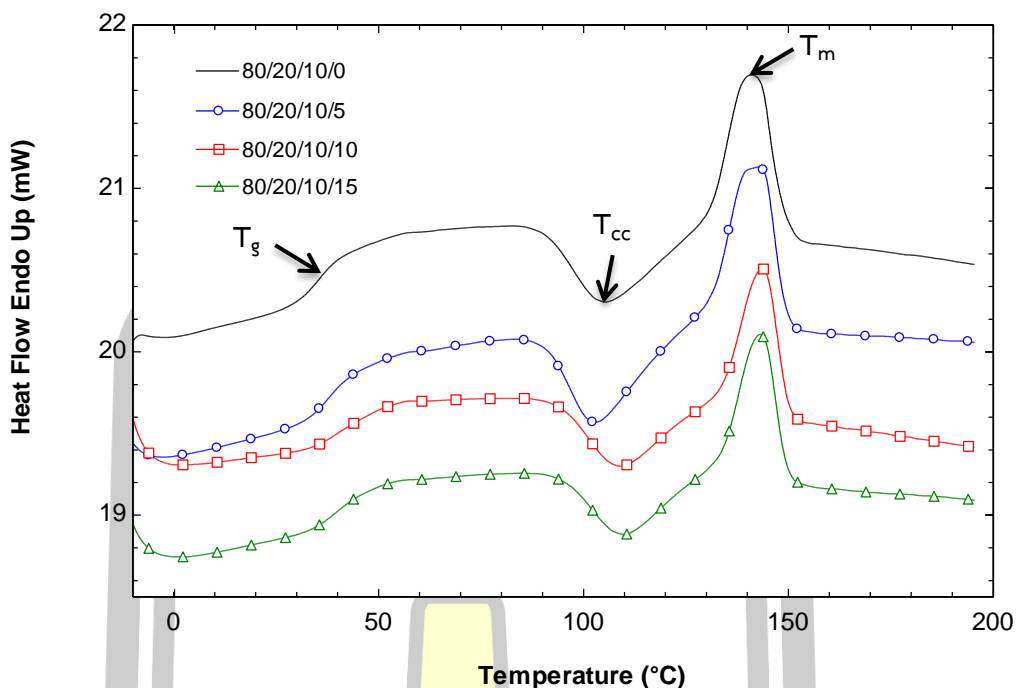
1. สมบัติทางความร้อนของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร จะได้กราฟ DSC (DSC thermograms) ดังภาพประกอบ 45 และผลจากการวิเคราะห์

กราฟ DSC ดังตาราง 20 สามารถอภิปรายผลได้ดังนี้ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ 37.20°C และเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 5 10 และ 15 phr มีค่าเท่ากับ 40.02 43.36 และ 41.37°C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_{cc}) ของฟิล์มที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ 105.20°C เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 5 phr อุณหภูมิการเกิดผลึกมีค่าลดลงเหลือ 103.04°C จากนั้นเพิ่มปริมาณการเติมที่ 10 และ 15 phr อุณหภูมิการเกิดผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 108.72 และ 109.55°C ตามลำดับ และอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ของฟิล์มที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ 141.00°C ที่การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 5 10 และ 15 phr อุณหภูมิการหลอมเหลวมีค่าเท่ากับ 143.18 143.53 และ 143.19°C ตามลำดับ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการหลอมเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อพิจารณาค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลว (ΔH_m) พบว่า ฟิล์มที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีความร้อนแฝงในการหลอมเหลวมากที่สุดคือ 21.75 J/g จากนั้นเพิ่มปริมาณการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 5 10 และ 15 phr ความร้อนแฝงในการหลอมเหลวมีค่าเท่ากับ 21.98 20.33 และ 19.14 J/g ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวลดลง

ตาราง 20 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต ขนาด 40 นาโนเมตร

ตัวอย่าง PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์/ CaCO_3 40 nm	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	การเกิดผลึก		จุดหลอมเหลว		X_c (%)
		ΔH_{cc} (J/g)	T_{cc} ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH_m (J/g)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	
80/20/10/0	37.20	-13.12	105.20	21.75	141.00	12.76
80/20/10/5	40.02	-12.09	103.04	21.98	143.18	15.29
80/20/10/10	43.36	-10.89	108.72	20.33	143.53	15.23
80/20/10/15	41.37	-9.12	109.55	19.14	143.19	16.83

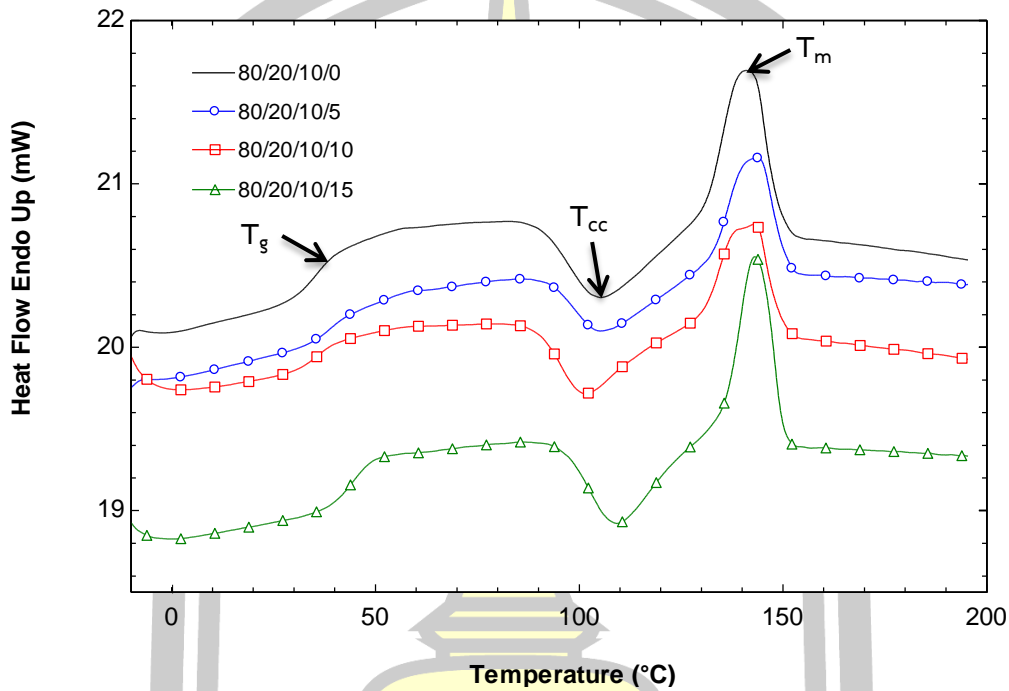


ภาพประกอบ 45 กราฟ DSC ของฟิล์มที่ไม่เติม CaCO_3 และเติม CaCO_3 ขนาด 40 นาโนเมตร ใน ปริมาณ 5 10 และ 15 phr

2. สมบัติทางความร้อนของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 1 ไมโครเมตร

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 1 ไมโครเมตร จะได้กราฟ DSC ดังภาพประกอบ 46 และผลจากการวิเคราะห์กราฟ DSC ดังตาราง 21 สามารถอภิปรายผลได้ดังนี้ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของฟิล์มที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ 37.20°C และเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 5 10 และ 15 phr มีค่าเท่ากับ 42.33 37.66 และ 43.93°C ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตไม่มีแนวโน้มไปในทิศทางใด มีความผันผวนไปมา เช่นเดียวกับ อุณหภูมิการเกิดผลึกของฟิล์มที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ 105.20°C และเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 5 10 และ 15 phr มีค่าเท่ากับ 105.03 101.38 และ 109.21°C ตามลำดับ และอุณหภูมิการหลอมเหลวของฟิล์มที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ 141.00°C และเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 5 10 และ 15 phr มีค่าเท่ากับ 143.51 142.87 และ 143.18°C ตามลำดับ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 1 ไมโครเมตรส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการหลอมเหลวเกิดความไม่เสถียร เมื่อพิจารณาที่ค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลว พบว่า ฟิล์มที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวมากที่สุดคือ 21.75 J/g จากนั้นเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 5 10

และ 15 phr ความร้อนแฝงในการหลอมเหลวมีค่าเท่ากับ 21.49 21.45 และ 20.70 J/g ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวลดลง เช่นเดียวกับกับการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร



ภาพประกอบ 46 กราฟ DSC ของฟิล์มที่ไม่เติม CaCO₃ และเติม CaCO₃ ขนาด 1 ไมโครเมตร ใน ปริมาณ 5 10 และ 15 phr

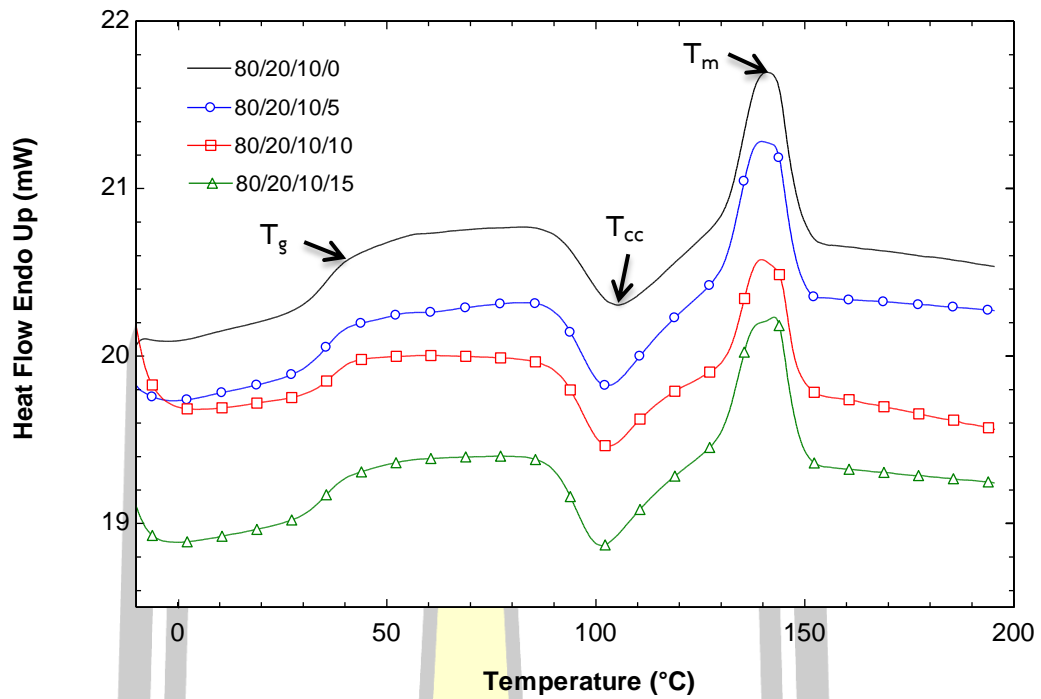
ตาราง 21 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่การเติมแคลเซียม คาร์บอเนตขนาด 1 ไมโครเมตร

ตัวอย่าง PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์/CaCO ₃ 1 μm	T _g (°C)	การเกิดผลึก		จุดหลอมเหลว		X _c (%)
		ΔH _{cc} (J/g)	T _{cc} (°C)	ΔH _m (J/g)	T _m (°C)	
80/20/10/0	37.20	-13.12	105.20	21.75	141.00	12.76
80/20/10/5	42.33	-11.50	105.03	21.49	143.51	15.44
80/20/10/10	37.66	-11.65	101.38	21.45	142.87	15.81
80/20/10/15	43.93	-11.62	109.21	20.70	143.18	15.26

3. สมบัติทางความร้อนของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร จะได้กราฟ DSC (DSC thermograms) ดังภาพประกอบ 47 และผลจากการวิเคราะห์กราฟ DSC ดังตาราง 22 สามารถอธิบายผลได้ดังนี้ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของฟิล์มที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 37.20°C เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 5 10 และ 15 phr มีค่าเท่ากับ 35.92 36.65 และ 36.69°C ตามลำดับ จะเห็นว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าลดลง อุณหภูมิการเกิดผลึกของฟิล์มที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ 105.20°C และเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 5 10 และ 15 phr มีค่าเท่ากับ 103.38 102.56 และ 101.55°C ตามลำดับ เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตอุณหภูมิการเกิดผลึกจะลดลงตามปริมาณการเติม และอุณหภูมิการหลอมเหลวของฟิล์มที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ 141.00°C และเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 5 และ 10 phr ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวลดลงเหลือ 139.85 และ 140.04°C แต่เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 15 phr อุณหภูมิการหลอมเหลวมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 142.69°C ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตรส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการหลอมเหลวมีแนวโน้มลดลง แต่ที่ปริมาณการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 15 phr อุณหภูมิการหลอมเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลว พบว่า ฟิล์มที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวมากที่สุดคือ 21.75 J/g จากนั้นเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 5 10 และ 15 phr ค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวเท่ากับ 22.43 21.32 และ 21.44 J/g ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวลดลง เช่นเดียวกันกับการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร และ 1 ไมโครเมตร

ดังนั้นจากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตทั้ง 3 ขนาด สามารถอธิบายผลได้ว่า การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิการหลอมเหลวเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ส่งผลให้ค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลว (ΔH_m) มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตได้มีการหลอมเหลวเช่นเดียวกับ PLA และ PBAT



ภาพประกอบ 47 กราฟ DSC ของฟิล์มที่ไม่เติม CaCO_3 และเติม CaCO_3 ขนาด 2 ไมโครเมตร ใน ปริมาณ 5 10 และ 15 phr

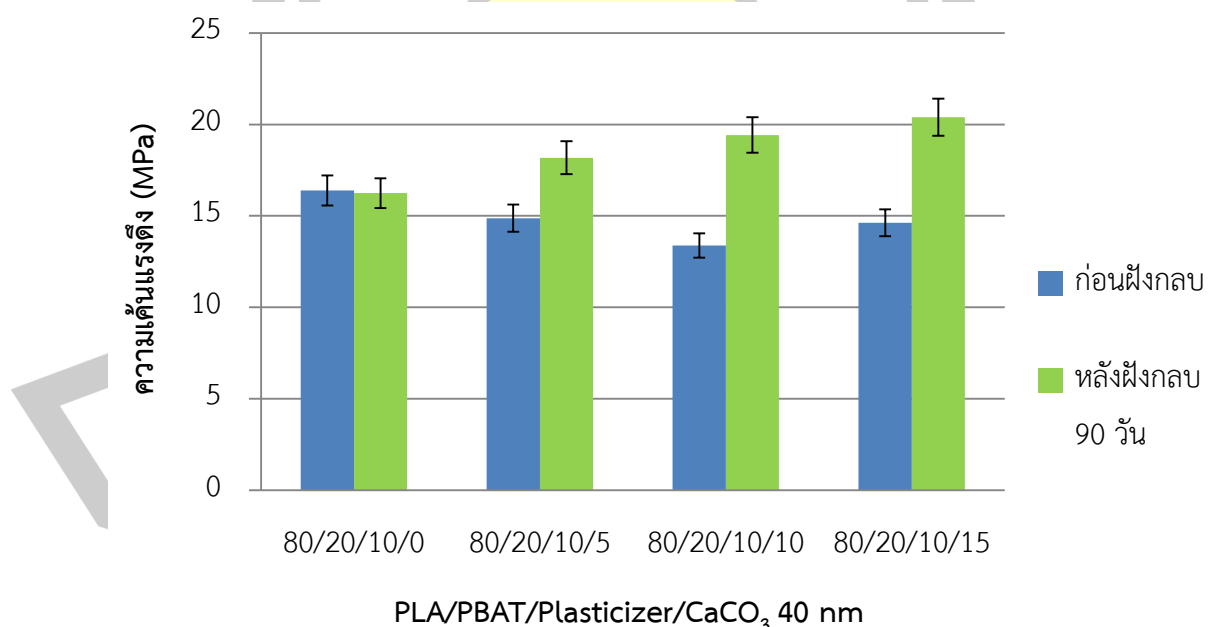
ตาราง 22 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่การเติมแคลเซียม คาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร

ตัวอย่าง PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์/ CaCO_3 2 μm	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	การเกิดผลึก		จุดหลอมเหลว		X_c (%)
		ΔH_{cc} (J/g)	T_{cc} ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH_m (J/g)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	
80/20/10/0	37.20	-13.12	105.20	21.75	141.00	12.76
80/20/10/5	35.92	-12.36	103.38	22.43	139.85	15.57
80/20/10/10	36.65	-12.74	102.56	21.32	140.04	13.84
80/20/10/15	36.69	-12.34	101.55	21.44	142.69	15.29

4.2.5 การย่อยสลายทางชีวภาพ

1. การย่อยสลายทางชีวภาพของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร

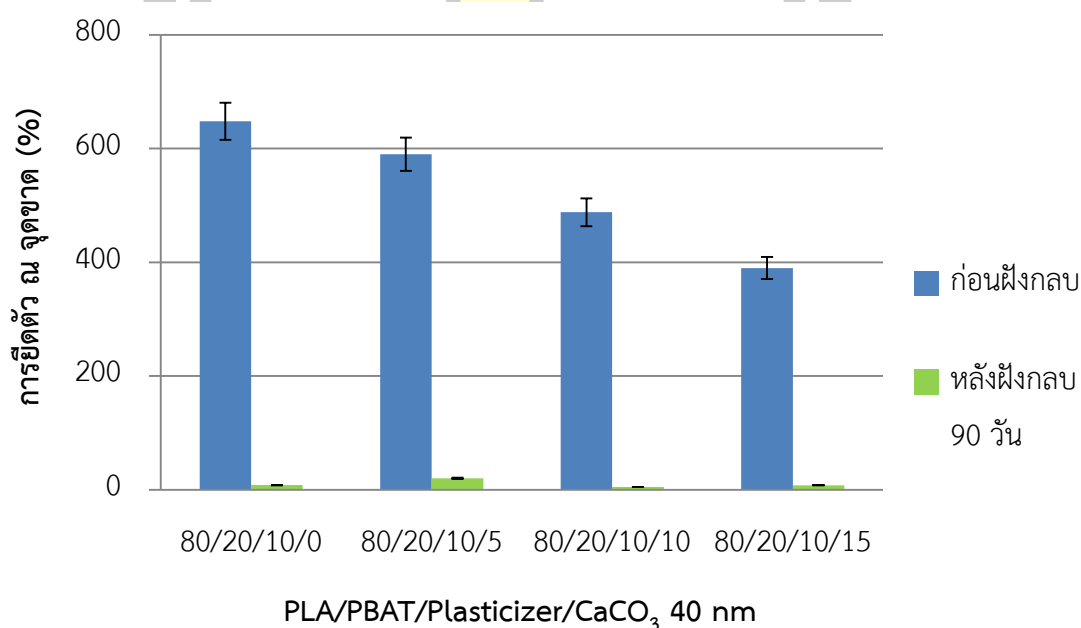
ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดของสมบัติทางกายภาพ ดังตาราง 23 พบว่า ความเค้นแรงดึงของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซอร์ ที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนการฝังกลบมีค่าเท่ากับ 16.39 MPa หลังการฝังกลบ 90 วัน ลดลงเหลือ 16.24 MPa และที่ปริมาณการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 5 10 และ 15 phr ความเค้นแรงดึงก่อนการฝังกลบมีค่าเท่ากับ 14.87 13.38 และ 14.62 MPa ตามลำดับ หลังการฝังกลบความเค้นแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 18.18 19.42 และ 20.39 MPa ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 48 เป็นแผนภูมิเปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงก่อนการฝังกลบและหลังการฝังกลบ 90 วัน พิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มที่นำไปฝังกลบเป็นเวลา 90 วัน พบว่า ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซอร์ ที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนการฝังกลบมีค่าเท่ากับ 648 เปอร์เซ็นต์ หลังการฝังกลบลดเหลือ 8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 5 10 และ 15 phr การยืดตัว ณ จุดขาดก่อนการฝังกลบมีค่าเท่ากับ 590 488 และ 390 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หลังการฝังกลบลดเหลือ 20 5 และ 8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 49



ภาพประกอบ 48 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงก่อนและหลังการฝังกลบ 90 วัน ของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร

ตาราง 23 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดก่อนและหลังการฝังกลบ 90 วัน ของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร

ตัวอย่าง (PLA/PBAT/พลาสติกไซเซอร์/CaCO ₃ 40 nm)	ความเค้นแรงดึง (MPa)		การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	
	ก่อนฝังกลบ	หลังฝังกลบ 90 วัน	ก่อนฝังกลบ	หลังฝังกลบ 90 วัน
80/20/10/0	16.39	16.24	648	8
80/20/10/5	14.87	18.18	590	20
80/20/10/10	13.38	19.42	488	5
80/20/10/15	14.62	20.39	390	8

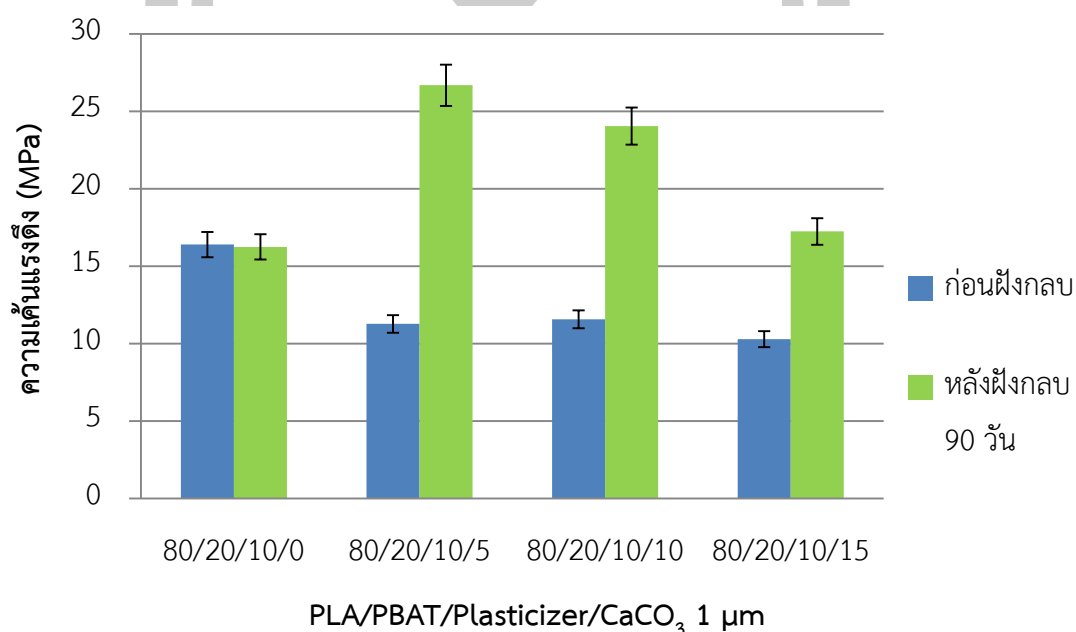


ภาพประกอบ 49 เปรียบเทียบค่าการยืดตัว ณ จุดขาดก่อนและหลังการฝังกลบ 90 วัน ของการเติม แคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร

2. การย่อยสลายทางชีวภาพของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 1 ไมโครเมตร

ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดของสมบัติทางกายภาพ ดังตาราง 24 พบว่า ความเค้นแรงดึงของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซอร์ ที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนการฝังกลบมีค่าเท่ากับ 16.39 MPa หลังการฝังกลบ 90 วันลดลงเหลือ

16.24 MPa เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตค่าความเค้นแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณการเติม 5 10 และ 15 phr ก่อนการฝังกลบความเค้นแรงดึงมีค่าเท่ากับ 11.27 11.57 และ 10.28 MPa ตามลำดับ หลังการฝังกลบความเค้นแรงดึงมีค่าเท่ากับ 26.68 24.04 และ 17.24 MPa ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 50 เป็นการเปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงก่อนการฝังกลบและหลังการฝังกลบ 90 วัน พิจารณาค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มที่นำไปฝังกลบเป็นเวลา 90 วัน พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซออร์ ที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนการฝังกลบมีค่าเท่ากับ 648 เปอร์เซ็นต์ หลังการฝังกลบลดลงเหลือ 8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 5 10 และ 15 phr ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดก่อนการฝังกลบเท่ากับ 475 425 และ 375 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หลังการฝังกลบลดลงเหลือ 27 26 และ 13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 51

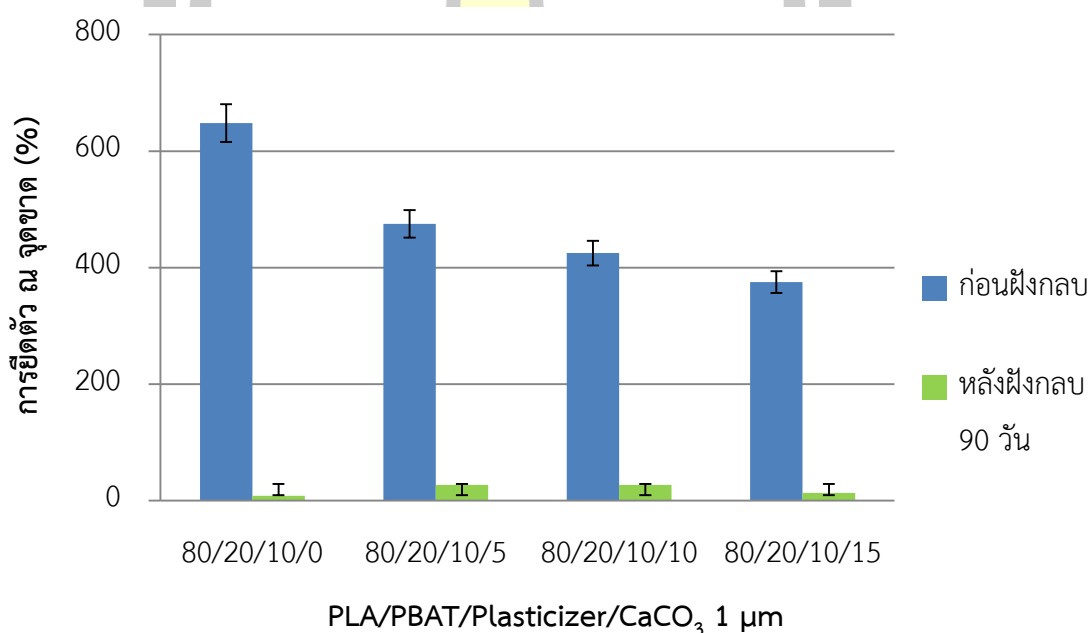


ภาพประกอบ 50 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงก่อนและหลังการฝังกลบ 90 วัน ของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 1 ไมโครเมตร

พหุ ประถมศึกษา

ตาราง 24 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดก่อนและหลังการฝังกลบ 90 วัน ของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 1 ไมโครเมตร

ตัวอย่าง (PLA/PBAT/พลาสติกไซเซอร์/CaCO ₃ 1 μ m)	ความเค้นแรงดึง (MPa)		การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	
	ก่อนฝังกลบ	หลังฝังกลบ 90 วัน	ก่อนฝังกลบ	หลังฝังกลบ 90 วัน
80/20/10/0	16.39	16.24	648	8
80/20/10/5	11.27	26.68	475	27
80/20/10/10	11.57	24.04	425	26
80/20/10/15	10.28	17.24	375	13

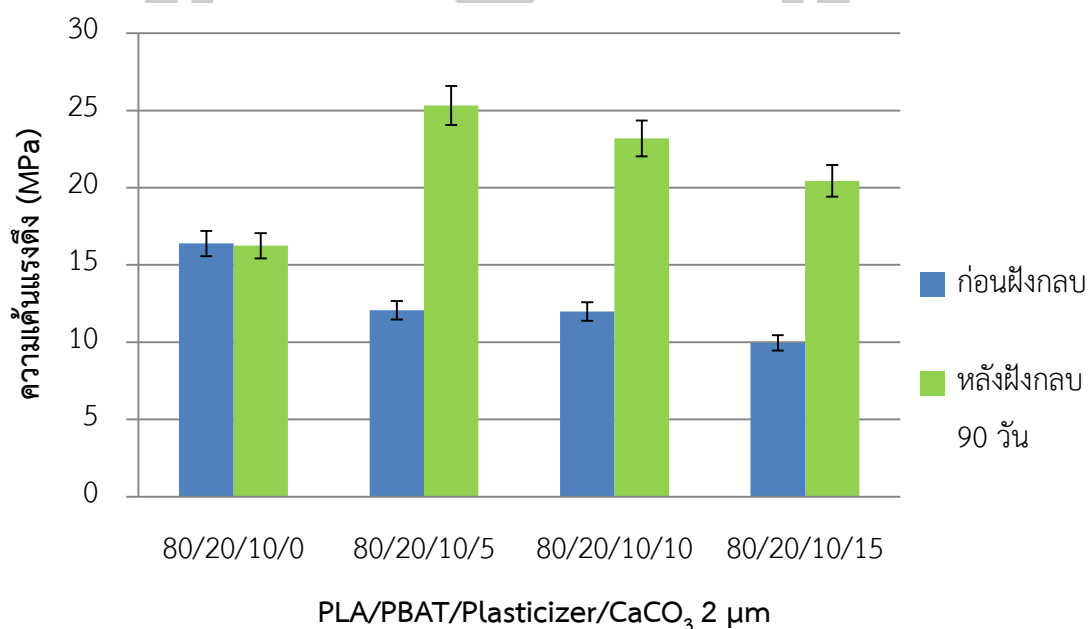


ภาพประกอบ 51 เปรียบเทียบค่าการยืดตัว ณ จุดขาดก่อนและหลังการฝังกลบ 90 วัน ของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 1 ไมโครเมตร

3. การย่อยสลายทางชีวภาพของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร

ผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้นแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดของสมบัติทางกายภาพ ดังตาราง 25 พบว่า ความเค้นแรงดึงของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซอร์ ที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนการฝังกลบมีค่าเท่ากับ 16.39 MPa หลังการฝังกลบ 90 วันลดลงเหลือ

16.24 MPa เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตความเค้นแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณการเติม 5 10 และ 15 phr ก่อนการฝังกลบความเค้นแรงดึงมีค่าเท่ากับ 12.07 11.98 และ 9.96 MPa ตามลำดับ หลังการฝังกลบความเค้นแรงดึงมีค่าเท่ากับ 25.32 23.19 และ 20.44 MPa ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 52 เป็นการเปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงก่อนการฝังกลบและหลังการฝังกลบ 90 วัน พิจารณาค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มที่นำไปฝังกลบเป็นเวลา 90 วัน พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์ม PLA/PBAT/พลาสติกไซเซอร์ ที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตก่อนการฝังกลบมีค่าเท่ากับ 648 เปอร์เซ็นต์ หลังการฝังกลบลดลงเหลือ 8 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 5 10 และ 15 phr ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดก่อนการฝังกลบเท่ากับ 607 489 และ 371 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ หลังการฝังกลบลดลงเหลือ 37 45 และ 29 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 53

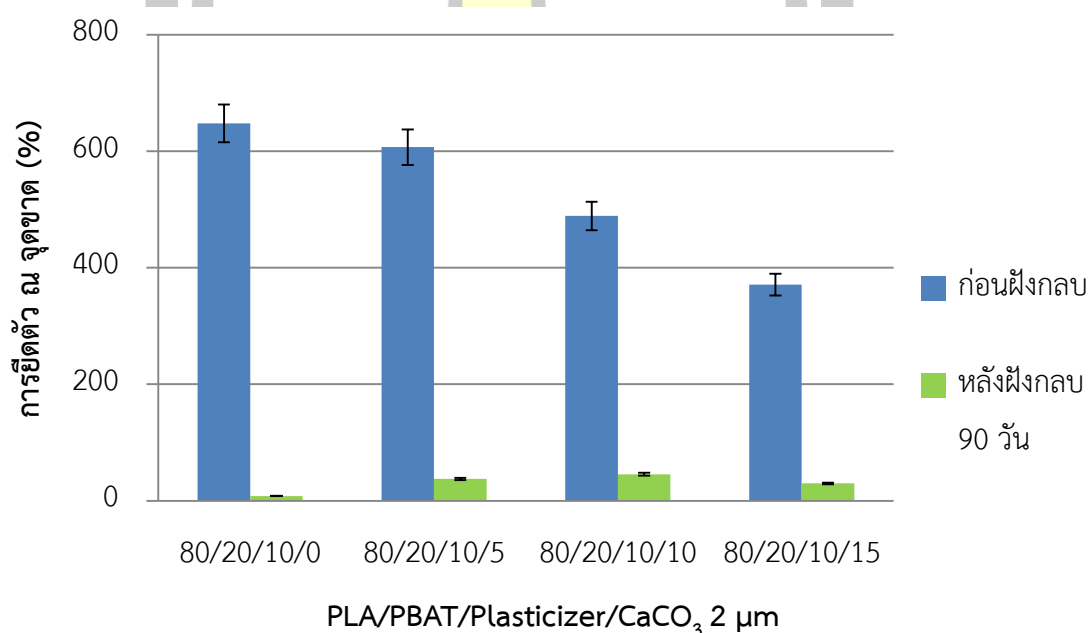


ภาพประกอบ 52 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึงก่อนและหลังการฝังกลบ 90 วัน ของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร

พหุบัณฑิต ชีวะ

ตาราง 25 เปรียบเทียบค่าความเค้นแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดก่อนและหลังการฝังกลบ 90 วัน ของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร

ตัวอย่าง (PLA/PBAT/พลาสติกไซเซอร์/CaCO ₃ 2 μ m)	ความเค้นแรงดึง (MPa)		การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	
	ก่อนฝังกลบ	หลังฝังกลบ 90 วัน	ก่อนฝังกลบ	หลังฝังกลบ 90 วัน
80/20/10/0	16.39	16.24	648	8
80/20/10/5	12.07	25.32	607	37
80/20/10/10	11.98	23.19	489	45
80/20/10/15	9.96	20.44	371	29



ภาพประกอบ 53 เปรียบเทียบค่าการยืดตัว ณ จุดขาดก่อนและหลังการฝังกลบ 90 วัน ของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 2 ไมโครเมตร

ดังนั้นจากการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยวัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของค่าความเค้นแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาด สามารถอภิปรายผลได้ว่า หลังการฝังกลบในดินเป็นระยะเวลา 90 วัน ค่าความเค้นแรงดึงของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตทั้ง 3 ขนาด มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เป็นผลมาจากผลึกภายใน

โครงสร้างมีการขยับและเรียงตัวกันเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งและเปราะ ซึ่งสันนิษฐานว่า หากทำการฝังกลบในดินมากกว่า 90 วัน ฟิล์มจะมีความแข็งและเปราะมากขึ้น เมื่อถึงเวลาที่เหมาะสมฟิล์มจะเกิดการแตกหักและสลายตัวกลายเป็นธาตุพื้นฐานในที่สุด โดยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นหรือปริมาณน้ำในดิน ปริมาณธาตุอาหารในดินที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์ เป็นต้น [37] เมื่อพิจารณาที่ขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตจะเห็นว่า แคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 นาโนเมตร มีค่าความเค้นแรงดึง และการยึดตัว จุดขาดลดลงมากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลต่ออัตราการย่อยสลาย เพราะแคลเซียมคาร์บอเนตขนาดเล็กจะทำให้จุลินทรีย์เข้าไปแทรกตัวในโมเลกุลและย่อยสลายภายในโครงสร้างได้ง่ายขึ้น



บทที่ 5

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 ผลของการเติมพลาสติกไซเซออร์

เมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ในฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (PLA/PBAT) ส่งผลให้ฟิล์มมีความเหนียวและความยืดหยุ่นมากขึ้น ซึ่งจากผลการทดสอบสมบัติทางกลจะเห็นว่าที่ PLA/PBAT: 80/20 เปอร์เซ็นต์ ความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเท่ากับ 14.37 MPa และ 587.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ 10 phr ค่าความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 16.39 MPa และ 648.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อัตราการไหลเป็นตัวบ่งชี้สมบัติของพลาสติกในการนำไปใช้งาน การเติมพลาสติกไซเซออร์ส่งผลให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้น เนื่องจากพลาสติกไซเซออร์ที่เข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของพลาสติกทั้งสองชนิด ทำให้โมเลกุลขยับตัวได้ง่ายขึ้น ผลการทดสอบสมบัติทางร้อนของฟิล์ม PLA/PBAT ที่เติมพลาสติกไซเซออร์ทำให้ทราบว่าการเติมพลาสติกไซเซออร์ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ลดลงเนื่องจากโมเลกุลของพลาสติกไซเซออร์ไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดและเข้าไปเพิ่มที่ว่างระหว่างสายโซ่โมเลกุล ลักษณะทางสัญญาณวิทยาสามารถบอกถึงความเข้ากันได้ดีของฟิล์มเมื่อเติมพลาสติกไซเซออร์ เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของฟิล์มมีความเรียบขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณการเติมพลาสติกไซเซออร์ อย่างไรก็ตามพลาสติกไซเซออร์ไม่ส่งผลต่อร้อยละการส่องผ่านของแสงในการทดสอบสมบัติทางแสง และจากการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพหลังฝังกลบในดิน 90 วัน พบว่าฟิล์มมีการย่อยสลายทางชีวภาพ เนื่องจากค่าความเค้นแรงดึงเพิ่มขึ้น การยืดตัว ณ จุดขาดลดลงแสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่ความเหนียวลดลง เมื่อพิจารณาผลการศึกษากการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักโมเลกุล พบว่า น้ำหนักโมเลกุลลดลง เกิดจากการแตกหักของพันธะภายในสายโซ่โมเลกุล ทำให้สายโซ่โมเลกุลสั้นลง และอาจเกิดการเรียงตัวใหม่ของผลึกภายในโครงสร้างจึงส่งผลให้ค่าความเค้นแรงดึงเพิ่มขึ้น สันนิษฐานว่าหากฝังกลบฟิล์มในดินเกิน 90 วันฟิล์มจะเกิดการแตกหักและย่อยสลายไปเป็นธาตุพื้นฐานต่างๆ ในที่สุด

5.1.2 ผลของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต

จากการทดสอบสมบัติทางกลของการเติมพลาสติกไซเซออร์ที่ 10 phr ได้ค่าความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดดีที่สุด จึงได้นำอัตราส่วนนี้มาทำการศึกษาลดต้นทุนโดยการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งจะทำให้การศึกษาการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตทั้งหมด 3 ขนาดคือ ขนาด 40 นาโนเมตร 1 ไมโครเมตร และ 2 ไมโครเมตร ที่ปริมาณการเติม 5 10 และ 15 phr สามารถสรุปผลที่ได้จากการทดสอบดังนี้ สมบัติทางกล พบว่า การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ค่าความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง ซึ่งความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ 16.39 MPa และ 648 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 nm ที่ปริมาณการเติม 15 phr ลดลงเหลือ 14.62 MPa และ 390 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาจะเห็นว่าพื้นผิวของฟิล์มเมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 nm มีความเรียบที่สุดและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตยังส่งผลให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้น จะเห็นว่าฟิล์มที่ไม่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตมีอัตราการไหลเท่ากับ 20.11 g/10 min และที่ปริมาณการเติม 15 phr อัตราการไหลของแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 40 nm 1 μm และ 2 μm มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 54.50 60.85 และ 27.56 g/10 min ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบน้อยกว่าจุดหลอมเหลวของแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้อนุภาคเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลแทนที่จะละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับพลาสติกและพลาสติกไซเซออร์จึงสันนิษฐานได้ว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งอัตราการไหลของพลาสติก ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่า การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลว (ΔH_m) มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเติม เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ได้ถูกหลอมเหลวที่จุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ และการย่อยสลายทางชีวภาพสามารถบอกได้ว่าปริมาณการเติมและขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลต่ออัตราการย่อยสลาย เพราะแคลเซียมคาร์บอเนตขนาดเล็กจะทำให้จุลินทรีย์เข้าไปแทรกตัวในโมเลกุลและย่อยสลายได้เร็วกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตขนาดใหญ่

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบสมบัติทางกล ชิ้นงานจะต้องมีความสม่ำเสมอ มีความหนาที่เท่ากันทุกชิ้นงาน เนื่องจากส่งผลต่อค่าที่จะได้จากการทดสอบ และในการทดสอบซ้ำค่าที่ได้จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน
2. การเตรียมชิ้นงานทดสอบอัตราการไหล เนื่องจากการขึ้นรูปในงานวิจัยนี้เป็นการขึ้นรูปด้วยการนำเม็ดพลาสติกไปผสมโดยการละลายด้วยคลอโรฟอร์ม จึงจำเป็นที่จะต้องปล่อยให้คลอโรฟอร์มระเหยไปจนหมด หากคลอโรฟอร์มระเหยไม่หมดจะส่งผลให้อัตราการไหลของพลาสติกเพิ่มมากขึ้นจากค่าเดิม

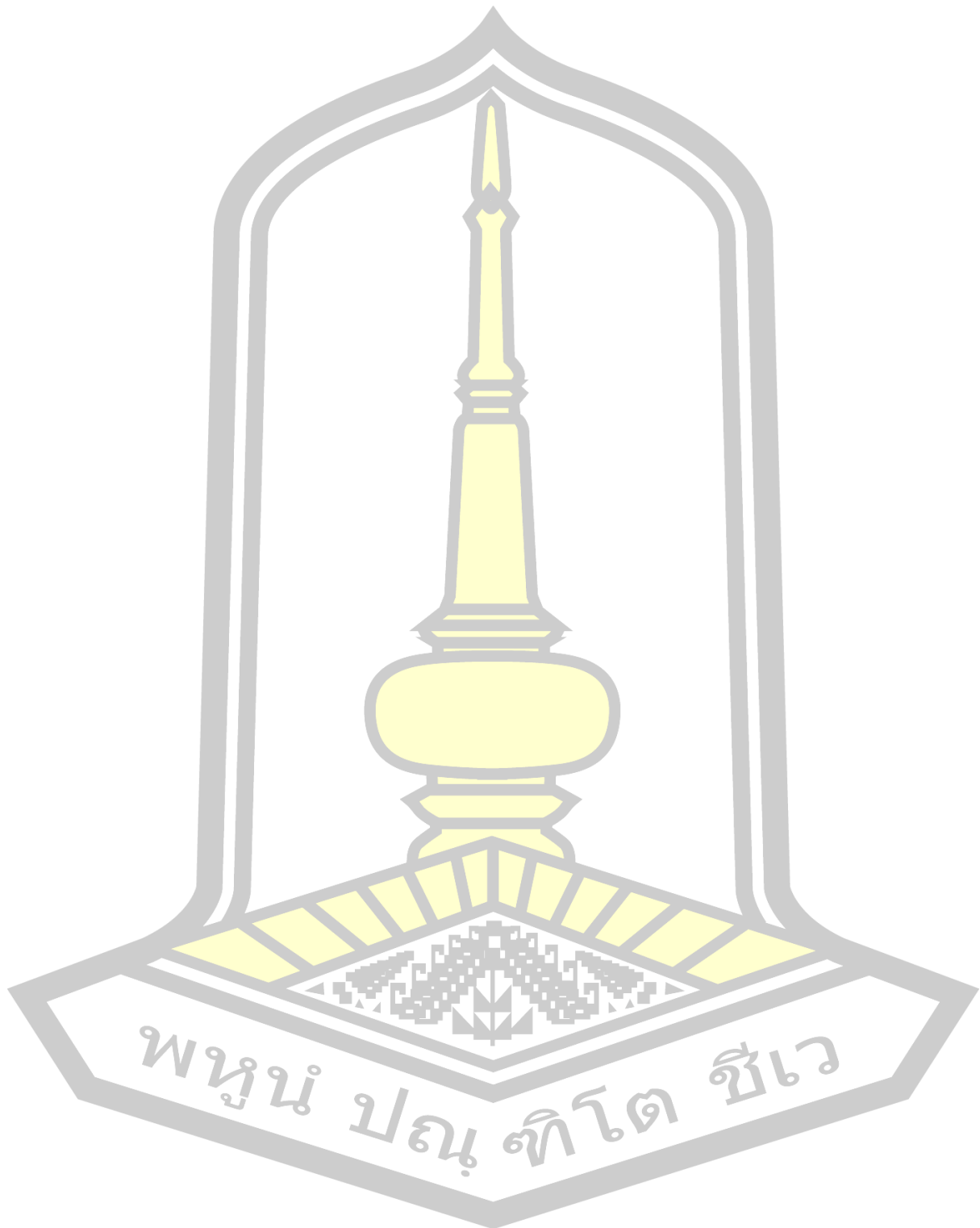
3. การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพหากต้องการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคตข้างหน้าควรอ้างอิงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ISO 17025 ซึ่งเป็นข้อกำหนดทั่วไปว่าด้วยความสามารถห้องปฏิบัติการในการดำเนินการทดสอบและ/หรือสอบเทียบ

4. จากคำแนะนำของผู้ประกอบการให้นำอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดทำเป็นเม็ดคอมปาวด์ (compound) แล้วนำไปผสมเข้ากับ PLA บริสุทธิ์ ในกระบวนการเป่าขึ้นรูปถุงพลาสติก เพื่อเพิ่มสมบัติของถุง PLA และง่ายต่อการนำไปใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม

5. การนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้ในงานเชิงอุตสาหกรรม เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นเพียงการทดลองในเชิงห้องปฏิบัติการเท่านั้น ยังมีข้อจำกัดในการศึกษากับสารเติมแต่งชนิดอื่นที่ไม่สามารถละลายได้ในคลอโรฟอร์ม

6. ถุงหิ้วที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบันผลิตจากพลาสติกชนิด โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด $1\ \mu\text{m}$ ในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์เพื่อลดต้นทุนการผลิต และมีความหนาของถุงประมาณ $3\ \mu\text{m}$ (ข้อมูลตามที่ได้จากผู้ประกอบการ) จากการนำมาทดสอบสมบัติทางกล เพื่อหาค่าความเค้นแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาด พบว่า ความเค้นแรงดึงมีค่าประมาณ 84.72 MPa และการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าประมาณ 281 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม PLA/PBAT ที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด $1\ \mu\text{m}$ ในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ และมีความหนาของฟิล์มประมาณ 0.25 mm ในงานวิจัยนี้ พบว่า ความเค้นแรงดึงมีค่าประมาณ 11.27 MPa และการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าประมาณ 475 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่าความเค้นแรงดึงของถุงหิ้ว HDPE มากกว่าฟิล์มในงานวิจัย แต่การยืดตัว ณ จุดขาดของถุงหิ้ว HDPE น้อยกว่าฟิล์มในงานวิจัย แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่ได้จากงานวิจัยยังต้องนำไปเพิ่มสมบัติการรับแรงดึงให้มากขึ้น เพื่อให้มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับถุงหิ้ว HDPE และจากกระบวนการขึ้นรูปที่ไม่เหมือนกันจึงส่งผลต่อค่าที่ได้ในการทดสอบ ดังนั้นในการนำไปพัฒนาต่อยอดควรนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูปถุงพลาสติกเช่นเดียวกับการขึ้นรูปถุงหิ้ว HDPE

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

1. ลี้จากภัยดร.ธนาวดี. พลาสติกย่อยสลายได้ เพื่อสิ่งแวดล้อม. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, editor. ศูนย์หนังสือ สวทช. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี; 2555. 1-158 p.
2. บุญโยดมวินิตา, เกิดเทพสุธินี. ผลของสารเพิ่มความเข้ากันได้เตตระบิวทิลไททานาเนตที่มีต่อความเข้ากันได้ของฟิล์มเบลนด์ของพอลิแลคติก ดิก แอซิด/พอลิ(บิวทิลีน อะดิเพท-โค-เทอเรพทาเรท) ที่สอดคล้องกับศักยภาพในการเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์. Veridian E-Journal, Sci Technol Silpakorn Univ. 2559;3(5):139–48.
3. Herrera N, Roch H, Salaberria AM, Pino-Orellana MA, Labidi J, Fernandes SCM, et al. Functionalized blown films of plasticized polylactic acid/chitin nanocomposite: Preparation and characterization. Mater Des [Internet]. 2016;92:846–52. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.083>
4. อภาเวท, ชัยพัช วงษ์อ่อน, เจษฎา ศรีสวัสดิ์, นที กาบบัวทองนรินทร. การศึกษาการปรับปรุงสมบัติความเหนียวของ PLA ด้วยการผสม PBS. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554. 2554;1419–23.
5. Al-Itry R, Lamnawar K, Maazouz A. Improvement of thermal stability, rheological and mechanical properties of PLA, PBAT and their blends by reactive extrusion with functionalized epoxy. Polym Degrad Stab [Internet]. 2012;97(10):1898–914. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.06.028>
6. เนื่องแก้วภาลัตตายุศฐา ศรีเทพ. การผลิตถุงพลาสติกชีวภาพจากพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทอเรพทาเลทและสารเพิ่มความยาวสลาย. In: การประชุมวิชาการ “มหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 13.” 2560. p. 187–96.
7. อาสาสมัครวิกิพีเดีย. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. In: วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี [Internet]. 2018. Available from: <https://th.wikipedia.org/w/index.php?title=พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ&oldid=7770348>

8. รัตน์านุกุลวิลาส. พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic). In: สาขาชีววิทยา สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี [Internet]. 2554. Available from: <http://biology.ipst.ac.th/?p=927>
9. วุฒิกนกกาญจน์รศ.ดร. จตุพร และคณะ. งานวิจัยและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพชนิด PLA. In: คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี [Internet]. 2556. p. 1–15. Available from: <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/interestingarticle.php>
10. หาญชนะอารียา. ผลของซีลีเนียมจากไม้สะเดาที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแอสซิเทตจากแป้งมันสำปะหลัง [Internet]. กรุงเทพมหานคร: วิทยานิพนธ์ (เทคโนโลยีพอลิเมอร์), สำนักหอสมุดกลาง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; 2558. Available from: http://ebook.lib.kmitl.ac.th/library/book_detail/09003383
11. ถนัดช่างแสงดร.ณัฐพล. การศึกษาความสามารถในการใช้น้ำหมักมูลแพะเพื่อการผลิตพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต. In: สถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยรังสิต [Internet]. คณะวิทยาลัยนวัตกรรมเกษตร; 2556. Available from: <http://rri.rsu.ac.th/scholarresearchinternalcompletearticle.php?status=2&lang=&id=354&year=2556>
12. คงทองวรรณนิศา. การเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปของพอลิแล็กติกแอซิดโคเอทิลีนเทเรฟทาเลตโดยการผสมด้วยพอลิเอทิลีนโคโวนิลแอซิดเตต พอลิ 3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต และพอลิบิวทิลีนซึกซิเนต. In: ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2551.
13. Chen GQ, Patel MK. Plastics derived from biological sources: Present and future: A technical and environmental review. Chem Rev. 2012;112(4):2082–99.
14. เกาประเสริฐไพระศักดิ์. พอลิเมอร์จากแหล่งชีวภาพ: การทบทวนวรรณกรรม. KKU Res J. 2013;18(3):536–47.
15. Du H, Pang X, Yu H, Zhuang X, Chen X, Cui D, et al. Polymerization of rac-Lactide Using Schiff Base Aluminum Catalysts: Structure, Activity, and Stereoselectivity. Macromolecules. 2007;40(6):1904–13.

16. Tang Z, Chen X, Pang X, Yang Y, Zhang X, Jing X. Stereoselective polymerization of rac-lactide using a monoethylaluminum Schiff base complex. *Biomacromolecules*. 2004;5(3):965–70.
17. Bonhomme S, Cuer A, Delort AM, Lemaire J, Sancelme M, Scott G. Environmental biodegradation of polyethylene. *Polym Degrad Stab*. 2003;81(3):441–52.
18. Jiang L, Zhang J, Wolcott MP. Comparison of polylactide/nano-sized calcium carbonate and polylactide/montmorillonite composites: Reinforcing effects and toughening mechanisms. *Polymer (Guildf)* [Internet]. 2007;48(26):7632–44. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2007.11.001>
19. เลิศวารสิริกุลอมรรัตน์. พอลิแลคติกแอซิด : พอลิเอสเทอร์ จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้. *วิศวกรรมสาร*. 2554;77:99–110.
20. สุนทรเต็มศศิพงษ์. การเตรียมวัสดุคอมโพสิต ความเข้ากันได้ และสมบัติของนาโนซิลเวอร์ พอลิแลคติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต. *วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร*; 2555. 1-170 p.
21. Contributors W. Polybutyrate adipate terephthalate. In: *Wikipedia. Wikipedia, The Free Encyclopedia*.; 2019. p. 1–4.
22. รายละเอียดข้อมูลพลาสติกชีวภาพประเภทพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท. In: *รายงานการศึกษาระดับสมบูรณ (Final Report)* [Internet]. *โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*; 2561. p. 1–17. Available from: asp.plastics.or.th:8001/files/article_file/20180624234830u.pdf%0A
23. Vieira MGA, Da Silva MA, Dos Santos LO, Beppu MM. Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review. *Eur Polym J* [Internet]. 2011;47(3):254–63. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2010.12.011>
24. หิรัญธนิกจากุลสุภานี. พลาสติกไซเซเซอร์. In: *ความรู้เกี่ยวกับสารพิษ และวัตถุอันตราย* [Internet]. *ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสิ่งเป็นพิษ, ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา*; 2538. Available from: http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_2_001c.asp?info_id=146

25. วรินทร์ ตรีสัตยาเวทย์. อิทธิพลของสภาวะการเกิดโพลีต่อสัณฐานวิทยาของพอลิไวนิลคลอไรด์โพลีโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นสารเกิดฟอง. วิทยานิพนธ์ (วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี)) สำนักหอสมุดกลาง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; 2558.
26. Nekhamanurak B, Patanathabutr P, Hongsriphan N. The influence of micro-/nano-CaCO₃ on thermal stability and melt rheology behavior of poly(lactic acid). Energy Procedia [Internet]. 2014;56:118–28. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.139>
27. Hongsriphan N, Burirat T, Niratsungnern P, Trongteng S. Influence of Calcium Carbonate Nanoparticles on Mechanical Behavior of Poly(lactic acid)/Poly(butylene succinate) Blend. J Met Mater Miner. 2013;23(1):41–7.
28. Yoon H, Hyun KB, Hoon PJ, Jin-San C. Mechanical properties and thermal stability of poly(L-lactide)/calcium carbonate composites. J Appl Polym Sci [Internet]. 2008;109(5):3087–92. Available from: <https://doi.org/10.1002/app.28229>
29. Pivsa-Art W, O-Charoen SPN, Insuan U, Jailak P, Pivsa-Art S. Preparation of Polymer Blends between Poly (L-lactic acid), Poly (butylene succinate-co-adipate) and Poly (butylene adipate-co-terephthalate) for Blow Film Industrial Application. Energy Procedia [Internet]. 2011;9:581–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.09.068>
30. Wang LF, Rhim JW, Hong SI. Preparation of poly(lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend films using a solvent casting method and their food packaging application. LWT - Food Sci Technol [Internet]. 2016;68:454–61. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2015.12.062>
31. ทะสาตลบรรดาล. UV-Vis Spectrophotometer-1800. In: ศูนย์เครื่องมือปฏิบัติการกลาง, คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์และวิศวกรรมศาสตร์ [Internet]. ศูนย์เครื่องมือปฏิบัติการกลาง คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2015. Available from: <https://sites.google.com/site/ctrlnkc/kheruxng-mux/xkhr/spectrophotometer/uv-1800>

32. มีศักดิ์สยามสรวิทย์. การทดสอบ. In: ผลกระทบของการเติมเส้นใยทะเลลายปาล์มในพอลิเมอร์ผสมพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตต่อสมบัติเชิงกล. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2559. p. 54–5.
33. ทิพย์ไกรศรอาสลิล, ศรีสืบสายวิภู. การทดลองศึกษาอัตราการไหลของพลาสติก Polycarbonate(PC)/ Acrylonitrile-Butadiene-Styrene(ABS) ที่ผสมคาร์บอนแบล็ค (Carbon Black). คลังความรู้ดิจิทัล มก. 2556;1–8.
34. รัตน์คำนวนอนุชารัตน์. ผลของพลาสติกไซเบอร์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์มเซลลูโลสเอสเทอร์จากฟางข้าวและเปลือกข้าวโพด. In สาขาวิทยาศาสตร์เคมีและเภสัช คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้; 2015. Available from: <https://programming.cpe.ku.ac.th/Agriinformatics/viewProject.php?itemID=4912>
35. Jiang L, Lam YC, Tam KC, Chua TH, Sim GW, Ang LS. Strengthening acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) with nano-sized and micron-sized calcium carbonate. Polymer (Guildf) [Internet]. 2005 Jan 6 [cited 2019 Mar 13];46(1):243–52. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386104010808>
36. เนคนานุรักษ์บวรกิตต์, ม่วงทองปิยนุช, ชูทองนุอร. ผลกระทบของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติทางความร้อนและสมบัติทางกลของวัสดุ เจิงประกอบชีวภาพพีแอลเอ/พีบีเอที่ผ่านการขึ้นรูปซ้ำ. Naresuen Univ Journal, Sci Technol. 2017;2(25):67–79.
37. บุญมีจุฑากานต์. พลาสติกชีวภาพ ทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม. In: วารสารสิ่งแวดล้อม. นิสิตปริญญาเอก สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2555. p. 15–9.

พหุ อนุ ทิโต ชเว

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวภาลัตตา เนื่องแก้ว
วันเกิด	วันที่ 24 เดือน กันยายน พ.ศ. 2536
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 27 หมู่ที่ 8 บ้านสร้างแก้ว ตำบลเชียงยืน อำเภอเชียงยืน จังหวัดมหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44160
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2551 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนเชียงยืนพิทยาคม อำเภอเชียงยืน จังหวัดมหาสารคาม พ.ศ. 2554 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเชียงยืนพิทยาคม อำเภอเชียงยืน จังหวัดมหาสารคาม พ.ศ. 2559 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2562 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ปี 2560 โดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
ผลงานวิจัย	ภาลัตตา เนื่องแก้ว และ ยศฐา ศรีเทพ. 2560. การผลิตถุงพลาสติกชีวภาพจากพอลิแลคติกแอซิดผสมพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและสารเพิ่มความยาวสายโซ่. การประชุมวิชาการ “มหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 13”. 7-8 กันยายน 2560 ณ คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. มหาสารคาม: กองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

พูนัน ปณฺ ทิโต ชีเว