

สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของ
พอลิแลกติกแอซิด/โคพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์/เบนโทไนต์ นาโนคอมพอสิต

MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF
POLY(LACTIC ACID)/COPOLYESTER ELASTOMER/BENTONITE
NANOCOMPOSITES

นฤติ พุ่มฟ้า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของ
พอลิแลกติกแอซิด/โคพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์/เบนโทไนด์
นาโนคอมพอสิต



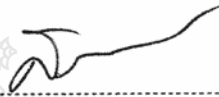
นฤดี พุดมพิง

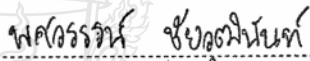
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี


หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิด/โคพอลิเอสเทอร์
 อีลาสโตเมอร์/เบนโทไนต์ นาโนคอมพอสิต
 Mechanical and Thermal Properties of Poly(Lactic Acid)/Copolyester
 Elastomer/Bentonite Nanocomposites

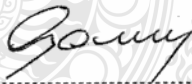
ชื่อ - นามสกุล นางสาวนฤดี พุฒพีก
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์อำนวยการ ลากเกษมสุข, ประ.ด.
ปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

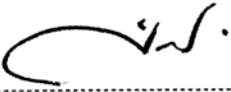

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)


..... กรรมการ
(อาจารย์พศวรรณ์ ชัยวัฒน์, วท.ด.)


..... กรรมการ
(อาจารย์อรรถพล สิมประดิษฐ์พันธ์, วศ.ด.)


..... กรรมการ
(อาจารย์อำนวยการ ลากเกษมสุข, ประ.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 9 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2563

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิด/โคพอลิเอสเทอร์ อีลาสโตเมอร์/เบนโทไนด์ นาโนคอมพอสิต
ชื่อ – นามสกุล	นางสาวนฤดี พุฒพิก
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์อำนวยการ ลากเกษมสุข, ประ.ด.
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิตจากพอลิแลกติกแอซิด (พีแอลเอ) เทอร์โมพลาสติกโคพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ (ไฮเทรล) และเบนโทไนด์โดยกระบวนการหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่และเครื่องฉีดแบบ ซึ่งงานที่เตรียมได้ถูกนำไปทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลพลวัต

ขั้นตอนแรกทำการผสมพีแอลเอกับไฮเทรลปริมาณร้อยละ 5 ถึง 30 โดยน้ำหนัก ในบรรดาพอลิเมอร์ผสมพีแอลเอ/ไฮเทรลทั้งหมด 6 อัตราส่วน พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่เติมไฮเทรลร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก แสดงความทนแรงกระแทกและการยืดตัว ณ จุดขาดสูงสุด โดยมีค่าสูงกว่าของพีแอลเอบริสุทธิ์ 3.2 และ 10.6 เท่า ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนสภาพจากวัสดุแบบเปราะเป็นอ่อนเหนียว ในขณะที่ยังสัมผัส ความทนแรงดึง และเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ผสมพีแอลเอ/ไฮเทรล อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก ได้ถูกเลือกเพื่อนำไปเตรียมเป็นนาโนคอมพอสิตโดยการเติมเบนโทไนด์ 3 ระดับ (1, 3 และ 5 ส่วนโดยน้ำหนักต่อร้อยละของพอลิเมอร์ผสม) เพื่อลดข้อบกพร่องดังกล่าว

สมบัติของนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ถูกตรวจสอบและเปรียบเทียบกับของพอลิเมอร์ผสมล้วน ซึ่งพบว่า ความทนแรงกระแทกและการยืดตัว ณ จุดขาดของนาโนคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่าของพอลิเมอร์ผสมล้วน ขณะที่สัมผัสและความทนแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกับของพอลิเมอร์ผสมล้วน อย่างไรก็ตาม การเติมเบนโทไนด์ในพอลิเมอร์ผสมพีแอลเอ/ไฮเทรลอัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้นาโนคอมพอสิตมีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

คำสำคัญ : พอลิแลกติกแอซิด ไฮเทรล เบนโทไนด์ นาโนคอมพอสิต สมบัติเชิงกล

Thesis Title Mechanical and Thermal Properties of Poly(Lactic Acid)/Copolyester Elastomer/Bentonite Nanocomposites
Name – Surname Miss Naruedee Phutfak
Program Materials Engineering
Thesis Advisor Mr. Amnouy Larpkasemsuk, Ph.D.
Academic Year 2019

ABSTRACT

In this research, polymer blends and nanocomposites based on poly(lactic acid) (PLA), thermoplastic copolyester elastomer (hytel) and bentonite (BN) were prepared by melt blending process using a co-rotating twin screw extruder and injection molding machine. The obtained samples were comparatively investigated for their mechanical, morphological, thermal and dynamic mechanical properties.

The first step was the blending of 5–30 wt% of hytel with PLA was initially prepared. Among the six of PLA/hytel blends, the one with 30 wt% of hytel showed the highest impact strength and elongation at break which were 3.2 and 10.6 fold over those of the pure PLA respectively. This indicated the sign of brittle-to-ductile transition along with the reduction of Young's modulus, tensile strength, and thermal stability. However, the 70/30 (w/w) PLA/hytel blend was subsequently chosen for preparing nanocomposites with three loading levels of BN (1, 3 and 5 parts by weight per hundred of polymer blends) to minimize these shortcomings.

The properties of the nanocomposites gained were investigated and further compared with those of the neat 70/30 (w/w) PLA/hytel blend. The impact strength and elongation at break of all the nanocomposites were lower than those of the neat blend while the Young's modulus and tensile strength was close to that of the the neat blend. However, the addition of BN in the PLA/hytel blend for 70/30 (w/w) resulted apparently in an increase of thermal stability in nanocomposites.

Keywords : polylactic acid, hytel, bentonite, nanocomposites, mechanical properties

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้อย่างสมบูรณ์ ด้วยความเมตตาอนุเคราะห์ที่อุปกรณ์เครื่องมือต่างๆและสถานที่ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งความกรุณาอย่างยิ่งจากผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางแก้ไขปัญหาให้กับผู้วิจัยตลอดมา จึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่านดังรายนามต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์อำนวยการ ลาภเกษมสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำแก้ไขและตรวจสอบข้อบกพร่องในการศึกษาค้นคว้า ตลอดทั้งคอยสนับสนุนและผลักดันผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ อาจารย์ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์วัสดุดิบเพื่อใช้ในวิทยานิพนธ์และกรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ อีกทั้งตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ไพศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เม็ดพลาสติกและเครื่องมือทดสอบจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติเป็นอย่างมาก จนทำให้การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สมบูรณ์และมีคุณค่า

ขอขอบพระคุณท่านคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาวสุปรีดิ์ และอาจารย์อรรถพล สิมประดิษฐ์พันธ์ุ ที่กรุณาให้คำแนะนำ เพื่อแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้ถูกต้องเป็นอย่างดี

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบพระคุณครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่ง อาจารย์ที่เคารพทุกท่าน เจ้าหน้าที่ปฏิบัติกรประจำภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี รวมถึงกัลยาณมิตรทุกท่านที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมา ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ หากขาดตกบกพร่องหรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นฤดี พุฒพัก

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญภาพ.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความสำคัญ และความเป็นมาของปัญหา.....	12
1.2 วัตถุประสงค์.....	13
1.3 ขอบเขตงานวิทยานิพนธ์.....	13
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic).....	16
2.2 การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ.....	17
2.3 พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA)	18
2.4 โคพอลิเอสเทอร์อิลาสโตเมอร์ (Copolyester, COPEs).....	21
2.5 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blends).....	23
2.6 เบนโทไนต์ (Bentonite)	25
2.7 พอลิเมอร์เบนโทไนต์คอมพอสิต (Polymer/Bentonite composites).....	26
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	34
3.1 แผนการดำเนินงาน.....	34
3.2 วัสดุดิบ และสารเคมี.....	35
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	37
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	39
3.5 วิธีการทดลอง.....	40
3.6 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ.....	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	51
4.1 พอลิเมอร์ผสม PLA/Hytrel.....	51
4.2 พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต PLA/Hytrel/BN.....	59
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	75
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
บรรณานุกรม.....	77
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก กราฟผลการทดสอบความทนแรงดึงด้วยเครื่องยูนิเวอร์แซล.....	84
ภาคผนวก ข DSC เทอร์โมแกรมจากการทดสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์.....	91
ภาคผนวก ค TGA เทอร์โมแกรมจากการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ ความร้อน.....	98
ภาคผนวก ง การนำเสนอผลงานทางวิชาการ.....	102
ประวัติผู้เขียน	119

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติของตัวอย่างพอลิเอสเทอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	17
ตารางที่ 2.2 สมบัติของพอลิแลกติกแอซิดที่มีโครงสร้างทางเคมีแบบต่างๆ.....	19
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานของโครงการวิจัย.....	34
ตารางที่ 3.2 สมบัติของพอลิแลกติกแอซิด (PLA 4043D).....	35
ตารางที่ 3.3 สมบัติของโคพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ (Hytrek G3548 NC010).....	36
ตารางที่ 3.4 สมบัติและส่วนประกอบของเบนโทไนต์ (BENTOLITE H).....	37
ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนผสมของ PLA/Hytrek.....	40
ตารางที่ 3.6 ภาวะการผสม PLA/Hytrek ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่.....	40
ตารางที่ 3.7 การตั้งอุณหภูมิและภาวะในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานของเครื่องฉีดแบบ.....	41
ตารางที่ 3.8 อัตราส่วนผสมของ PLA/Hytrek/BN.....	42
ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของ PLA, Hytrek และ PLA/Hytrek ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	52
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตของ PLA, Hytrek และ PLA/Hytrek ที่อัตราส่วนต่างๆ..	56
ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวและการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ PLA, Hytrek และ PLA/Hytrek ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	58
ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของ PLA/Hytrek/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 0, 1, 3 และ 5 phr	62
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตของ PLA/Hytrek/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 0, 1, 3 และ 5 phr.....	66
ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของ PLA, Hytrek, 70/30 PLA/Hytrek และ PLA/Hytrek/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 1, 3 และ 5 phr.....	67
ตารางที่ 4.7 ดัชนีการหลอมไหลของ PLA, Hytrek, 70/30 PLA/Hytrek และ PLA/Hytrek/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 1, 3 และ 5 phr.....	68
ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวและการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ 70/30 PLA/Hytrek และ PLA/Hytrek/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 1, 3 และ 5 phr.....	69
ตารางที่ 4.9 อุณหภูมิการสลายตัวของ PLA, Hytrek, 70/30 PLA/Hytrek และ PLA/Hytrek/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 1, 3 และ 5 phr.....	70
ตารางที่ 4.10 สมบัติเชิงกลพลวัตของ PLA, Hytrek, 70/30 PLA/Hytrek และ PLA/Hytrek/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 1, 3 และ 5 phr.....	72

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ไอโซเมอร์ทั้ง 3 รูปแบบของกรดแลคติก (L-lactide, D-lactide, และ Meso-Lactide).....	19
ภาพที่ 2.2 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด.....	19
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์.....	22
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลของโคพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์.....	23
ภาพที่ 2.5 ลักษณะการกระจายตัวของเฟสแบบต่างๆในพอลิเมอร์ผสม.....	25
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของมอนอเมอร์โพลีโพรพิลีนที่เป็นส่วนประกอบหลักในเบนโทไนต์.....	26
ภาพที่ 2.7 ลักษณะการกระจายตัวของวัสดุประเภทต่างๆเมื่ออยู่ในวัสดุเฟสหลัก (Matrix phase).....	27
ภาพที่ 2.8 รูปแบบการกระจายตัวของเบนโทไนต์ในพอลิเมอร์.....	28
ภาพที่ 3.1 เม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด (PLA 4043D).....	35
ภาพที่ 3.2 เม็ดพลาสติกโคพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ (Hyrel G3548 NC010).....	36
ภาพที่ 3.3 เบนโทไนต์ (BENTOLITE H).....	36
ภาพที่ 3.4 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	39
ภาพที่ 3.5 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (LAB TECH LTE-20-32).....	40
ภาพที่ 3.6 เครื่องฉีดแบบ (Arberg allrounder 470C-golden).....	41
ภาพที่ 3.7 ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ที่ได้จากการฉีดแบบ.....	41
ภาพที่ 3.8 ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ได้จากการฉีดแบบ.....	42
ภาพที่ 3.9 ชิ้นงานความทนแรงกระแทกแบบไอซอดที่มีรอยบาก ตามมาตรฐาน ASTM D256....	43
ภาพที่ 3.10 ชิ้นงานความทนแรงกระแทกแบบไอซอดที่มีรอยบากที่เตรียมได้ ตามมาตรฐาน ASTM D256.....	43
ภาพที่ 3.11 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (Ceast, Resil impactor).....	43
ภาพที่ 3.12 เครื่องยูนีเวอร์แซล (Hounsfield, H 50 KS).....	44
ภาพที่ 3.13 ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภทที่ 1.....	44
ภาพที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Hitachi, SU5000).....	45
ภาพที่ 3.15 เครื่องทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน (Ceast, HDT Vicat 6911).....	45
ภาพที่ 3.16 ลักษณะหวักดและการวางชิ้นงานในการทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต.....	46
ภาพที่ 3.17 การวางชิ้นงานในการทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน ตามมาตรฐาน ASTM D648 วิธี B.....	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.18 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Shimadzu, DSC-60 plus series)..	47
ภาพที่ 3.19 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดีฟแฟรกโทมิเตอร์ (Panalytical X'pert PRO MPD, pw 3040/60).....	48
ภาพที่ 3.20 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (JEOL/JEM-2100 Plus).....	48
ภาพที่ 3.21 เครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Instron, CEST MF20).....	49
ภาพที่ 3.22 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (Shimadzu, TG/DTA: DTG-60)..	49
ภาพที่ 3.23 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (Mettler Toledo, TGA/SDTA851 ^e).....	50
ภาพที่ 4.1 ขึ้นงานรูปดัมเบลล์ของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	51
ภาพที่ 4.2 ความทนแรงกระแทกของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	52
ภาพที่ 4.3 การยึดตัว ณ จุดขาดของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	53
ภาพที่ 4.4 ความทนแรงดึงของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	53
ภาพที่ 4.5 ยังสัมมอดูลัสของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	54
ภาพที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของ PLA และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	55
ภาพที่ 4.7 อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	56
ภาพที่ 4.8 DSC เทอร์โมแกรมของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel อัตราส่วนต่างๆที่ได้จาก (a) ขั้นตอนการเย็นตัว และ (b) ขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2.....	57
ภาพที่ 4.9 เม็ดพลาสติก PLA/Hytrel/BN.....	59
ภาพที่ 4.10 ขึ้นงาน PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr.....	60
ภาพที่ 4.11 XRD ดีฟแฟรกโทแกรมของเบนโทไนด์.....	60
ภาพที่ 4.12 XRD ดีฟแฟรกโทแกรมของเบนโทไนด์และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ 1, 3 และ 5 phr.....	61
ภาพที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ปริมาณ 1 phr.....	61
ภาพที่ 4.14 ความทนแรงกระแทกของ PLA และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ 0, 1, 3 และ 5 phr.....	63
ภาพที่ 4.15 การยึดตัว ณ จุดขาด ของ PLA และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ 0, 1, 3 และ 5 phr.....	63
ภาพที่ 4.16 ความทนแรงดึงของ PLA และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ 0, 1, 3 และ 5 phr.....	64
ภาพที่ 4.17 ยังสัมมอดูลัสของ PLA และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ 0, 1, 3 และ 5 phr.....	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของ 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ 1, 3 และ 5 phr.....	65
ภาพที่ 4.19 อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตของ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ 0, 1, 3 และ 5 phr....	66
ภาพที่ 4.20 อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของ PLA และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ 0, 1, 3 และ 5 phr.....	67
ภาพที่ 4.21 ดัชนีการหลอมไหลของ PLA และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ 0, 1, 3 และ 5 phr.....	68
ภาพที่ 4.22 DSC เทอร์โมแกรมของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 phr ที่ได้จาก (a) ขั้นตอนการเย็นตัว และ (b) ขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2.....	69
ภาพที่ 4.23 (a) TGA และ (b) DTG เทอร์โมแกรมของ PLA, Hytrel, 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr.....	71
ภาพที่ 4.24 มอดูลัสสะสมของ PLA, Hytrel, 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr.....	72
ภาพที่ 4.25 มอดูลัสสูญเสียของ PLA, Hytrel, 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr.....	73
ภาพที่ 4.26 แทนเจนต์สูญเสียของ PLA, Hytrel, 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr.....	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และความจำเป็นของปัญหา

ผลิตภัณฑ์พลาสติกนั้นมีความสำคัญอย่างมากในชีวิตประจำวันของมนุษย์ เนื่องจากคุณสมบัติที่เฉพาะของพลาสติกชนิดนั้นๆ เช่น ราคาต้นทุนต่ำ น้ำหนักเบา มีความทนทานแข็งแรง และสามารถปรับปรุงหรือดัดแปลงสมบัติของพลาสติกได้ตามต้องการ จึงเป็นที่นิยมของผู้ผลิตและทำให้อุตสาหกรรมพลาสติกเติบโตอย่างรวดเร็วในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมพลาสติกบรรจุภัณฑ์ต่างๆ นำมาสู่ปัญหาปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากพลาสติกทั่วไปใช้เวลานานหลายสิบปีเพื่อให้ย่อยสลายได้หมด การกำจัดขยะพลาสติกที่พบทั่วไปคือการฝังกลบหรือการเผาทำลายซึ่งเป็นวิธีที่ต้องใช้เวลานานหรือใช้ต้นทุนสูงและก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยวิธีการรีไซเคิลขยะพลาสติกเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการช่วยทำให้เกิดทรัพยากรหมุนเวียนแต่ยังพบได้เพียงส่วนน้อยเท่านั้น เนื่องจากต้องมีการคัดแยกขยะและอาจใช้ต้นทุนสูงในระหว่างกระบวนการ ซึ่งพลาสติกที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลจะสูญเสียสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน นักวิจัยจึงให้ความสนใจที่จะพัฒนาพลาสติกที่สังเคราะห์ขึ้นได้จากแหล่งทรัพยากรทางธรรมชาติ เพื่อรักษาและสร้างประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากพลาสติกเหล่านี้มีความเข้ากันได้ดีทางชีวภาพ ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีความแข็งแรง และมีสมบัติเชิงกลที่ดีเทียบเท่ากับพลาสติกที่สังเคราะห์ได้จากแหล่งปิโตรเคมี โดยพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เป็นที่ได้รับความสนใจจากตลาดโลกคือ พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียนหรือวัตถุดิบทางการเกษตรที่มีแบ่งเป็นส่วนประกอบหลัก เช่น มันสำปะหลัง อ้อย และข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูกและหาได้ทั่วไปในหลายๆ ประเทศ โดยพอลิแลคติกแอซิดมีการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น บรรจุภัณฑ์ ชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนทางการแพทย์และใช้ในทางเกษตรกรรม เป็นต้น เนื่องจากมีความแข็งแรงสูงและมีลักษณะใส แต่มีข้อจำกัดคือไม่ทนต่อความร้อนสูงและมีลักษณะของเนื้อวัสดุที่แข็งแต่เปราะ

งานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นศึกษาการปรับปรุงสมบัติเพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับพอลิแลคติกแอซิด โดยการผสมกับเทอร์โมพลาสติกโคพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic copolyester elastomer) ซึ่งเทอร์โมพลาสติกโคพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์นี้มีสมบัติที่โดดเด่นคือ มีความยืดหยุ่นสูง แข็งแรง ทนทานต่อสารเคมี ทนทานต่อการขีดถู สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง เนื่องจากมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วที่ต่ำประมาณ -40 องศาเซลเซียส จึงทำให้มีความยืดหยุ่นได้มากเมื่อนำไปใช้งานในอุณหภูมิที่ต่ำ และยังสามารถใช้งานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงถึง 140 องศาเซลเซียสได้ สามารถนำไปขึ้นรูปขึ้นงานผ่านกระบวนการต่างๆได้เช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติกทั่วไป ซึ่งมีความสะดวกทางกระบวนการแปรรูปมากกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการแปรรูปของยางทั่วไป กล่าวคือ เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ขณะทำการแปรรูป

หรือไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการคอมปาวด์ให้เกิดความยุ่งยากเหมือนกับยาง และที่สำคัญสามารถนำกลับมาแปรรูปได้ใหม่หลังจากผ่านกระบวนการแปรรูปมาแล้ว (Recycling) ส่วนใหญ่นิยมนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยานยนต์

งานวิจัยนี้ ยังมุ่งเน้นศึกษาการเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนและเพิ่มระดับความเป็นผลึกให้กับพอลิแลกติกแอซิดโดยการเติมเบนโทไนต์ (Bentonite) ที่มีอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนเมตรซึ่งเบนโทไนต์เป็นแร่ดินเหนียว (Clay) ชนิดหนึ่ง โดยมีส่วนประกอบหลักคือ มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) และอื่นๆเช่น ยิปซัม (Gypsum) เฟลด์สปาร์ (Feldspar) ควอตซ์ (Quartz) เป็นต้น ลักษณะอนุภาคของเบนโทไนต์เป็นแผ่นซีทซิลิกेटเรียงซ้อนกันเป็นชั้นคล้ายแซนด์วิช มีสมบัติที่โดดเด่นคือ มีการดูดซับดี มีความสามารถในการพองตัวหรือขยายตัวได้สูง (Swelling) มีความแข็งแรงสูง มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีเนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กของเบนโทไนต์ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงจึงสามารถใช้ปริมาณน้อยในการเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติของพลาสติกให้ดีขึ้นได้ โดยได้มีการนำเบนโทไนต์ไปใช้งานอย่างหลากหลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ใช้เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง อุปกรณ์ทางการแพทย์ ใช้เป็นสารเคลือบผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมพลาสติก แก้ว กระจก และเซรามิก เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตระหว่างพอลิแลกติกแอซิดกับโคพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์และเบนโทไนต์

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตงานวิทยานิพนธ์

1.3.1 วัสดุดิบ

งานวิจัยนี้ใช้เม็ดพลาสติกพอลิแลกติกแอซิด (พีแอลเอ) เกรด 4043D กับเม็ดพลาสติกโคพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ ชื่อทางการค้า ไฮเทรล เกรด G3548 NC010 และเบนโทไนต์ ชื่อทางการค้า BENTOLITE เกรด H

1.3.2 การดำเนินงาน

1.3.2.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพีแอลเอกับไฮเทรล ในอัตราส่วนร้อยละ 95/5, 90/10, 85/15, 80/20, 75/25 และ 70/30 โดยน้ำหนัก จากนั้นหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ชนิดหมุนทิศทางเดียวกัน ดึงเส้นพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการอัดรีดให้เย็นตัวด้วยการดึงผ่านน้ำ แล้วตัดเป็นเม็ดและขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดแบบ ชิ้นงานที่ได้จะนำไปทดสอบและเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อน เพื่อพิจารณาเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของ

พีแอลเอกซ์ไฮเทรล เพื่อนำไปเตรียมเป็นพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

1.3.2.2 การเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากข้อ 1.3.2.1 มาเตรียมเป็นพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต ด้วยการเติมเบนโทไนต์ในอัตราส่วนดังนี้คือ 1, 3 และ 5 ส่วนต่อร้อยละของพอลิเมอร์ผสม (phr) โดยการหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดแบบ โดยใช้สภาวะในการผสมและการขึ้นรูปเช่นเดียวกับการเตรียมพอลิเมอร์ผสม

1.3.3 การทดสอบและวิเคราะห์ผล

1.3.3.1 ทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดที่มีรอยบาก ตามมาตรฐาน

ASTM D256

1.3.3.2 ทดสอบความทนแรงดึง ยั่งสัมมอดูลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด ตามมาตรฐาน

ASTM D638 ประเภทที่ 1

1.3.3.3 ตรวจสอบสัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาการกระจายตัวและความเข้ากันได้ของส่วนผสม

1.3.3.4 ทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน ตามมาตรฐาน ASTM D648

วิธี B

1.3.3.5 ทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต ตามมาตรฐาน ASTM D1525 Rate A

1.3.3.6 ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential scanning calorimetry, DSC) เพื่อหาค่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g), อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m), อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c), อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (T_{cc}) และระดับความเป็นผลึก (χ_c)

1.3.3.7 ตรวจสอบและวิเคราะห์ระยะห่างระหว่างชั้นของเบนโทไนต์ด้วยเทคนิคเอกซ์-เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction, XRD)

1.3.3.8 ตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของชั้นเบนโทไนต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM)

1.3.3.9 ทดสอบดัชนีการหักเหตามมาตรฐาน ASTM D1238

1.3.3.10 วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA)

1.3.3.11 วิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต เพื่อหาค่ามอดูลัสสะสม (E') มอดูลัสสูญเสีย (E'') และแทนเจนต์สูญเสีย ($\tan \theta$)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตจากพีแอลเอกซ์ไฮเทรลกับโคพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์และเบนโทไนต์ ที่มีสมรรถนะการใช้งานสูงชิ้นเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการฉีดแบบที่ต้องการความทน-

แรงกระแทกสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

1.4.2 ทราบสมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต
ที่เตรียมได้

1.4.3 เป็นทางเลือกสำหรับวิศวกรออกแบบผลิตภัณฑ์ และอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องในการ
เลือกใช้วัสดุ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic)

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถสังเคราะห์ได้จากแหล่งวัตถุดิบทางการเกษตรและย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (Biodegradable) โดยปัจจุบันมีปริมาณการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมากขึ้นทุกปี เนื่องจากวัตถุดิบหลักหรือสารตั้งต้นในการสังเคราะห์สามารถปลูกทดแทนขึ้นใหม่ได้ (Renewable resources) เช่น เซลลูโลส พอลิเอสเทอร์ และแป้ง เป็นต้น โดยกระบวนการย่อยสลายเกิดจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ถูกตัดขาดผ่านปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะที่ก่อให้เกิดการย่อยสลายเช่น ความชื้น แสงอาทิตย์ และก๊าซออกซิเจน ซึ่งพลาสติกจะแตกสลายมีขนาดที่เล็กลงและเป็นอาหารให้กับแบคทีเรียที่อยู่ในสภาพแวดล้อมนั้น [1] โดยมีผลิตภัณฑ์จากกระบวนการย่อยสลายของแบคทีเรียที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ก๊าซมีเทน และสารประกอบขนาดเล็ก

เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์ (Thermoplastic polyesters) มีโครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์ประกอบไปด้วยพันธะเอสเทอร์ที่มีความไวต่อน้ำและสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ทำให้พันธะเอสเทอร์เกิดการสลายตัวได้กรดคาร์บอกซิลิกและแอลกอฮอล์ [2] ออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยพอลิเอสเทอร์แบ่งเป็นสองกลุ่มหลักคือ พอลิเอสเทอร์แบบอะลิฟาติก (Aliphatic polyesters) ที่มีโครงสร้างของสายโซ่เป็นแบบเส้นตรง และพอลิเอสเทอร์แบบอะโรมาติก (Aromatic polyesters) ที่มีโครงสร้างของสายโซ่เป็นแบบวง

พอลิเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้จากแหล่งวัตถุดิบทางธรรมชาติ เช่น พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอท (Polyhydroxyalkanoate, PHA), พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต (Polyhydroxy butyrate, PHB), พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีพอลิเอสเทอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกสังเคราะห์ขึ้นจากแหล่งวัตถุดิบปิโตรเคมี เช่น พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate), PBS), พอลิคาโพรแลกโตน (Poly(ϵ -caprolactone), PCL) และ พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-เทเรฟทาเลต (Polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) เป็นต้น [2-3] โดยตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติของพลาสติกชีวภาพที่สังเคราะห์ได้จากธรรมชาติและพลาสติกชีวภาพที่สังเคราะห์ได้จากแหล่งปิโตรเคมี

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีการนำไปใช้ประโยชน์ในหลากหลายด้าน โดยมุ่งเน้นไปที่ประโยชน์ทางการแพทย์ การเกษตร และบรรจุภัณฑ์ต่างๆ

ตารางที่ 2.1 สมบัติของตัวอย่างพอลิเอสเตอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [3]

Properties	Natural (Bio-Based) Biodegradable Polymers			Synthetic Biodegradable Polymers		
	PLA	PHB	PHBV	PCL	PBS	PBAT
Density (g/cm ³)	1.25	1.25	1.26	1.11	1.23	1.25
Tensile strength (MPa)	53	18-27	20	25.1	62	14.1
Elongation at break (%)	10-100	9-17	-	16.4	710	>300
Flexural modulus (MPa)	350- 450	1200-2000	-	-	470	79-99
T_m (°C)	120- 170	171-180	145	59-64	90-120	124.5
T_g (°C)	55-65	2-3	-1	-60	-45 to -10	-29
Heat distortion - temperature (°C)	40-45	-	-	-	97	-
Vicat softening point (°C)	~55	53	-	-	-	-

2.2 การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ

2.2.1 การย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation)

ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นในสภาวะแวดล้อมที่มีออกซิเจน ความร้อน หรือรังสี UV ที่เหมาะสม โดยออกซิเจนจะแทรกเข้าไปในโมเลกุลของพลาสติกเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเกลือของโลหะทรานซิชันในสภาพแวดล้อมทำให้สารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) [4] และสายโซ่โมเลกุลเกิดการขาดออกจากกัน นำไปสู่การสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็วของพลาสติก

2.2.2 การย่อยสลายด้วยแสง (Photodegradation)

ปฏิกิริยานี้เกิดกับพลาสติกที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อรังสี UV เช่น หมู่คีโตนประกอบอยู่ในโครงสร้างหรือมีพันธะคู่จำนวนมากในสายโซ่โมเลกุล ทำให้เมื่อได้รับรังสี UV จะเกิดการแตกหักของพันธะในสายโซ่โมเลกุลเกิดเป็นอนุมูลอิสระเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่โมเลกุล ทำให้สายโซ่โมเลกุลขาดออกจากกันและส่งผลให้พลาสติกสูญเสียสมบัติเชิงกล

2.2.3 การย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation)

ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นกับพลาสติกที่มีหมู่เอสเตอร์หรือเอไมด์เป็นหมู่ฟังก์ชันในสายโซ่โมเลกุล เช่น แป้ง พอลิเอสเตอร์ และพอลิยูรีเทน เป็นต้น ซึ่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบ่งเป็น 2 ประเภท

คือ ไฮโดรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไฮโดรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายในโมเลกุลคือหมู่คาร์บอกซิลของเอสเทอร์หรือหมู่เอไมด์ที่บริเวณปลายสายโซ่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส [5] และตัวเร่งปฏิกิริยาภายนอกโมเลกุลมี 2 ประเภทคือการย่อยสลายทางชีวภาพโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเอนไซม์ซึ่งต้องใช้เอนไซม์ร่วมกับตัวเร่ง และการย่อยสลายทางเคมีที่ไม่ต้องใช้เอนไซม์ร่วมกับตัวเร่งและมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น เบส กรด และโลหะอัลคาไลน์ที่อยู่ในสภาพแวดล้อมนั้นๆ

2.2.4 การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation)

เป็นวิธีการทั่วไปที่ทำให้พลาสติกแตกสลายเป็นชิ้นเล็กๆด้วยแรงทางกล

2.2.5 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

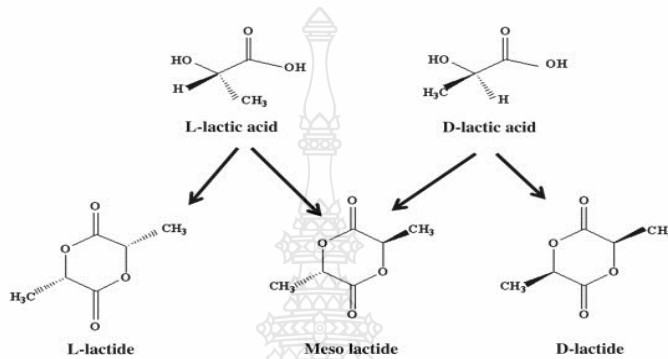
กระบวนการนี้เกิดขึ้นหลังจากพลาสติกที่มีสายโซ่โมเลกุลเกิดการแตกหักหรือขาดแล้วแต่สายโซ่โมเลกุลนั้นยังคงมีขนาดใหญ่ โดยกลไกต่อไปจะเกิดขึ้น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นแรกการย่อยสลายภายนอกเซลล์โดยเอนไซม์เกิดขึ้นได้ 2 แบบคือ Endo-enzyme เอนไซม์ที่ทำให้พันธะในสายโซ่โมเลกุลเกิดการแตกหักแบบไม่เป็นระเบียบ และ Exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้พันธะในสายโซ่โมเลกุลเกิดการแตกหักทีละหน่วยเริ่มจากหน่วยที่เล็กที่สุดปลายสายโซ่โมเลกุล [5-6] ขั้นต่อมาพลาสติกจะแตกสลายมีขนาดเล็กและเกิดการย่อยสลายได้ผลิตภัณฑ์คือ พลังงาน และสารประกอบอื่นๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน น้ำ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ

2.3 พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA)

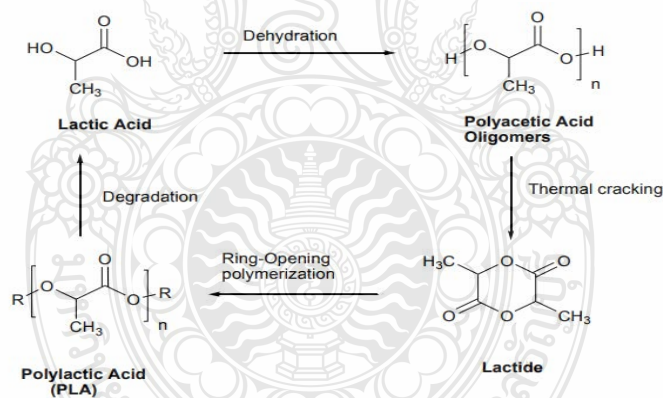
พอลิแลคติกแอซิดจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์แบบอะลิฟาติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมพลาสติกในปัจจุบัน โดยมีสมบัติที่ดีเช่น แข็งแรง มีความใส ทนทานต่อน้ำมันและไขมัน จัดเป็นวัสดุที่มีเนื้อแข็งแต่เปราะสั่นกระเซาะที่ได้จากผลผลิตทางการเกษตร เช่น ข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลัง เป็นต้น นำมาผ่านกระบวนการทางเคมีโดยการหมักเพื่อเปลี่ยนแปลงให้เป็นน้ำตาลและเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นมอนอเมอร์นั่นคือกรดแลคติก (Lactic acid) ซึ่งมีไอโซเมอร์สองรูปแบบคือ แบบ ดีไอโซเมอร์ (D-Lactic acid) และแบบแอลไอโซเมอร์ (L-Lactic acid) [7] ที่มีความว่องไวต่อแสง (Optical active) ต่างกัน กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดสามารถทำได้หลายวิธี เช่น

การสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาควบแน่นโดยตรงของกรดแลคติก (ได้เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ) เมื่อนำพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำไปผ่านปฏิกิริยาแตกตัวแบบย้อนกลับ (Depolymerization) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแลคไทด์ซึ่งมีโครงสร้างไอโซเมอร์ 3 รูปแบบ คือ L-lactide, D-lactide, และ Meso-lactide ดังภาพที่ 2.1 โดยสารดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวงแอโรมาติก (Ring opening polymerization) โดยวงแอโรมาติกของมอนอเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเปิดวงแล้วเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาวได้พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่นิยมนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมพลาสติกปัจจุบัน ดังภาพที่ 2.2 โดยพอลิแลคติกแอซิดที่สังเคราะห์ได้จาก

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงแอโรมาติกส่วนใหญ่มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดแอลไอโซเมอร์ ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นพอลิแลคติกแอซิด (Poly(L-lactic acid), PLLA) หรืออาจได้ผลิตภัณฑ์เป็นพอลิดีแอลแลคติกแอซิด (Poly(D,L-lactic acid), PDLLA) ที่ได้จากสารตั้งต้นที่เป็นเมโสแลกไทด์ (Meso-lactide) [8] โดยสัดส่วนไอโซเมอร์ของแลกไทด์จะมีผลต่อระดับความเป็นผลึกของพอลิเมออร์กว่าคือ PLLA มีระดับความเป็นผลึกสูงขณะที่ PDLLA มีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) สูง มีสมบัติแสดงในตารางที่ 2.2



ภาพที่ 2.1 ไอโซเมอร์ทั้ง 3 รูปแบบของกรดแลคติก (L-lactide, D-lactide, และ Meso-lactide) [10]



ภาพที่ 2.2 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด [9]

ตารางที่ 2.2 สมบัติของพอลิแลคติกแอซิดที่มีโครงสร้างทางเคมีแบบต่างๆ [11]

พอลิแลคติกแอซิด	Glass transition temperature (T_g) (°C)	Melting temperature (T_m) (°C)	Density (g/cm^3)
PLLA	55-80	173-178	1.29
PDLLA	43-53	120-170	1.25
PDLA	40-50	120-150	1.248

2.3.1 ข้อดีของพอลิแลกติกแอซิด

2.3.1.1 ไม่เป็นพิษ (Non-toxic) ถูกจัดว่าเป็นพลาสติกประเภทที่ปลอดภัยโดยสำนักงานอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา [11] จึงนำไปใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์อาหารอย่างหลากหลาย เช่น ถ้วย จาน ช้อน แก้ว ขวดน้ำดื่ม เป็นต้น

2.3.1.2 ขึ้นรูปขึ้นงานได้ด้วยกระบวนการเช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติกทั่วไป

2.3.1.3 เข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (Biocompatibility) โดยมีการนำไปใช้งานทางการแพทย์เช่น ไหมเย็บแผล (Sutures) และอุปกรณ์ที่ถูกฝังในร่างกาย (Surgical implants)

2.3.1.4 สมบัติการสกัดกั้น (Barrier properties) ดี รักษากลิ่นและรสชาติได้ดี ทนต่อไขมันและน้ำมัน

2.3.1.5 สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะที่มีปัจจัยเหมาะสม เช่น ย่อยสลายในปุ๋ยหมัก และย่อยสลายด้วยการฝังกลบในดิน ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2.3.1.6 สามารถคงรูป (Stiffness) ได้ดีและมีความแข็งแรง (Strength) สูง ซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) และพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) [11-12]

2.3.2 ข้อจำกัดของพอลิแลกติกแอซิด

2.3.2.1 ไม่ทนความร้อนสูงเนื่องจากมีอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ 160-180 องศาเซลเซียส หากใช้ความร้อนสูงในกระบวนการแปรรูปจะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อน (Thermal degradation) และจำเป็นต้องอบไล่ความชื้นเม็ดพอลิแลกติกแอซิดก่อนเข้าสู่กระบวนการแปรรูปเพื่อไม่ให้เกิดการเสื่อมสภาพผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และควรมีปริมาณความชื้น (Water content) อยู่ในระดับที่น้อยกว่า 500 ppm [12]

2.3.2.2 มีลักษณะของเนื้อที่แข็งแต่เปราะมีความทนต่อแรงกระแทก (Impact strength) ต่ำ ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับบางกระบวนการ

2.3.2.3 ความแข็งแรงในขณะหลอม (Melt strength) ต่ำ ส่งผลต่อการแปรรูปในบางกระบวนการ เช่น กระบวนการอัดรีดและเป่าขึ้นรูปฟิล์ม

2.3.2.4 เม็ดพอลิแลกติกแอซิดมีราคาที่ยังค่อนข้างสูงกว่าเม็ดพลาสติกที่สังเคราะห์จากแหล่งปิโตรเคมีเนื่องจากต้นทุนในกระบวนการผลิตที่มีราคาสูง

2.3.3 การปรับปรุงสมบัติของพอลิแลกติกแอซิด

เนื่องจากพอลิแลกติกแอซิดมีข้อจำกัดในการใช้งานคือมีเนื้อที่แข็งเปราะ ดังนั้นเพื่อเป็นการขยายขอบเขตการใช้งานให้กว้างขึ้นจึงนำมาปรับปรุงหรือพัฒนาสมบัติให้เหมาะสมได้โดยวิธีดังนี้

2.3.3.1 การเตรียมโคพอลิเมอร์โรเซชัน (Copolymerization)

เกิดจากการทำโคพอลิเมอร์โรเซชันของแลกไทด์ (Lactide) กับมอนอเมอร์ที่มีวงแหวนเอโรมาติก เช่น ไกลโคไลด์ (Glycolide) และเอทิลีนออกไซด์ (Ethylene oxide) เป็นต้น จะได้โคพอลิเมอร์ที่เพิ่มความเป็นผลึกให้กับพอลิแลกติกแอซิด หรือการทำบล็อกโคพอลิเมอร์ (Block-

copolymer) กับพอลิเอสเทอร์ชนิดอื่น เช่น พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol) [12] เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อน แต่เนื่องจากมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายสูงจึงไม่นิยมปรับปรุงสมบัติโดยวิธีนี้ในอุตสาหกรรม

2.3.3.2 ปรับปรุงสมบัติด้วยสารเติมแต่ง (Additive) หรือทำเป็นวัสดุคอมพอสิต

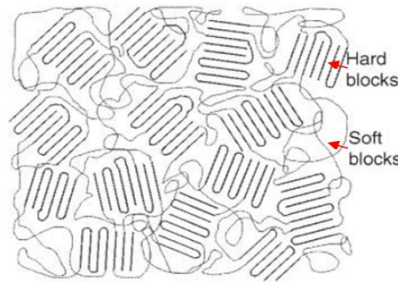
ทำได้โดยเลือกใช้สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เฉพาะอย่างเพื่อปรับปรุงสมบัติตามต้องการ เช่น เพิ่มระดับความเป็นผลึกโดยการเติมสารก่อผลึก (Nucleating agents) เพิ่มความเหนียวหรืออ่อนตัวโดยเติมพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) ปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยการเติมสารอินทรีย์ที่มีอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนเมตร เช่น แร่ดินเหนียว (Clay) นาโนซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) และนาโนคาร์บอน (Nanocarbon) เป็นต้น

2.3.3.3 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม (Blending)

ทำได้โดยนำพอลิเมอร์ชนิดอื่นมาผสมกับพอลิแลกติกแอซิดซึ่งเป็นวิธีที่นิยมในอุตสาหกรรมทั่วไปเนื่องจากได้ผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพ กระจุกตัวง่าย และมีสมบัติตามต้องการโดยไม่ต้องสังเคราะห์พลาสติกชนิดใหม่ เช่น ปรับปรุงอุณหภูมิการใช้งานของพอลิแลกติกแอซิดโดยผสมกับพอลิเอไมด์ 11 (Polyamide 11) หรือเพิ่มความเหนียวโดยการเติมอีลาสโตเมอร์ที่มีความอ่อนนิ่มและยืดหยุ่นสูง เช่น พอลิยูรีเทน (Thermoplastic polyurethane, TPU), พอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic polyester elastomer, TPEE) และพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรฟทาเลต (Polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) เป็นต้น [13]

2.4 โคพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ (Copolyester, COPEs)

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic elastomer, TPE) เกิดจากการผสมของมอนอเมอร์กับพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ด้วยวิธีการทางกายภาพหรือวิธีการทางเคมี ได้ผลิตภัณฑ์เป็นพอลิเมอร์ผสมหรือโคพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบบล็อกหรือแบบกราฟ โดยมีโครงสร้างหลักประกอบด้วยส่วนที่แสดงสมบัติเป็นยางซึ่งมีจำนวนมากกว่าส่วนที่แสดงสมบัติเป็นพลาสติกโดยไม่เกิดการเชื่อมขวางขึ้นในโครงสร้าง ทำให้เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์มีสมบัติคล้ายยางที่มีความยืดหยุ่นและคืนรูปร่างได้ดีที่อุณหภูมิห้องและสามารถเข้าสู่กระบวนการแปรรูปต่างๆได้เช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไป โครงสร้างโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ แสดงดังภาพที่ 2.3 ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วนในโครงสร้าง คือ ส่วนที่เป็นเฟสแข็ง (Hard phase) แสดงสมบัติเป็นพลาสติกคือส่วนที่เป็นผลึกในโครงสร้างทำหน้าที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่าเฟสอ่อน และส่วนที่เป็นเฟสอ่อน (Soft phase) เป็นส่วนของยางหรือส่วนที่เป็นอสัณฐานแสดงสมบัติความยืดหยุ่น (Flexible) หรืออีลาสติก (Elasticity) มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำกว่าเฟสแข็ง

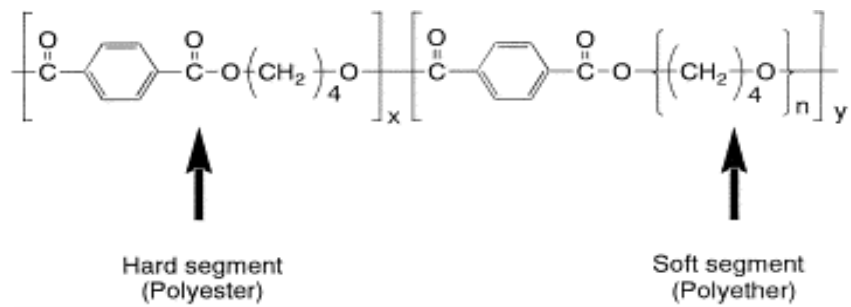


ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ [13]

เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ มีหลายประเภท ได้แก่

- บล็อกโคพอลิเมอร์ของสไตรีน (Styrenic thermoplastic elastomer, S-TPEs)
- เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Thermoplastic polyurethanes, TPUs)
- โคพอลิเอไมด์ (Copolyamide, COPAs) หรือ พอลิเอไมด์อีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic polyamides elastomer)
- เทอร์โมพลาสติกพอลิโอเลฟิน (Thermoplastic Polyolefin, TPO)
- เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอริกอัลลอยด์ ((Thermoplastic elastomeric alloys, EA) หรือ (Thermoplastic vulcanisates (TPE-V or TPV))
- โคพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ (Copolyester elastomer, COPEs)

โคพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ (Copolyester elastomers) มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแบบบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยส่วนที่แข็งคือพอลิเอสเทอร์ที่มีความเป็นผลึกสูง (Crystalline polyesters) เช่น พอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต (Polybutylene terephthalate, PBT) หรือ พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) และส่วนที่อ่อนคือพอลิอีเทอร์ที่มีความเป็นอสัณฐานสูง (Amorphous polyethers) หรืออาจเป็นพอลิเมอร์พวกลอสเทอร์ที่มีสายโซ่ยาว ดังภาพที่ 2.4 ตัวอย่างพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ที่นิยมใช้งานในอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น พอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ที่มีชื่อทางการค้า ไฮเทรล (Hytrel) ผลิตโดยบริษัท DuPont ประเทศสหรัฐอเมริกา [14,16-18] ส่วนใหญ่มักจะเป็นบล็อกโคพอลิเมอร์ของพอลิบิวทิลีนเทเรฟทาเลต (Polybutylene terephthalate, PBT) (ส่วนที่แข็ง) กับ พอลิอีเทอร์ไกลคอล (Polyether glycols) (ส่วนที่อ่อน) เป็นต้น โดยมีสมบัติที่โดดเด่นคือ ใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ (อุณหภูมิหลอมเหลว 185-220 องศาเซลเซียส) มีสมบัติเชิงกลดี ยืดหยุ่นได้ที่อุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วประมาณ -40 องศาเซลเซียส) [15] นอกจากนี้ยังมีความต้านทานต่อการฉีกขาด ทนต่อแรงกระแทก ทนต่อน้ำมันทั่วไปและน้ำมันไฮดรอลิกได้ดีกว่าเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ ประเภทอื่น ๆ นิยมใช้งานในอุตสาหกรรมยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์กีฬา



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลของโคพอลิเอสเตอร์อีลาสโตเมอร์ [19]

2.4.1 ข้อดีของโคพอลิเอสเตอร์อีลาสโตเมอร์

2.4.1.1 เข้าสู่กระบวนการแปรรูปต่างๆได้เช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติก

2.4.1.2 ทนต่อแรงดึง แรงอัด และทนการฉีกขาดได้ดี

2.4.1.3 สมบัติการยืดหยุ่นดีเยี่ยม ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง

2.4.1.4 สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Recycling)

2.4.1.5 ทนทานต่อการเสื่อมสภาพด้วยน้ำ (Hydrolytic stability) มีความต้านทาน

ต่อตัวทำละลายชนิดต่างๆและต้านทานต่อเชื้อราได้ดี

2.4.2 ข้อจำกัดของโคพอลิเอสเตอร์อีลาสโตเมอร์ [20]

2.4.2.1 ค่าความชื้นเนื่องจากสายโซ่โมเลกุลส่วนใหญ่ประกอบด้วยพันธะเอสเทอร์ที่มีความไวต่อน้ำ ดังนั้นจึงต้องอบไล่ความชื้นก่อนเข้าสู่กระบวนการแปรรูป

2.4.2.2 ราคาสูงกว่ายางคงรูปทั่วไป

2.4.2.3 อุณหภูมิอ่อนตัวขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกที่เป็นเฟสแข็ง

2.4.2.4 ค่าความแข็งสูงกว่ายางคงรูปทั่วไป

การปรับปรุงสมบัติของโคพอลิเอสเตอร์อีลาสโตเมอร์สามารถทำได้เช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไป เช่น การเติมสารเติมแต่งจำพวก เคลย์ นาโนคาร์บอน และซิงค์ออกไซด์ เป็นต้น เพื่อปรับปรุงสมบัติให้เป็นไปตามต้องการหรือทำเป็นพอลิเมอร์ผสมเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล และสามารถผสมกับพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพื่อช่วยลดอัตราการสลายตัวของพลาสติกชนิดนั้นได้

2.5 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blends) [21-23]

พอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายและได้วัสดุที่มีสมบัติตามต้องการ โดยนำพอลิเมอร์อย่างน้อย 2 ชนิดมาผสมกันได้เป็นวัสดุชนิดใหม่ที่มีสมบัติแตกต่างไปจากเดิม ซึ่งจะกระทำพอลิเมอร์ในขณะที่มีสถานะเป็นของไหล เช่น พอลิเมอร์ในสถานะที่เป็นสารละลาย (Solution) หรือพอลิเมอร์ในสถานะที่เป็นของหลอม (Molten) แต่การผสมพอลิเมอร์ต่างชนิดกันให้เป็นเนื้อเดียวกันนั้นโดยธรรมชาติเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงพบว่าเมื่ออยู่ใน

สถานะของแข็งพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะกระจายตัวอยู่ในเนื้อหลักหรือเมทริกซ์ (Matrix) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ปัจจัยสำคัญในการผสมคือความเข้ากันได้ของวัสดุทั้งสองชนิด (Compatibilisation) ซึ่งหมายถึงการผสมเข้ากันได้ในระดับโมเลกุลหรืออาจเป็นการเข้ากันได้บางส่วนโดยจะทำให้เกิดการแยกเฟสและส่งผลกระทบต่อสมบัติของวัสดุที่ได้ การเลือกคู่ของพอลิเมอร์ที่จะผสมกันจึงต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้เป็นสำคัญ [21]

2.5.1 ระบบการผสม

สามารถสังเกตได้จากสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสม แบ่งเป็น 3 ชนิด ดังนี้

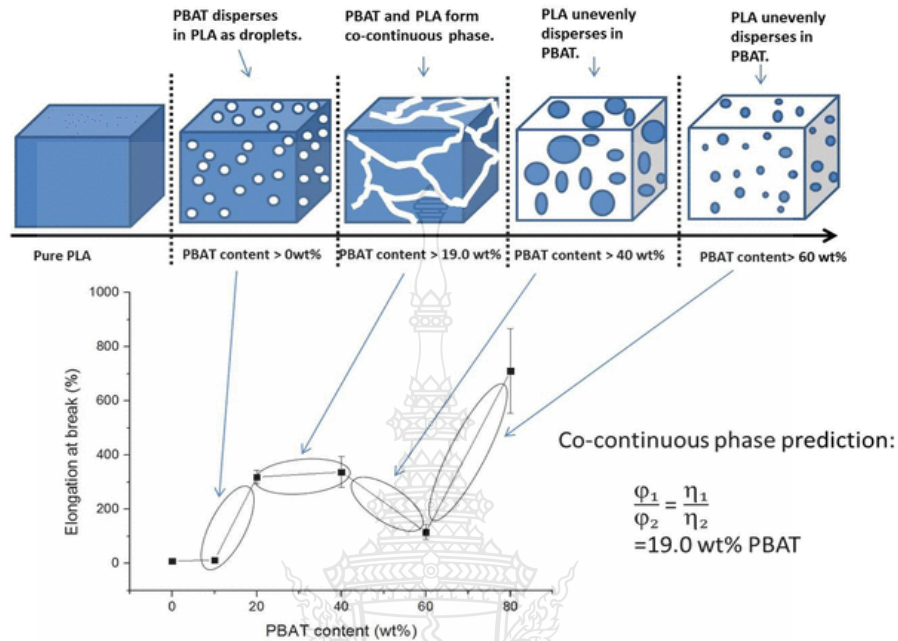
2.5.1.1 การผสมที่เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ (Miscible blends) หรือผสมเข้ากันได้ อย่างเป็นเนื้อเดียวกันในระดับโมเลกุล จะเกิดเป็นวัสดุชนิดใหม่และมีสมบัติที่ผสมผสานของวัสดุทั้งสองชนิดโดยสมบัติต่างๆจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนในการผสม ซึ่งความเข้ากันได้ลักษณะนี้จะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูง เช่น เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนหรือเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวทางเคมี เช่น ความมีขั้วหรือไม่มีขั้วของวัสดุทั้งสองชนิด ทำให้สามารถเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์และมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (Glass transition temperature, T_g) เพียงค่าเดียวซึ่งอยู่ระหว่างค่า T_g ของวัสดุทั้งสองชนิด

2.5.1.2 การผสมที่เข้ากันได้บางส่วน (Partially miscible blends) เนื่องจากความแตกต่างทางเคมีทำให้วัสดุทั้งสองชนิดเกิดการแยกเฟส วัสดุที่ผสมในปริมาณมากกว่าจะทำหน้าที่เป็นเฟสหลักหรือเฟสต่อเนื่องซึ่งแสดงสมบัติที่เด่นชัดกว่าวัสดุที่ผสมในปริมาณน้อยกว่าหรือทำหน้าที่เป็นเฟสกระจาย โดยหากวัสดุทั้งสองเกิดการกระจายตัวที่ดีและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันดีจะส่งผลให้มีสมบัติที่ดีขึ้น [22] แต่หากเกิดกรณีที่เฟสกระจายมีขนาดอนุภาคใหญ่และกระจายตัวไม่สม่ำเสมออาจจะส่งผลให้มีสมบัติต่างๆต่ำลงได้

2.5.1.3 การผสมที่เข้ากันไม่ได้ (Immiscible blends) เกิดขึ้นได้จากวัสดุทั้งสองชนิด มีสัญญาณวิทยาที่หายาก มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสไม่ดีส่งผลให้สมบัติเชิงกลไม่ดีและนำไปใช้งานไม่ได้ ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้โดยการเติมสารเชื่อมประสาน (Compatibilizers) [23] ที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ของวัสดุ

ตัวอย่างเช่น Deng และคณะ [24] ได้อธิบายลักษณะการกระจายตัวของเฟสแบบต่างๆ ในพอลิเมอร์ผสม ดังภาพที่ 2.5 จากรูปเป็นการแสดงรูปแบบการกระจายตัวของเฟสพอลิเมอร์ในพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด (PLA) กับพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรฟทาเลต (PBAT) เพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับ PLA พบว่าเมื่อ PLA เป็นเฟสหลักหรือเมทริกซ์ และเติม PBAT ในปริมาณที่น้อย PBAT จะทำหน้าที่เป็นเฟสกระจายตัวอยู่ในเฟส PLA เมทริกซ์ แต่เมื่อเติมในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 19 โดยน้ำหนัก พบว่าพอลิเมอร์ทั้งสองแสดงลักษณะเป็นเฟสร่วมกัน การเติม PBAT ที่มากกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าทำให้เกิดกระบวนการกลับเฟส (Inversion phase) โดย PLA ทำหน้าที่เป็นเฟสกระจายตัวใน PBAT เมทริกซ์ และเมื่อเติม PBAT ที่มากกว่าร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก พบว่า PLA มีการกระจายตัวที่ดีและพบว่าอนุภาคมีขนาดเล็กลงซึ่งปริมาณการเติม PBAT ที่มากขึ้นนั้นส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์

ผสมที่เปลี่ยนไป เห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสมจะมีสมบัติใกล้เคียงกับสมบัติของพอลิเมอร์ที่เดิมในปริมาณที่มากกว่า

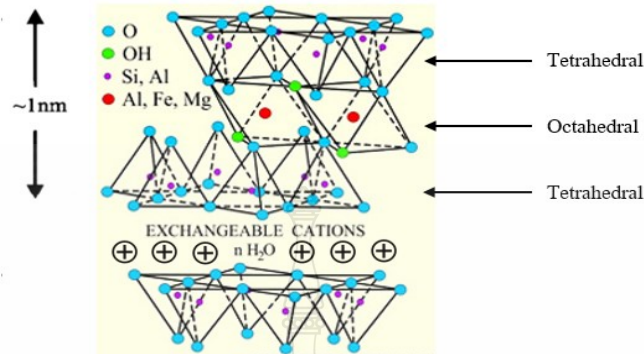


ภาพที่ 2.5 ลักษณะการกระจายตัวของเฟสแบบต่างๆในพอลิเมอร์ผสม [24]

2.6 เบนโทไนต์ (Bentonite)

เบนโทไนต์ (Bentonite) เป็นแร่ดินเหนียวหรือเคลย์ (Clay) ประเภทหนึ่ง เกิดจากหินถ้าภูเขาไฟที่แปรเปลี่ยนกลายเป็นเนื้อดินโดยมีมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) เป็นส่วนประกอบหลักและอื่นๆเช่น เฟลด์สปาร์ (Feldspar), แคลไซต์ (Calcite), ซิลิกา (Silica), ยิปซัม (Gypsum) และควอตซ์ (Quartz) [25] เป็นต้น โดยมอนต์มอริลโลไนต์ได้มีการนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในพลาสติกเป็นอย่างมากจากการมีโครงสร้างเป็นชั้นเรียงซ้อนกันคล้ายแซนด์วิชโดยชั้นตรงกลางจะเป็นชั้นของออคตาฮีดรัล (Octahedral) ประกอบด้วยชั้นด้านบนและด้านล่างเป็นชั้นของซิลิกา ลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมเตตระฮีดรัล (Tetrahedral) เรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า 2:1 ฟิลโลซิลิเกต (Phyllosilicate) โดยอนุภาคมีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตรและมีความกว้างประมาณ 1000 เท่าของความหนา [26] ดังภาพที่ 2.6 โดยช่องว่างระหว่างแผ่นสี่เหลี่ยมแต่ละชั้นจะยึดเกาะกับอะตอมของออกซิเจนร่วมกันตรงส่วนนี้ทำให้เกิดพันธะที่ไม่แข็งแรง ประกอบกับโดยทั่วไปช่องว่างระหว่างชั้นจะมีพื้นผิวเป็นประจุลบจึงเกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างชั้นกับอะตอมที่มีประจุบวกในสภาพแวดล้อมได้ เช่น โซเดียมไอออน แคลเซียมไอออน แมกนีเซียมไอออน เป็นต้น เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุบวก นั่นคือมอนต์มอริลโลไนต์มีความสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกในโครงสร้าง

ได้ (Cation exchange capacity, CEC) ซึ่งความแตกต่างหรือชนิดของธาตุที่เข้ามาแทนที่ในโครงสร้างจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมนั้นๆทำให้มอนต์มอริลโลไนต์มีสมบัติที่หลากหลาย [26]



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างโมเลกุลของมอนต์มอริลโลไนต์ที่เป็นส่วนประกอบหลักในเบนโทไนต์ [27]

2.6.1 ประเภทของเบนโทไนต์ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ดังนี้

2.6.1.1 เบนโทไนต์ที่ดูดซับน้ำและเกิดการพองตัวได้หรือโซเดียมเบนโทไนต์ (Na^+ bentonite) สามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกของโซเดียมในระหว่างชั้นของเคลย์เมื่ออยู่ในสถานะที่มีน้ำ โดยประจุบวกของโซเดียมจะจับกับประจุลบของออกซิเจนในน้ำทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกตัวเข้าไปในระหว่างชั้นเคลย์ได้มากขึ้น ระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์จึงเพิ่มขึ้นและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นลดลง [27] แต่ชั้นเคลย์ยังคงไม่แยกออกจากกันอย่างอิสระ โซเดียมเบนโทไนต์จึงเป็นสารหล่อลื่นและป้องกันการแพร่ผ่านได้ดี นิยมใช้ในงานอุดรอยรั่ว ยาแนว หรือผสมกับพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงสมบัติการต้านทานการซึมผ่าน ช่วยเพิ่มค่ามอดูลัส ความแข็งแรง ความต้านทานต่อความร้อน และสามารถช่วยเพิ่มอัตราการย่อยสลายให้กับพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้

2.6.1.2 เบนโทไนต์ที่ไม่ดูดซับน้ำและไม่เกิดการพองตัว เรียกว่าแคลเซียมเบนโทไนต์ (Ca^{2+} bentonite) คือเบนโทไนต์ที่มีการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแคลเซียมเกิดขึ้นในระหว่างชั้นเคลย์เมื่ออยู่ในสถานะที่มีน้ำ ประจุบวกของแคลเซียมซึ่งเป็นประจุ 2^+ ทำให้แคลเซียมมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมกับชั้นเคลย์ได้ดีกว่าโซเดียม ดังนั้นโมเลกุลของน้ำจึงแทรกตัวเข้าไปจับกับประจุบวกของแคลเซียมได้ยากจึงทำให้แคลเซียมเบนโทไนต์มีความสามารถในการพองตัวน้อยกว่าโซเดียมเบนโทไนต์ [28] และนิยมใช้เป็นสารตีเทอร์เจนต์ในการดูดซับน้ำมันจากพืชและสัตว์

2.7 พอลิเมอร์เบนโทไนต์คอมพอสิต (Polymer/Bentonite composites) [29-33]

วัสดุคอมพอสิตเกิดจากการผสมหรือเกิดการสร้างพันธะต่อกันของวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป โดยมีสมบัติและองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันซึ่งจะต้องไม่เกิดการละลายเข้าด้วยกันวัสดุที่มี

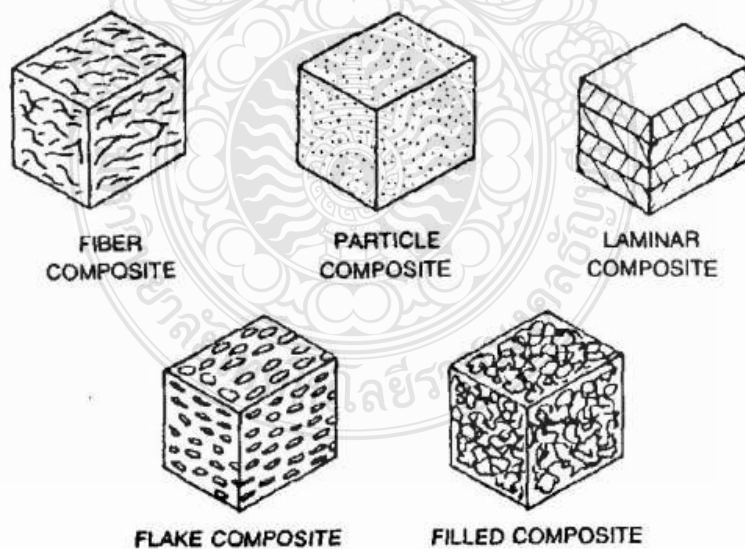
ปริมาณมากกว่าเรียกว่าเฟสหลัก วัสดุที่มีปริมาณน้อยกว่าเรียกว่าเฟสกระจาย มักเป็นวัสดุที่ผสมเพื่อเสริมแรง (Reinforcement materials) ซึ่งจะกระจายตัวอยู่ในวัสดุเฟสหลักช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเฟสหลักให้ดีขึ้นทำให้วัสดุใหม่ที่ได้มีสมบัติที่แข็งแรงกว่าแต่ละองค์ประกอบย่อย

2.7.1 การแบ่งประเภทของวัสดุคอมพอสิตนิยมใช้เฟสหลักเป็นเกณฑ์ในการแบ่ง ได้แก่ [29]

- เซรามิกคอมพอสิต (Ceramic matrix composites, CMC) ซึ่งมีวัสดุเซรามิกทำหน้าที่เป็นเฟสหลัก เช่น คอนกรีต เป็นต้น
- โลหะคอมพอสิต (Metal matrix composites, MMC) ในกลุ่มนี้จะมีโลหะเป็นเฟสหลัก เช่น อะลูมิเนียม เป็นต้น
- โพลีเมอร์คอมพอสิต (Polymer matrix composites, PMC) ซึ่งมีเฟสหลักเป็นพลาสติกหรือยาง

โดยสามารถแบ่งประเภทของวัสดุเสริมแรงที่ใช้ในงานคอมพอสิตได้ดังนี้ [30]

- วัสดุเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous composites)
- วัสดุเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นอนุภาค (Particulate composites) มีทั้งอนุภาคขนาดใหญ่และอนุภาคละเอียดจนถึงอนุภาคที่มีขนาดนาโนเมตร
- วัสดุเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นแผ่นหรือเกล็ด (Flake composites)
- วัสดุเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นชั้น หรือซ้อนกันเป็นแผ่น (Laminar or Layered composites) แสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ลักษณะการกระจายตัวของวัสดุประเภทต่างๆเมื่ออยู่ในวัสดุเฟสหลัก (Matrix phase) [33]

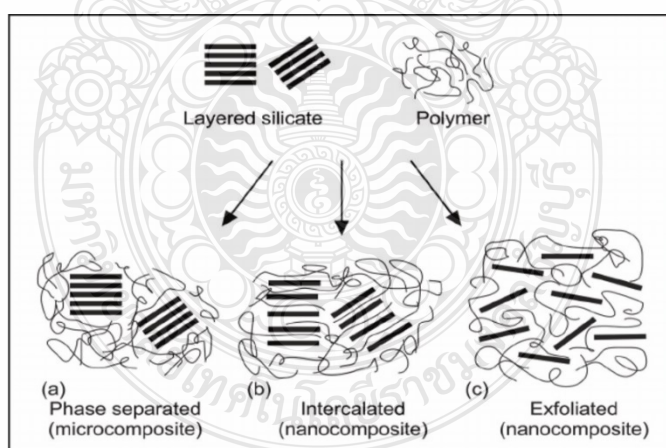
2.7.2 การกระจายตัวของเบนโทไนต์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์

การเติมเบนโทไนต์ในพอลิเมอร์จัดอยู่ในกลุ่มคอมพอสิตที่มีวัสดุเสริมแรงเป็นอนุภาค จากการศึกษาทางสัณฐานวิทยาพบพฤติกรรมแทรกตัวและคงอยู่ของเบนโทไนต์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ มีลักษณะเป็น 3 รูปแบบคือ [29, 32]

2.7.2.1 คอนเวนชันนอลคอมพอสิต (Conventional composite) เป็นไมโครคอมพอสิต ที่อนุภาคของเบนโทไนต์ไม่เกิดการกระจายตัวหรือแตกออกจากกัน กล่าวคือสายโซ่โพลิเมอร์แทรกเข้าไปในชั้นอนุภาคของเบนโทไนต์ไม่ได้ เบนโทไนต์จึงทำหน้าที่เพียงเป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์ เท่านั้น

2.7.2.2 อินเทอร์คาเลตนาโนคอมพอสิต (Intercalated nanocomposite) เกิดจาก สายโซ่โพลิเมอร์สามารถแทรกเข้าไปในชั้นอนุภาคของเบนโทไนต์ได้ ทำให้ระยะห่างระหว่าง ชั้นอนุภาคของเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นแต่ยังคงไม่แยกออกจากกันอย่างอิสระ โดยจะส่งผลให้พอลิเมอร์นาโน คอมพอสิตที่ได้มีสมบัติคล้ายวัสดุพวกเซรามิก

2.7.2.3 เอ็กซีโฟลิเอตนาโนคอมพอสิต (Exfoliated nanocomposite) เกิดจากชั้น อนุภาคของเบนโทไนต์แยกออกจากกันอย่างอิสระและกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้เบนโทไนต์เกิด อันตรกิริยากับพอลิเมอร์ได้มากที่สุดส่งผลให้สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพของนาโนคอมพอสิตที่ได้ เปลี่ยนไปจากเดิมมากที่สุด [33] โดยการเกิดนาโนคอมพอสิตในลักษณะนี้พบได้น้อยกว่าแบบอินเทอร์- คาเลตนาโนคอมพอสิต



ภาพที่ 2.8 รูปแบบการกระจายตัวของเบนโทไนต์ในพอลิเมอร์ [28]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1. Wang และคณะ [34] ได้ศึกษาสมบัติของพอลิแลกติกแอซิดที่ผสมกับเทอร์โม พลาสติกพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ (PLA/TPEE) ในอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 80/20 โดยน้ำหนัก และเติม

สารเชื่อมประสานมัลติฟังก์ชันอีพอกไซด์ (ADR) 0-1 ส่วนต่อร้อยละของพอลิเมอร์ผสม แล้วผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดแบบ ทดสอบหาค่าความเป็นผลึกโดยนำชิ้นงานไปอบอุณหภูมิคงที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0-60 นาที แล้วจึงทดสอบเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ พบว่า การเติม ADR ปริมาณมากขึ้นทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (T_{cc}) ลดลงเนื่องจากเกิดการขยายตัวของสายโซ่ทำให้จัดเรียงตัวได้ยากขึ้น โดยระดับความเป็นผลึกของ PLA ในทุกอัตราส่วนการเติม ADR มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาอบบ่มเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ที่เวลาในการอบบ่มเป็น 40 นาที โดยการเติม ADR ที่ 1 ส่วนต่อร้อยละของพอลิเมอร์ผสมทำให้ระดับความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นสูงที่สุดและช่วยปรับปรุงค่าความทนแรงดึงได้เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองเกิดความเข้ากันได้ดีมากขึ้น

2.8.2 Dogan และคณะ [35] ได้ศึกษาพฤติกรรมความจำรูปร่างที่เกิดจากความร้อน ศึกษาการย่อยสลายและความเข้ากันได้ทางชีวภาพของพอลิแลกติกแอซิดที่ผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (PLA/TPU) ปริมาณร้อยละ 20 และ 50 โดยน้ำหนักและเติมสารเชื่อมประสาน 1,4-Phenylene diisocyanate (PDI) ที่ร้อยละ 0.5, 1 และ 3 โดยน้ำหนัก หลอมผสมผ่านเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดแบบ พบว่าการเติม PDI ช่วยเพิ่มความสามารถในการคืนรูปร่างได้ดีกว่าเดิมและไม่เติม และพอลิเมอร์ผสมมีอัตราคืนรูปร่างได้ดีที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งการผสม TPU ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักมีอัตราการคืนรูปร่างสูงที่สุดและจากผลของการย่อยสลายโดยเอนไซม์พบว่า PLA บริสุทธิ์มีอัตราการย่อยสลายเร็วกว่า TPU ดังนั้นการผสม TPU จึงช่วยชะลอการเสื่อมสภาพลดอัตราการย่อยสลายของ PLA ได้

2.8.3 Abdo และคณะ [36] ศึกษาสัณฐานวิทยาจากพฤติกรรมการแตกหักของพอลิบิฟิทีลีน เทเรฟทาเลต (PBT) ที่ผสมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเตอร์อีลาสโตเมอร์ (TPEE) และเติมเส้นใยแก้วแบบสั้น (GF) โดยมีอัตราส่วนผสม PBT/GF เป็น 90/10 โดยน้ำหนัก และผสม PBT/TPEE/GF เป็น 80/10/10 โดยน้ำหนัก ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดแบบ ทดสอบความทนแรงดึงโดยใช้อัตราการดึงเป็น 2, 20, 200 และ 400 มิลลิเมตร/นาที และตรวจสอบสัณฐานวิทยา พบว่า TPEE เพิ่มความเหนียวให้กับ PBT เมทริกซ์ได้ในทุกอัตราการดึง ซึ่งความเหนียวของพอลิเมอร์คอมพอสิตจะมีค่าลดลงตามอัตราการดึงที่มากขึ้นและการเติม TPEE ส่งผลให้ GF เกิดอันตรกิริยาที่ไม่ดีกับ PBT เมทริกซ์

2.8.4 Najafi และคณะ [37] ศึกษาสภาวะในการผสมที่มีผลต่อ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา และการแตกตัวของอนุภาคนาโนมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (Cloisite 30B) ที่เติมในพอลิแลกติกแอซิด (PLA) และเติมสารเชื่อมประสาน (Joncryl) ผสมโดยการหลอมผ่านเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดแบบ โดยผสม PLA/Cloisite 30B ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการอัดรีดครั้งที่ 1 นำเม็ดพอลิเมอร์ที่ได้ไปทดสอบ พบว่า ระดับความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นมากกว่ากระบวนการอื่นๆ จากนั้นนำเม็ดมาสเตอร์แบทช์ PLA/Cloisite 30B ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักมาเติม Joncryl ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แล้วผ่านกระบวนการอัดรีดครั้งที่ 2 นำเม็ดมาสเตอร์แบทช์ที่ได้ไปทดสอบพบว่าอนุภาคนาโน Cloisite 30B เกิดการแตกตัวแบบเอ็กซีฟิเลชัน (Exfoliation) กระจายตัวได้ดี ส่งผลให้อัตราการ

ไหลเพิ่มขึ้น โดยอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่ลดลงยืนยันได้ถึงการเข้ากันได้ดีของ Cloisite 30B กับ Joncryl ใน PLA เมทริกซ์ และยังสามารถช่วยปรับปรุงค่าความทนแรงดึงได้

2.8.5 Liu และคณะ [38] ศึกษาผลของการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (Organomontmorillonite modified, OMMT) ที่ร้อยละ 0.5-2 โดยน้ำหนักและผงไม้ (Wood flour, WF) ในพอลิแล็กติกแอซิด (PLA) โดยผสมในอัตราส่วนต่างๆด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ แล้วขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดแบบ พบว่า การเติม OMMT ที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มีค่าความทนแรงกระแทก ความทนแรงดัดโค้ง และความทนแรงดึงสูงที่สุด และมีระดับความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม OMMT ที่เพิ่มขึ้น ได้นำ PLA/OMMT ในอัตราส่วนต่างๆข้างต้นมาผสมกับ WF ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก พบว่าระดับความเป็นผลึกมีค่าสูงกว่าการเติม OMMT เพียงอย่างเดียว แต่ทำให้ค่าความทนแรงกระแทก ความทนแรงดัดโค้ง และค่าความทนแรงดึงลดลงในทุกอัตราส่วน จากหลักฐานวิทยาพบว่า OMMT ไม่เพียงแต่กระจายตัวในเมทริกซ์ได้ดีแต่ยังกระจายตัวเข้าไปในผนังเซลล์ WF ด้วย นั่นคือ OMMT ช่วยเพิ่มการยึดเกาะที่ดีระหว่าง WF กับ PLA เมทริกซ์ อย่างไรก็ตามการเติม OMMT ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ทำให้สมบัติเชิงกลลดลงเนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคนาโนเคลย์

2.8.6 Aghjeh และคณะ [39] ศึกษาสมบัติการไหล สมบัติทางความร้อนและสัญญาณวิทยาของพอลิแล็กติกแอซิด (PLA) ที่ผสมเอทิลีนไวนิลอะซิเตด (EVA) และเติมนาโนเคลย์ (Cloisite 30B (MMT-Na ดัดแปรด้วย bis-(2-hydroxyethyl)) โดยผสม EVA ร้อยละ 10, 25, 50, 75 และ 90 โดยน้ำหนัก เพื่อหาสูตรที่มีสมบัติเหมาะสมที่สุดมาเติม Cloisite 30B ที่ 1, 3 และ 5 ส่วนต่อร้อยละของพอลิเมอร์ผสม ผสมผ่านเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ทดสอบพบว่าทุกปริมาณการเติม EVA มีดัชนีการหลอมไหลใกล้เคียงกันนั่นคือ EVA ช่วยลดความหนืดของ PLA ผลการตรวจสอบสัญญาณวิทยาโดย SEM พบว่าที่อัตราส่วนผสม PLA/EVA เป็น 75/25 เฟส EVA กระจายตัวได้ดีใน PLA เมทริกซ์ จึงใช้อัตราส่วนนี้มาเติม Cloisite 30B พบว่า การเติม Cloisite 30B ในอัตราส่วนต่างๆทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (T_{cc}) เพิ่มขึ้น และที่ปริมาณการเติม 1 ส่วนต่อร้อยละของพอลิเมอร์ผสมมีระดับความเป็นผลึกสูงที่สุด จากผล SEM พบว่า Cloisite 30B ช่วยลดขนาดเฟสและกระจายขนาดเฟสของ EVA ได้ดี และจากผล TEM พบว่าการเติมทั้ง Cloisite 30B และสารเชื่อมประสานลงใน PLA เมทริกซ์ ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่าง PLA กับสารเติมแต่งทั้งสองดียิ่งขึ้น

2.8.7 Ebadi-Dehaghani และคณะ [40] ได้ศึกษาสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด (PLA) ที่ผสมพอลิโพรพิลีน (PP) ในปริมาณ 90/10, 75/25 และ 50/50 โดยน้ำหนัก และเติมนาโนเคลย์ (Cloisite 30B) ปริมาณ 1, 3, 5 และ 7 ส่วนต่อร้อยละของพอลิเมอร์ผสม ผสมผ่านเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดแบบ พบว่าความทนแรงดึงและมอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PLA จากผล SEM พบว่ามีการกระจายตัวที่ดีของเฟส PP ที่อัตราส่วน PLA/PP ร้อยละ 75/25 โดยน้ำหนัก จึงนำอัตราส่วนนี้มาเติม Cloisite 30B ที่ปริมาณต่างๆผลการทดสอบ พบว่า การเติม Cloisite 30B ทุกอัตราส่วนทำให้ค่าความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ แต่มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ Cloisite 30B ที่เพิ่มขึ้น โดยการเติมที่ 1 และ 7 ส่วนต่อร้อยละของพอลิเมอร์ผสม

มีค่าความทนแรงกระแทกเป็น 4.5 และ 3.5 กิโลจูล/ตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่ง PLA มีค่าความทนแรงกระแทกเป็น 3 กิโลจูล/ตารางเมตร และยังสามารถเพิ่มความทนแรงกระแทกให้ดียิ่งขึ้นได้โดยการเติมสารเชื่อมประสานเพื่อเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาค Cloisite 30B

2.8.8 Wacharawichanant และคณะ [41] ศึกษาความเข้ากันได้และศึกษาสมบัติเชิงกลสมบัติทางความร้อนของการเติมเคลย์ที่ 3, 5, และ 7 ส่วนต่อร้อยละของพอลิเมอร์ผสม พอลิแลกติกแอซิด (PLA) ที่เติมโพรพิลีนเอทิลีนโคพอลิเมอร์ (Propylene-ethylene copolymer, PEC) ปริมาณร้อยละ 5-20 โดยน้ำหนัก แล้วหลอมผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดแบบ ตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วย SEM พบว่า การผสม PEC ในอัตราส่วนต่างๆทำให้เกิดการแยกเฟสกับ PLA อย่างชัดเจน แต่เมื่อเติมเคลย์ทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเข้ากันได้มากขึ้นในทุกอัตราส่วนสอดคล้องกับผล XRD ที่แสดงการแทรกตัวของ PLA เข้าไปในชั้นอนุภาคของเคลย์ ซึ่งเรียกได้ว่าการเกิดอินเทอร์คาเลต (Intercalated) ดังนั้นเคลย์จึงเป็นเสมือนสารช่วยประสาน โดยการเติม PEC ที่มากขึ้นส่งผลให้มีค่าการยึดตัวเพิ่มขึ้น ช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA ได้ และการเติมเคลย์ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีค่ายังสัมมอดุลัสและค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus) เพิ่มขึ้น

2.8.9 สุภารัตน์ ปันพุ่มโพธิ์ และคณะ [42] ได้ศึกษาความสามารถในการย่อยสลายของพอลิแลกติกแอซิด (PLA) ด้วยกระบวนการทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ในดินจากหลุมฝังกลบขยะและตะกอนน้ำเสีย ทดสอบหาอัตราส่วนระหว่างดินจากหลุมฝังกลบขยะและตะกอนน้ำเสียที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายแผ่นซีท PLA โดยตรวจวัดน้ำหนักของแผ่นซีท PLA ที่หายไป อัตราส่วนระหว่างดินจากหลุมฝังกลบขยะกับตะกอนน้ำเสียที่ทดสอบเป็นร้อยละ 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 โดยน้ำหนัก ระยะเวลาในการทดสอบ 45 วัน ทดสอบในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 31.7 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 59.5 พบว่า อัตราส่วนร้อยละ 25/75 โดยน้ำหนัก มีค่า pH ประมาณ 6.9 และค่าความชื้นในดินผสมเท่ากับร้อยละ 9.64 มีค่าน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนักของแผ่นซีท PLA สูงที่สุดคือร้อยละ 25.45 นั่นคือ ที่อัตราส่วนนี้มีสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายแผ่นซีท PLA มากที่สุด

2.8.10 Ozkoc และคณะ [43] ศึกษาสมบัติของพอลิแลกติกแอซิด (PLA) ที่เติมพลาสติกไซเซออร์คือพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ปริมาณคงที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และเติมเคลย์ (Cloisite 30B) ร้อยละ 0, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก หลอมผสมที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส พบว่า จากผล TEM และผล XRD ของคอมพอสิตที่เติมเคลย์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก แสดงการเกิดโครงสร้างแบบอินเทอร์คาเลต (Intercalated) ในส่วนมากและเกิดเอ็กซ์โฟลิเอต (Exfoliated) ได้บางส่วน เมื่อเติมเคลย์ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเกิดการเกาะกลุ่มกันของเคลย์มากขึ้น ซึ่งการเติมเคลย์ปริมาณต่างๆช่วยปรับปรุงค่ามอดุลัสได้และมีผลต่อค่าความทนแรงดึงของ PLA เพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เคลย์ยังสามารถลดอัตราการสลายตัวของ PLA ได้อย่างมีนัยสำคัญ กรณี PLA ที่เติมพลาสติกไซเซออร์และเคลย์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พบว่าสามารถเกิดเอ็กซ์โฟลิเอตของเคลย์ได้มากกว่าเนื่องจากพลาสติกไซเซออร์ช่วยลดน้ำหนักโมเลกุลของ PLA และมีแรงเฉือนในกระบวนการผสมช่วยให้โมเลกุล PLA แทรกตัวเข้าไปในชั้นอนุภาคของเคลย์ได้ง่ายขึ้น

อย่างไรก็ตามการเติมพลาสติกไซเซออร์ควบคู่กับเคลย์ส่งผลให้วัสดุมีสมบัติโดยรวมด้อยลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ PLA ที่เติมและไม่เติมเคลย์ในทุกอัตราส่วน

2.8.11 ธาริณี นามพิชญ์ และคณะ [44] ศึกษาการปรับปรุงความเหนียวและสมบัติทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิด (PLA) ที่ผสมกับยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ (ENR) ในอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 90/10 โดยน้ำหนัก และเติมออกแกโนเคลย์ชนิด Cloisite 25A (C25A) และ Twice functionalized organoclay (TFC) ร้อยละ 1, 3, 5 และ 7 โดยน้ำหนัก หลอมผสมผ่านเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ จากนั้นขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดแบบ พบว่า การเติมเคลย์ทั้ง 2 ชนิดไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วและอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์ แต่ทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (T_{cc}) ลดลงและมีระดับความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเคลย์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เคลย์ยังช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนได้ โดยการเติม TFC ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ช่วยปรับปรุงสมบัติของ PLA/ENR ได้ดีที่สุด และทำให้มีอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน (HDT) สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆซึ่งมีค่าสูงกว่าการเติม C25A ในพอลิเมอร์ผสมและมีความเป็นไปได้ในการศึกษาการขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดแบบต่อไป

2.8.12 เกรียงไกร พงศ์ธนายุต [45] ศึกษาการเตรียมพอลิแลกติกแอซิด (PLA) ผสมกับยางธรรมชาติ (NR) และยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ (ENR) ในอัตราส่วนร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนัก หลอมผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดแบบ ตรวจสอบสัณฐานวิทยาโดย SEM พบว่าทั้ง PLA/NR และ PLA/ENR ที่ร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก ไม่พบอนุภาคของยางบนผิวหน้า เนื่องจาก NR และ ENR สามารถเกิดอันตรกิริยากับ PLA ได้บางส่วน เมื่อเติมปริมาณมากขึ้นที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พบเฟสของยางกระจายอยู่ใน PLA เมทริกซ์เป็นลักษณะคล้ายหยดน้ำ โดยการเติม NR ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้ PLA มีความเหนียวเพิ่มขึ้น และมีระดับความเป็นผลึกมากกว่าการเติม ENR ที่อัตราส่วนเดียวกัน อย่างไรก็ตามการเติม NR หรือ ENR ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ PLA มีเสถียรภาพทางความร้อนลดลง นอกจากนี้ทั้งค่ามอดูลัสและค่าความทนแรงดึงก็ลดลงด้วยเช่นกัน

2.8.13 Ishihara และคณะ [46] ศึกษาการปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลกติกแอซิด (PLA) โดยผสมกับเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (TPE) ที่เป็นโคพอลิเมอร์ของแอมโรมาติกพอลิเอสเทอร์ (ส่วนที่แข็ง) กับอะลิฟาติกพอลิอีเทอร์ (ส่วนที่อ่อน) โดยผสมที่ร้อยละ 2.5, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก หลอมผสมผ่านเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดแบบ เปรียบเทียบการทดสอบของชิ้นงานที่ไม่อบและอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำมาทดสอบ พบว่า การเติม TPE สามารถเกิดอันตรกิริยากับ PLA ได้ดี จากสัณฐานวิทยาตรวจสอบโดย SEM พบว่า TPE ช่วยลดรอยแตกร้าวบนผิวหน้าได้ตามปริมาณการเติมที่เพิ่มขึ้น เมื่อทดสอบเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ผ่านการอบพบว่ามีค่าความทนแรงกระแทกต่ำกว่าชิ้นงานที่ผ่านการอบและมีค่าความทนแรงกระแทกสูงที่สุดเมื่อเติม TPE ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และชิ้นงานที่ผ่านการอบยังมีค่าความทนแรงดึงและค่ามอดูลัสที่สูงกว่า เนื่องจากการอบทำให้เกิดผลึกสเฟียลต์ที่สมบูรณ์ช่วยให้พอลิเมอร์ต้านทานต่อการเสียรูปได้ดีกว่า

2.8.14 Bitinis และคณะ [47] ศึกษาสมบัติของพอลิแลกติกแอซิด (PLA) ที่ผสมกับยางธรรมชาติ (NR) ในอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 90/10 โดยน้ำหนัก และเติมอ็อกโซไดโนคลอยด์ 3 ชนิดคือ โซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ไม่ดัดแปร (CNa⁺) และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรชนิด 2 ชนิดคือ Cloisite 15A (C15A) และ Cloisite 30B (C30B) ในอัตราส่วนคงที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก หลอมผสมผ่านเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดแบบ พบว่า การเติม NR ที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักเพียงอย่างเดียวสามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกและช่วยลด T_{cc} ของ PLA ได้ โดยการผสม PLA/NR/CNa⁺ นั้นส่งผลให้ PLA เกิดผลึกเร็วที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับ TEM ไมโครกราฟที่แสดงให้เห็นว่า CNa⁺ ก่อตัวเป็น Agglomerates ในเฟส PLA แต่ Agglomerates เหล่านี้คงยังแสดงผลเป็นสารก่อผลึกที่ดีกว่าเคลย์ดัดแปร โดย PLA/NR/C15A และ PLA/NR/C30B มี T_{cc} สูงที่สุด ทั้งนี้อาจเพราะเคลย์ดัดแปรเข้าไปขัดขวางการทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกของ NR ใน PLA กล่าวคือโมเลกุล PLA และ NR สามารถแทรกเข้าไปในชั้นอนุภาคของเคลย์ดัดแปรได้มากจึงเป็นเสมือนสารประสานระหว่าง PLA และ NR อย่างไรก็ตาม การเติมเคลย์ทั้ง 3 ชนิดทำให้พอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น

2.8.15 Wang และคณะ [48] ศึกษาผลของการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (OMMT) เป็นสารเชื่อมประสานในพอลิแลกติกแอซิด (PLA) ที่ผสมกับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ในอัตราส่วนร้อยละ 5-30 โดยน้ำหนัก พบว่าอัตราส่วนที่มีสมบัติเหมาะสมระหว่าง PLA/EPDM คือร้อยละ 90/10 โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงนำอัตราส่วนนี้มาเติม OMMT ที่ปริมาณ 0.5, 1, 2, 3 และ 5 ส่วนต่อร้อยละของพอลิเมอร์ผสม ผสมผ่านเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการอัดแบบ พบว่า PLA/EPDM ที่เติม OMMT 1 ส่วนต่อร้อยละของพอลิเมอร์ผสม มีความทนแรงดึงและความทนแรงกระแทกสูงกว่าทุกอัตราส่วน และยังพบว่า PLA/EPDM ที่เติม OMMT ในทุกอัตราส่วน มีสมบัติเชิงกลดีกว่า PLA ที่เติม OMMT เพียงอย่างเดียว จากผล SEM พบว่าการเติม OMMT ช่วยลดขนาดเฟส EPDM ที่กระจายตัวใน PLA เมทริกซ์ให้มีขนาดเล็กลงตามปริมาณการเติม OMMT ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงสมบัติเป็นสารช่วยประสานของ OMMT ที่เพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ EPDM

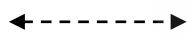
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

3.1 แผนการดำเนินงาน

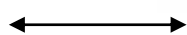
ตารางที่ 3.1 แสดงแผนการดำเนินงานของโครงการวิจัย

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานของโครงการวิจัย

ลำดับ	ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาดำเนินการ (เดือน)												
		2562												
		ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	มิ.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย		
1	ค้นคว้ารวบรวมข้อมูล	←-----→												
2	วางแผนการดำเนินงาน			←-----→										
3	เตรียมวัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ			←-----→										
4	ขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติก						←-----→							
5	ทดสอบสมบัติของชิ้นงาน						←-----→							
6	วิเคราะห์ผลการทดลอง							←-----→						
7	สรุปผล, จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์									←-----→				



แสดงแผนการดำเนินงาน



แสดงการดำเนินงานแล้ว

3.2 วัตถุดิบ และสารเคมี

3.2.1 เม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) เกรด 4043D (ภาพที่ 3.1) จากบริษัท Nature Work LLC จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีสมบัติแสดงดังตารางที่ 3.2 (ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)



ภาพที่ 3.1 เม็ดพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด (PLA 4043D)

ตารางที่ 3.2 สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด (PLA 4043D) [49]

สมบัติ	มาตรฐานการทดสอบ	หน่วย	ค่าที่วัดได้
ความหนาแน่น	ASTM D792	g/cc	1.24
ดัชนีการหลอมไหล (210°C/2.16 kg)	ASTM D1238	g/10 min	6
ความทนแรงดึง	ASTM D882	MPa	60
มอดุลัสแรงดึง	ASTM D882	MPa	3.6
การยืดตัว	ASTM D882	%	6
ความทนแรงกระแทกที่ 23°C (Notched Izod impact strength)	ASTM D256	J/m	16
อุณหภูมิโค้งงอด้วยความร้อน (Load 0.45 MPa)	ASTM E2092	°C	55

3.2.2 เม็ดพลาสติกโคพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์ (Thermoplastic copolyester elastomer) ชื่อทางการค้าคือ Hytel เกรด G3548 NC010 (ภาพที่ 3.2) จากบริษัท DuPont de Nemours ประเทศลักเซมเบิร์ก ซึ่งมีสมบัติดังตารางที่ 3.3

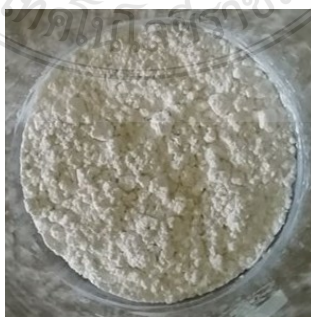


ภาพที่ 3.2 เม็ดพลาสติกโคพอลิเอสเตอร์อีลาสโตเมอร์ (Hytrel G3548 NC010)

ตารางที่ 3.3 สมบัติของโคพอลิเอสเตอร์อีลาสโตเมอร์ (Hytrel G3548 NC010) [50]

สมบัติ	มาตรฐานการทดสอบ	หน่วย	ค่าที่วัดได้
ความหนาแน่น	ISO 1183	kg/m ³	1150
มอดุลัสแรงดึง	ISO 527-1/-2	MPa	25
ความทนแรงดึง	ISO 527-1/-2	MPa	10
การยืดตัว	ISO 527-1/-2	%	200
ความแข็ง (Shore D)	ISO 868	-	24
ความทนแรงกระแทกที่ 23°C (Notched Izod impact strength)	ISO 179/1eA	kJ/m ²	N/A
อุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน (Load 10 N, 50°C/h)	ISO 306	°C	70

3.2.3 เบนโทไนต์ (Bentonite, BN) ชื่อทางการค้าคือ BENTOLITE H จากบริษัท BYK-Chemie GmbH ประเทศเยอรมัน (ภาพที่ 3.3) มีสมบัติและส่วนประกอบต่างๆ ดังตารางที่ 3.4 (ได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)



ภาพที่ 3.3 เบนโทไนต์ (BENTOLITE H)

ตารางที่ 3.4 สมบัติและส่วนประกอบของเบนโทไนต์ (BENTOLITE H) [51]

สมบัติ	ส่วนประกอบ	ร้อยละ
ลักษณะ	ผงสีขาว	SiO ₂ 68.1
ความขาว	79 (GEB)	Al ₂ O ₃ 13.5
ปริมาณความชื้น	10% (สูงสุด)	MgO 2.9
ค่า pH	9.5	Fe ₂ O ₃ 0.7
ความหนืด	5 (cps)	CaO 0.9
ค่าการบวมตัว	16 (mls)	Na ₂ O 3.5
กลิ่น	ไม่มี	K ₂ O 0.1
ความสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation exchange capacity, CEC)	0.71 (meq/g clay)	TiO ₂ 0.2 อื่นๆ 9.1

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมวัสดุ

3.3.1.1 เครื่องชั่ง ชื่อรุ่นทางการค้า PB 303 L บริษัท Mettler Toledo ประเทศไทย (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

3.3.1.2 ตู้อบลมร้อน ชื่อรุ่นทางการค้า Binder FD115 บริษัท BINDER GmbH ประเทศเยอรมัน (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

3.3.2 เครื่องผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน

3.3.2.1 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin screw extruder) ชื่อรุ่นทางการค้า LTE-20-32 บริษัท แล็บเทคเอนจิเนียริง (LabTech Engineering) จำกัด ประเทศไทย มีอัตราส่วนความยาวของสกรู/เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (Screw length/Screw diameter ratio, L/D) เท่ากับ 32 ชนิด สกรูหมุนทิศทางเดียวกัน (Co-rotating) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูเท่ากับ 20 มิลลิเมตร (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

3.3.2.2 เครื่องฉีดแบบ (Injection molding) ชื่อรุ่นทางการค้า Arberg allrounder 470C-golden ประเทศเยอรมัน ขนาดแรงปิดแม่พิมพ์สูงสุด 150 ตัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูเท่ากับ 50 มิลลิเมตร (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

3.3.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

3.3.3.1 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (Impact tester) ชื่อรุ่นทางการค้า Ceast Resil impactor ประเทศอิตาลี (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

3.3.3.2 เครื่องยูนิเวอร์แซล (Universal testing machine) ชื่อรุ่นทางการค้า Hounsfield H 50 KS ประเทศอังกฤษ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

3.3.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ชื่อรุ่นทางการค้า Hitachi SU5000 ประเทศญี่ปุ่น (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

3.3.3.4 เครื่องทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน (Heat distortion temperature, HDT) และอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต (Vicat softening temperature, VST) ชื่อรุ่นทางการค้า HDT Vicat 6911, Ceast ประเทศอิตาลี (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

3.3.3.5 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) ชื่อรุ่นทางการค้า Shimadzu รุ่น DSC-60 plus series ประเทศญี่ปุ่น (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

3.3.3.6 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD) ชื่อรุ่นทางการค้า Panalytical X'pert PRO MPD pw 3040/60, Malvern Panalytical ประเทศเนเธอร์แลนด์ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

3.3.3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) ชื่อรุ่นทางการค้า JEOL/JEM-2100 Plus ประเทศญี่ปุ่น (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

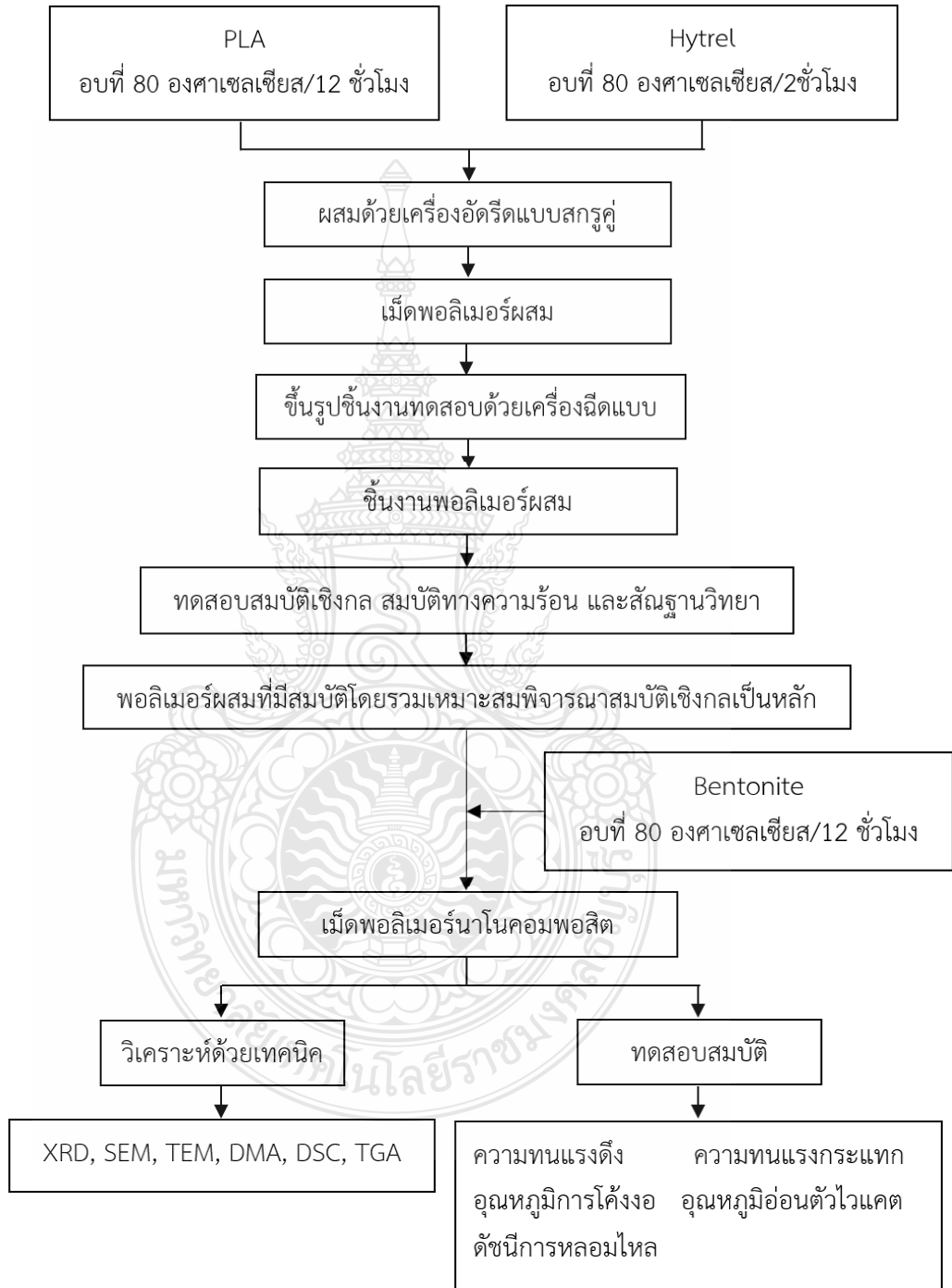
3.3.3.8 เครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล ชื่อรุ่นทางการค้า CEST MF20, Intron ประเทศอิตาลี (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

3.3.3.9 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (Thermogravimetric analyzer, TGA) ชื่อรุ่นทางการค้า Shimadzu TG/DTA: DTG-60 ประเทศญี่ปุ่น (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

3.3.3.10 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical analyzer, DMA) ชื่อรุ่นทางการค้า TGA/SDTA 851^c ของบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ (คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

ภาพที่ 3.4 แสดงแผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 3.4 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

นำเม็ด PLA มาอบโดยใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบ 12 ชั่วโมง และอบเม็ด Hytrel ที่อุณหภูมิเดียวกันแต่ใช้เวลาอบ 2 ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ดพลาสติกมาผสมกันในอัตราส่วนดังตารางที่ 3.5 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ชนิดหมุนทิศทางเดียวกัน (ภาพที่ 3.5) ของผสมที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นยาวและถูกดึงผ่านน้ำเพื่อทำให้เย็นตัวแล้วตัดเป็นเม็ดทรงกระบอก โดยมีภาวะในการผสมดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนผสมของ PLA/Hytrel

สูตร	PLA (wt%)	Hytrel (wt%)
1	100	0
2	95	5
3	90	10
4	85	15
5	80	20
6	75	25
7	70	30
8	0	100

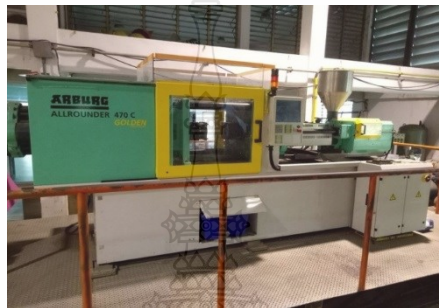
ตารางที่ 3.6 ภาวะการผสม PLA/Hytrel ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่

บริเวณ	ค่าที่ตั้ง
โซนป้อน (Feed zone)	180 องศาเซลเซียส
โซนอัด (Compression zone)	190 องศาเซลเซียส
โซนหลอม (Metering zone)	200 องศาเซลเซียส
โซนดายน์ (Die zone)	210 องศาเซลเซียส
ความเร็วรอบสกรู	50 รอบต่อนาที



ภาพที่ 3.5 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (LAB TECH LTE-20-32)

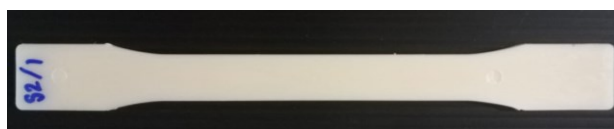
หลังจากนั้นนำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปอบโดยใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบ 4 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น แล้วจึงนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดแบบ (ภาพที่ 3.6) โดยใช้แม่พิมพ์รูปดัมเบลล์และรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งได้ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ (ภาพที่ 3.7) และชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ภาพที่ 3.8) โดยใช้อุณหภูมิและภาวะในการฉีดขึ้นงานดังตารางที่ 3.7 จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ แล้วจึงเลือกอัตราส่วนการผสมที่เหมาะสมที่สุดซึ่งพิจารณาจากค่าความทนแรงกระแทกเป็นหลักเพื่อเตรียมเป็นพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตต่อไป



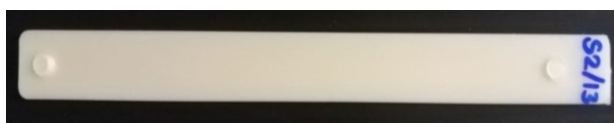
ภาพที่ 3.6 เครื่องฉีดแบบ (Arberg allrounder 470C-golden)

ตารางที่ 3.7 การตั้งอุณหภูมิและภาวะในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานของเครื่องฉีดแบบ

อุณหภูมิ/ภาวะ	ค่าที่ตั้ง
โซนป้อน (Feed zone)	190 องศาเซลเซียส
โซนอัด (Compression zone)	200 องศาเซลเซียส
โซนหลอม (Metering zone)	220 องศาเซลเซียส
โซนหัวฉีด (Nozzle)	230 องศาเซลเซียส
ความเร็วรอบสกรู	70 รอบต่อนาที (rpm)
แรงดันฉีด	700 บาร์
แรงดันย้า	650 บาร์
เวลาในการเย็นตัว	35 วินาที
ปริมาตรของชิ้นงาน	31 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ชิ้นงานรูปดัมเบลล์) 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า)



ภาพที่ 3.7 ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ที่ได้จากการฉีดแบบ



ภาพที่ 3.8 ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ได้จากการฉีดแบบ

3.5.2 การเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

เตรียม PLA/Hytrel/BN โดยการนำเม็ด PLA และเบนโทไนด์มาอบโดยใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบ 12 ชั่วโมง และอบเม็ด Hytrel ที่อุณหภูมิเดียวกัน แต่ใช้เวลาอบ 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการผสมเม็ด PLA, Hytrel และเบนโทไนด์เข้าด้วยกันโดยใช้อัตราส่วนผสมดังตารางที่ 3.8 แล้วนำไปหลอมผสมผ่านเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยภาวะของการผสมแสดงในตารางที่ 3.6 เมื่อได้เม็ดพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตแล้วนำมาอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบ 4 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากเม็ด แล้วจึงนำมาฉีดด้วยเครื่องฉีดแบบโดยใช้อุณหภูมิและภาวะในการฉีด ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.8 อัตราส่วนผสมของ PLA/Hytrel/BN

สูตร	70/30 PLA/Hytrel (wt%/wt%)	BN (phr)
1	100	0
2	100	1
3	100	3
4	100	5

3.6 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

3.6.1 ทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact strength)

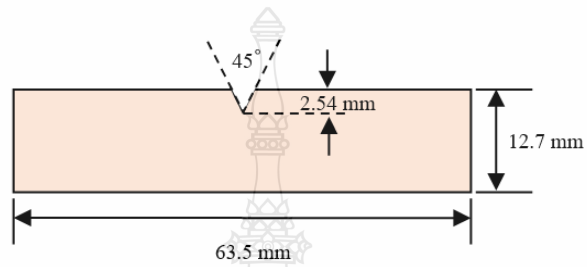
เตรียมชิ้นงานขนาด 12.7 × 63.5 × 3.0 มิลลิเมตร (กว้าง × ยาว × หนา) ทำรอยบากตรงกึ่งกลางของชิ้นงาน โดยให้รอยบากมีความลึก 2.54 มิลลิเมตร ตามภาพที่ 3.9 และ 3.10 ทดสอบความทนแรงกระแทกของชิ้นงานแบบไอซอด ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (ภาพที่ 3.11) ตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยจับชิ้นงานด้วยหัวจับในแนวตั้ง จากนั้นตีด้วยตุ้มน้ำหนักขนาด 1 จูล เหยียงทำมุม 150 องศา ในแนวเส้นบรรจบระหว่างจุดที่จับชิ้นงานและเส้นกึ่งกลางของรอยบากที่อยู่ด้านเดียวกับรอยบาก ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และคำนวณค่าความทนแรงกระแทกของชิ้นงานตามสมการที่ 3.1

$$\text{Impact strength} = \frac{\text{Energy (J)}}{D \text{ (m)} \times W \text{ (m)}} \quad (\text{J/m}^2) \quad (3.1)$$

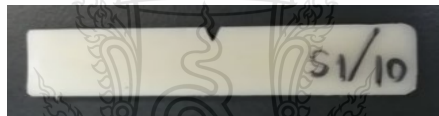
โดยค่า Energy คือ ค่าพลังงานการกระแทก (J)

D คือ ความลึกหลังรอยบาก (m)

W คือ ความกว้างหลังรอยบาก (m)



ภาพที่ 3.9 ชิ้นงานความทนแรงกระแทกแบบไอซอดที่มีรอยบากตามมาตรฐาน ASTM D256



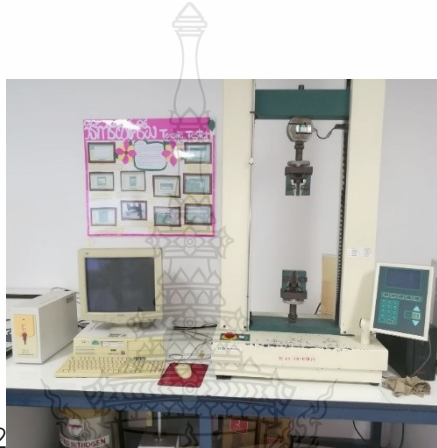
ภาพที่ 3.10 ชิ้นงานความทนแรงกระแทกแบบไอซอดที่มีรอยบากที่เตรียมได้ ตามมาตรฐาน ASTM D256



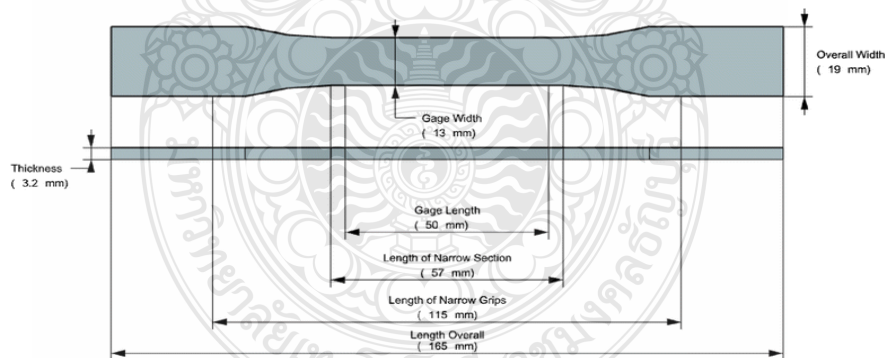
ภาพที่ 3.11 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (Ceast, Resil impactor)

3.6.2 การทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง (Tensile properties)

นำชิ้นงานรูปดัมเบลล์มาทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงด้วยเครื่องยูนิเวอร์แซล (ภาพที่ 3.12) ตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภทที่ 1 (ภาพที่ 3.13) โดยก่อนทดสอบให้เก็บชิ้นงานไว้ในที่สภาวะห้องทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อลดความเครียดภายในชิ้นงาน จากนั้นทดสอบภายใต้ภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ระยะดึง (Gauge length) 50 มิลลิเมตร ขนาด Load cell เท่ากับ 25 กิโลนิวตัน อัตราการยืดคงที่เท่ากับ 10 มิลลิเมตร/นาที ผลการทดสอบได้ค่าความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์กับการยืดตัว ณ จุดขาด



ภาพที่ 3.12 เครื่องยูนิเวอร์แซล (Hounsfield, H 50 KS)

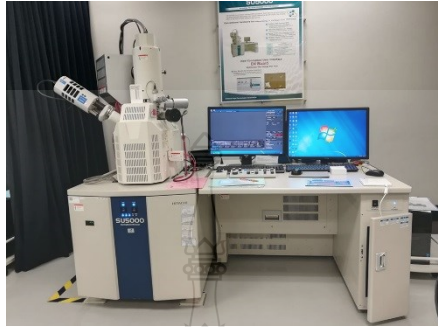


ภาพที่ 3.13 ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ ตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภทที่ 1 [52]

3.6.3 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) (ภาพที่ 3.14) โดยตรวจสอบผิวหน้ารอยแตกของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความทนกระแทกแบบไอซอดที่มีรอยบาก นำชิ้นงานที่มีความหนาประมาณ 3

มิลลิเมตร มาติดบนแท่นอะลูมิเนียมด้วยเทปคาร์บอน จากนั้นเคลือบชิ้นงานด้วยทองในเครื่องเคลือบระบบสุญญากาศ เพื่อให้ชิ้นงานเกิดการนำไฟฟ้าได้ แล้วตรวจสอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ศักย์ไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์ และใช้กำลังขยาย 1,000 และ 5,000 เท่า



ภาพที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Hitachi, SU5000)

3.6.4 การทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต (Vicat softening temperature, VST)

ทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตด้วยเครื่องทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของพลาสติก (ภาพที่ 3.15) โดยเตรียมชิ้นงานขนาด $12.0 \times 12.0 \times 3.0$ มิลลิเมตร (กว้าง \times ยาว \times หนา) ตามมาตรฐาน ASTM D1525 Rate A โดยวางชิ้นงานลักษณะดังภาพที่ 3.16 ให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 50 ± 0.2 องศาเซลเซียส/ชั่วโมง ใช้น้ำมันซิลิโคนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน อุณหภูมิเริ่มต้นทดสอบเป็น 25 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุดในการทดสอบเป็น 200 องศาเซลเซียส และน้ำหนักกด 10.03 นิวตัน บันทึกอุณหภูมิที่หัวกดทดสอบกดลงบนผิวชิ้นงานถึงลงไปเป็นระยะ 1 มิลลิเมตร



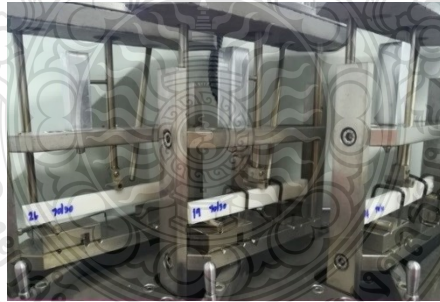
ภาพที่ 3.15 เครื่องทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อน (Ceast, HDT Vicat 6911)



ภาพที่ 3.16 ลักษณะห้วกดและการวางชิ้นงานในการทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต

3.6.5 การทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน (Heat distortion temperature, HDT)

ทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน โดยเตรียมชิ้นงานขนาด $12.7 \times 125.0 \times 3.0$ มิลลิเมตร (กว้าง \times ยาว \times หนา) แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวด้วยความร้อนของพลาสติก (ภาพที่ 3.15) ตามมาตรฐาน ASTM D648 วิธี B โดยวางชิ้นงานลักษณะดังภาพที่ 3.17 ภาวะในการทดสอบ คือ อุณหภูมิเริ่มต้นในการทดสอบ 25 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสูงสุดในการทดสอบ 200 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 120 ± 0.2 องศาเซลเซียส/ชั่วโมง ใช้น้ำมันซิลิโคนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนสู่ชิ้นงาน ให้แรงเค้นกับชิ้นงานเท่ากับ 1.82 MPa ความยาว Span เท่ากับ 100 มิลลิเมตร บันทึกอุณหภูมิที่ทำให้ชิ้นงานโค้งงอเป็นระยะ 0.25 มิลลิเมตรจากตำแหน่งเดิม



ภาพที่ 3.17 การวางชิ้นงานในการทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน ตามมาตรฐาน ASTM D648 วิธี B

3.6.6 ทดสอบสมบัติทางความร้อนและพฤติกรรมการเกิดผลึก

นำเม็ดพลาสติกไปอบโดยใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และใช้เวลาอบ 4 ชั่วโมง ก่อนทดสอบหาสมบัติทางความร้อนและพฤติกรรมการเกิดผลึกด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (ภาพที่ 3.18) ใช้ตัวอย่างทดสอบประมาณ 5 มิลลิกรัม วางบนจานอะลูมิเนียม ปิดผนึกแล้วทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนอุณหภูมิเริ่มต้นทดสอบที่ 25 องศาเซลเซียส

อัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส/นาที และอุณหภูมิทดสอบสูงสุด 200 องศาเซลเซียส (First heating scan) คงอุณหภูมิที่ภาวะนั้นนาน 5 นาที แล้วลดอุณหภูมิในการทดสอบจาก 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราเร็ว 2 องศาเซลเซียส/นาที จนถึง 25 องศาเซลเซียส (Cooling scan) คงอุณหภูมิที่ภาวะนั้นนาน 5 นาที จากนั้นเริ่มการทดสอบซ้ำเป็นครั้งที่ 2 (Second heating scan) โดยใช้ภาวะเดิม ผลการทดสอบได้ DSC เทอร์โมแกรมที่แสดงอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (Glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (Cold crystallization, T_{cc}), อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m), อุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization temperature, T_c), เอนทัลปีของการเกิดผลึกเย็น (Enthalpy of cold crystallization, ΔH_{cc}) และเอนทัลปีของการหลอมเหลว (Melting enthalpy, ΔH_m) สามารถคำนวณระดับความเป็นผลึก (Degree of crystallinity, χ_c) ได้จากสมการที่ 3.2

$$\chi_c(\%) = 100 \times [(\Delta H_m - \Delta H_{cc}) / \Delta H_m^0 w] \quad (3.2)$$

โดยค่า ΔH_m คือ เอนทัลปีการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ที่ทดสอบ (จูล/กรัม)

ΔH_{cc} คือ เอนทัลปีการเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำของพอลิเมอร์ที่ทดสอบ (จูล/กรัม)

w คือ อัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่ทดสอบในพอลิเมอร์ผสม

ΔH_m^0 คือ เอนทัลปีของการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ทดสอบที่เกิดผลึก 100% (จูล/กรัม)

ของ PLA เท่ากับ 93 จูล/กรัม [34,43]



ภาพที่ 3.18 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Shimadzu, DSC-60 plus series) [53]

3.6.7 การวิเคราะห์โครงสร้าง (Structure)

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD) (ภาพที่ 3.19) ที่มี $\text{CuK}\alpha$ เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ และความยาวคลื่นเท่ากับ 0.154 นาโนเมตร ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 40 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 30 มิลลิแอมแปร์ เริ่มทำการสแกนที่มุม $2\theta = 1-55$ องศา อัตราการเร็วในการสแกนเป็น 2.4 องศา/นาที และความละเอียดในการวัดรังสีเอ็กซ์เมื่อหมุนชิ้นงาน

เท่ากับ 0.02 องศา กราฟผลการทดสอบแสดงจุดพีคของมุมที่รังสีเอ็กซ์เกิดการเลี้ยวเบน ซึ่งสามารถนำมาคำนวณระยะห่างระหว่างชั้นของอนุภาคเบนโทไนต์ในระนาบ 001 (d_{001}) ได้จากสมการที่ 3.3

$$\lambda = 2d_{001}\sin\theta \quad (3.3)$$

โดยค่า d คือ ระยะห่างระหว่างชั้นของระนาบในเบนโทไนต์ (d_{001})

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (0.154 นาโนเมตร)

θ คือ มุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์



ภาพที่ 3.19 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (Panalytical X'pert PRO MPD, pw 3040/60)

3.6.8 ตรวจสอบลักษณะโครงสร้าง

ตรวจสอบและยืนยันลักษณะโครงสร้างการกระจายตัว หรือ การแตกออกของชั้นแร่เบนโทไนต์ในนาโนคอมพอสิต ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) (ภาพที่ 3.20) โดยใช้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบเทอร์มิออนิก ชนิด LaB_6 ทำงานที่ความต่างศักย์ 200 keV



ภาพที่ 3.20 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (JEOL/JEM-2100 Plus) [54]

3.6.9 ทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Melt flow index, MFI)

นำเม็ดพลาสติกไปอบโดยใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและใช้เวลาอบ 4 ชั่วโมง จากนั้นนำมาทดสอบหาค่าดัชนีการหลอมไหลตามมาตรฐาน ASTM D1238 ด้วยเครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Melt flow indexer) (ภาพที่ 3.21) โดยใช้อุณหภูมิทดสอบ 210 องศาเซลเซียส และน้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม จากนั้นตัดเส้นพลาสติกที่ไหลผ่านหัวดายน์ (Extrudate) ที่เวลา 10 วินาที และชั่งน้ำหนักเพื่อนำมาคำนวณหาค่าดัชนีการหลอมไหลที่มีหน่วยเป็น กรัม/10 นาที จากสมการที่ 3.4

$$\text{ดัชนีการหลอมไหล} = \frac{\text{น้ำหนักพลาสติก (กรัม)} \times 600 \text{ (วินาที)}}{\text{เวลาที่ใช้ในการตัดเม็ด (วินาที)}} \quad (\text{กรัม}/10\text{นาที}) \quad (3.4)$$



ภาพที่ 3.21 เครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Instron, CEST MF20)

3.6.10 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability)

นำเม็ดพลาสติกไปอบโดยใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบ 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (Thermogravimetric analyzer, TGA) (ภาพที่ 3.22) ใช้ตัวอย่างทดสอบประมาณ 5 มิลลิกรัม ทดสอบภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหลเท่ากับ 20 มิลลิลิตร/นาที ในช่วงอุณหภูมิ 25-800 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส/นาที



ภาพที่ 3.22 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (Shimadzu, TG/DTA: DTG-60) [55]

3.6.11 ทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical properties)

นำชิ้นงานที่ได้จากการฉีดแบบมาตัดเป็นชิ้นขนาด $13.2 \times 57.0 \times 3.2$ มิลลิเมตร (กว้าง \times ยาว \times หนา) จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical analyzer, DMA) (ภาพที่ 3.23) ภายใต้อุณหภูมิ -50 ถึง 110 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 3 องศาเซลเซียส/นาที ทดสอบด้วยโหมด Three point cantilever ความถี่ 1 เฮิรตซ์ แรงที่ใช้ในการทดสอบ 3-4 นิวตัน ระยะสั้น (Displacement amplitude) น้อยกว่า 30 ไมโครเมตร



ภาพที่ 3.23 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (Mettler Toledo, TGA/SDTA851^e) [56]



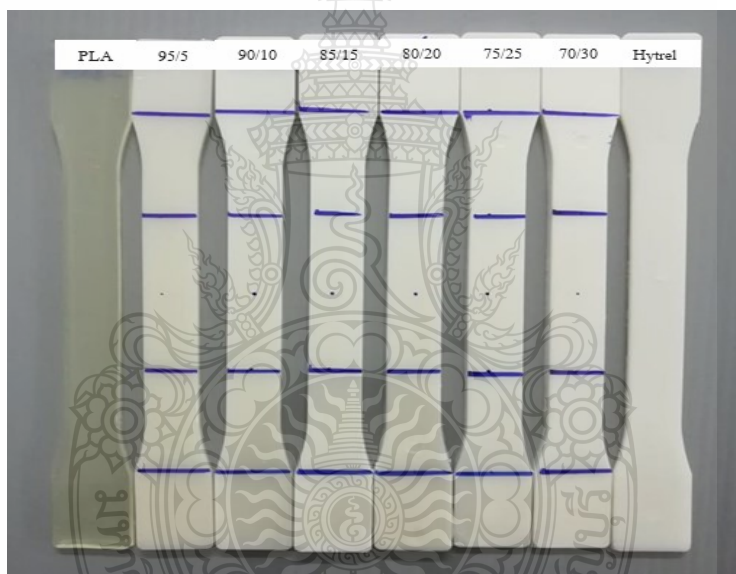
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 พอลิเมอร์ผสม PLA/Hytrel

4.1.1 ลักษณะชิ้นงาน

ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะชิ้นงานรูปดัมเบลล์ของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ (95/5, 90/10, 85/15, 80/20, 75/25 และ 70/30) ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ ซึ่งพบว่า ชิ้นงาน PLA มีสีเหลืองอ่อน โปร่งแสง ขณะที่ชิ้นงาน Hytrel มีสีขาวนวล ทึบแสง และเมื่อผสม Hytrel ใน PLA พบว่า ชิ้นงาน PLA/Hytrel มีสีขาวนวลทึบแสง และมีสีขาวนวลเข้มขึ้นตามปริมาณของ Hytrel ที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.1 ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนต่างๆ

4.1.2 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

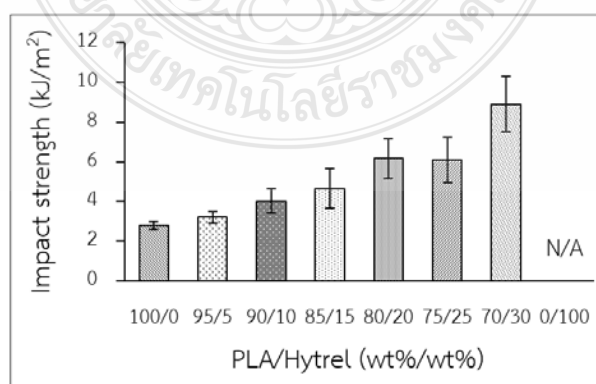
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกล (ความทนแรงกระทำ, ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และยังส์มอดุลัส) ของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ (95/5, 90/10, 85/15, 80/20, 75/25 และ 70/30)

ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนต่างๆ

PLA/Hytrel (wt%/wt%)	Impact strength (kJ/m ²)	Elongation at break (%)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
100/0	2.8 ± 0.2	4.5 ± 0.8	64.0 ± 0.7	2106.4 ± 55.6
0/100	No break	627.3 ± 5.5	7.9 ± 0.1	6.0 ± 0.1
95/5	3.2 ± 0.3	4.9 ± 0.1	62.0 ± 2.6	2133.0 ± 65.8
90/10	4.4 ± 0.6	7.7 ± 1.7	59.3 ± 0.8	2228.6 ± 100.8
85/15	4.7 ± 1.0	13.7 ± 1.6	48.2 ± 1.0	2060.0 ± 32.0
80/20	6.2 ± 1.0	18.9 ± 4.8	44.5 ± 0.6	1915.8 ± 116.4
75/25	6.1 ± 1.1	19.4 ± 7.2	40.6 ± 0.4	1871.6 ± 28.7
70/30	8.9 ± 1.4	47.8 ± 9.3	35.0 ± 0.4	1671.4 ± 52.0

4.1.2.1 ความทนแรงกระแทก (Impact strength)

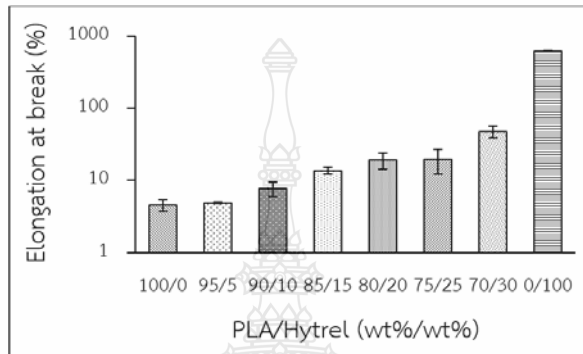
จากตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.2 พบว่า PLA เป็นวัสดุที่มีความเปราะเนื่องจากมีค่าความทนแรงกระแทกต่ำมาก (2.8 kJ/m²) ขณะที่ไม่สามารถหาความทนแรงกระแทกของ Hytrel ได้ (ตีไม่แตก) ภายใต้ภาวะของการทดสอบเดียวกัน เนื่องจาก Hytrel นั้นเป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ที่มีสมบัติคล้ายยาง (ความยืดหยุ่นสูง) ดังนั้น เมื่อใส่ Hytrel ปริมาณร้อยละ 5-30 โดยน้ำหนัก ใน PLA พบว่า ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ Hytrel ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 3.2-8.9 kJ/m² (เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.3-217.9) และมีค่าสูงที่สุดเมื่อใส่ Hytrel ร้อยละ 30 ซึ่งแสดงว่า Hytrel ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเหนียว (Toughening agent) หรือสารดัดแปรความทนแรงกระแทก (Impact modifier) ให้กับ PLA [34, 36, 45] โดยสามารถกระจายตัวได้ดีใน PLA (ยืนยันได้จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM) ซึ่งส่งผลให้สามารถส่งผ่านความเค้นจาก PLA ไปยัง Hytrel ได้ดี โดยเฟสที่อ่อนนุ่มของ Hytrel สามารถดูดซับพลังงานการกระแทกไว้ได้มากกว่าก่อนการแตกหัก ดังนั้น ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมได้รับการปรับปรุงอย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 4.2 ความทนแรงกระแทกของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนต่างๆ

4.1.2.2 การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)

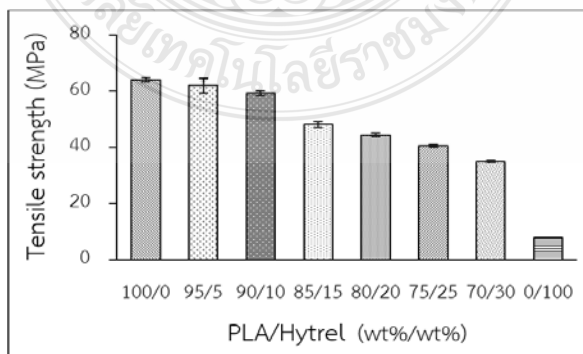
จากตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.3 พบว่า PLA มีการยืดตัว ณ จุดขาดร้อยละ 4.5 แต่เมื่อใส่ Hytrel ซึ่งมีการยืดตัว ณ จุดขาดที่สูงมาก (ร้อยละ 627.3) ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของ Hytrel ที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 4.9-47.8 (เพิ่มขึ้นร้อยละ 8.9-962.2)



ภาพที่ 4.3 การยืดตัว ณ จุดขาดของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนต่างๆ

4.1.2.3 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

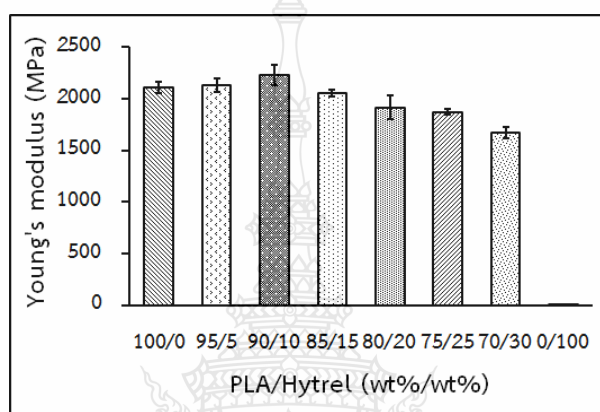
ตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.4 พบว่า PLA มีความทนแรงดึงเท่ากับ 64.0 MPa เมื่อใส่ Hytrel ที่มีความทนแรงดึงต่ำกว่ามาก (7.9 MPa) ใน PLA ทำให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของ Hytrel ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ Hytrel และ PLA มีความเข้ากันได้ดี แต่เนื่องจาก Hytrel เป็นเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ ดังนั้น เมื่อใส่ Hytrel ใน PLA จึงทำให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลง [36,45] โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 35.0-62.0 MPa (ลดลงร้อยละ 3.0-45.3) จึงอาจกล่าวได้ว่าความทนแรงดึงของ PLA/Hytrel ทุกอัตราส่วนไม่ได้รับการปรับปรุง และยังมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของ Hytrel ที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.4 ความทนแรงดึงของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนต่างๆ

4.1.2.4 ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus)

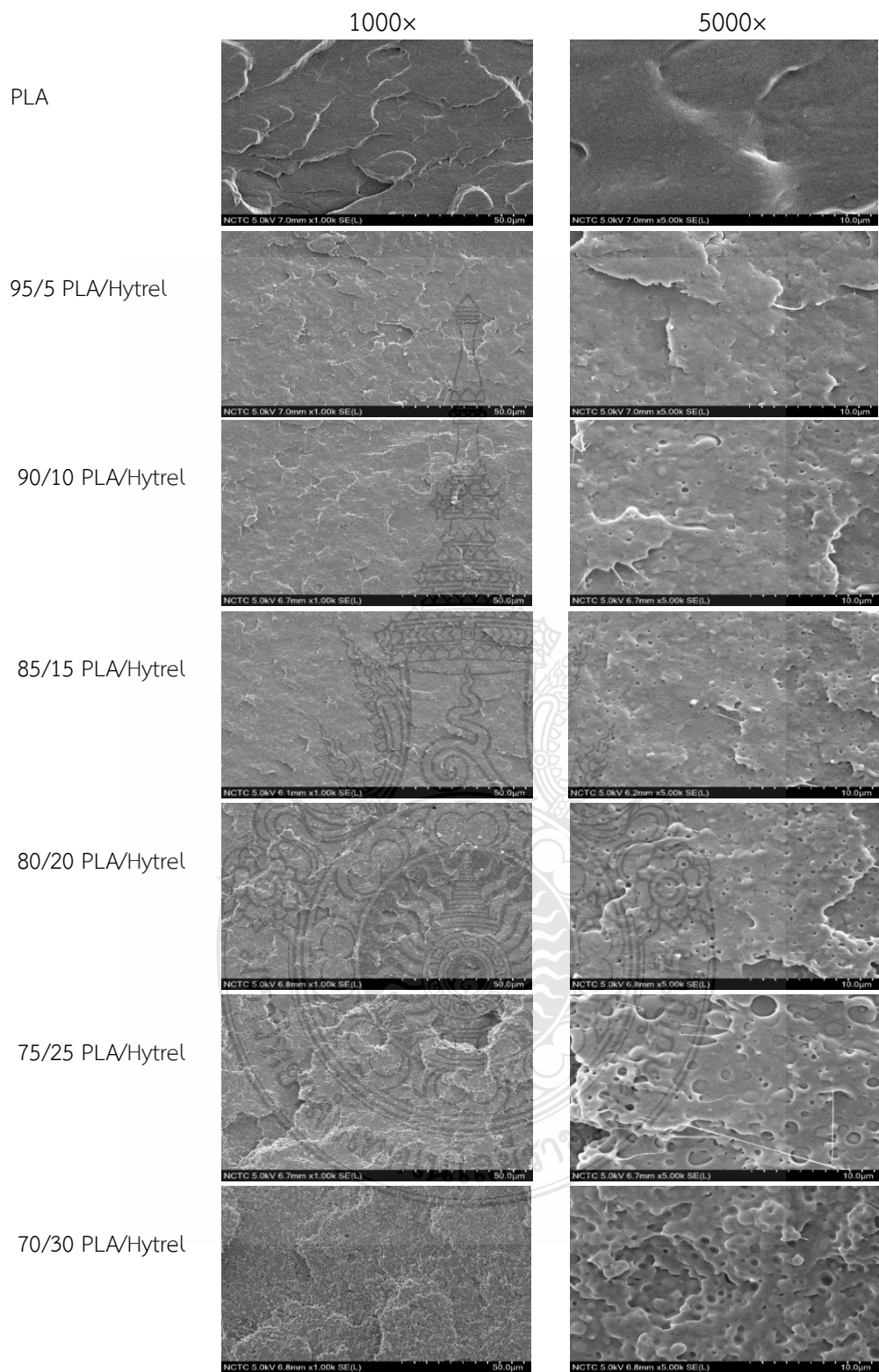
จากตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.5 พบว่า ยั่งส์มอดุลัสของ PLA เท่ากับ 2106.4 MPa แต่เมื่อใส่ Hytrel ซึ่งมียั่งส์มอดุลัสต่ำกว่ามาก (6.0 MPa) กลับส่งผลให้ยั่งส์มอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงไม่มากนัก โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1671.4-2228.6 MPa ทั้งนี้อาจเนื่องจากการพันกันของสายโซ่โพลิเมอร์ (Chain entanglement) [59] ระหว่าง PLA และ Hytrel จึงมีผลให้ยั่งส์มอดุลัสเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก



ภาพที่ 4.5 ยั่งส์มอดุลัสของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนต่างๆ

4.1.3 สัณฐานวิทยา (Morphology)

ภาพที่ 4.6 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวรอยแตกของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทกของ PLA และของ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายใต้กำลังขยาย 1000× และ 5000× พบว่า พื้นผิวรอยแตกของ PLA มีลักษณะเรียบ ซึ่งแสดงว่าวัสดุสามารถรับแรงกระแทกได้น้อยและมีการแตกหักแบบเปราะ แต่เนื่องจาก Hytrel ไม่แตกหักในการทดสอบความทนแรงกระแทก จึงไม่ได้นำชิ้นงานไปตรวจสอบสัณฐานวิทยา และเมื่อใส่ Hytrel ใน PLA พบว่า พื้นผิวรอยแตกของพอลิเมอร์ผสมมีลักษณะหยาบมากขึ้นตามปริมาณของ Hytrel ที่เพิ่มขึ้น โดยสังเกตพบเฟสที่แตกต่างกัน 2 เฟส คือ Hytrel ที่มีอนุภาคเป็นทรงกลม (Droplet) กระจายตัวสม่ำเสมอในเมทริกซ์ของ PLA [34, 39-41, 44-46] ซึ่งเมื่อปริมาณของ Hytrel เพิ่มขึ้น พบว่า อนุภาคของ Hytrel และหลุม (Hole) ที่เกิดจากอนุภาค Hytrel ถูกดึงออกมา (Pull out) ขณะทดสอบความทนแรงกระแทกมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการเกาะกลุ่ม (Aggregation) ของ Hytrel โดยผลการตรวจสอบสัณฐานวิทยาสันับสนุนผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



ภาพที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของ PLA และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนต่างๆ

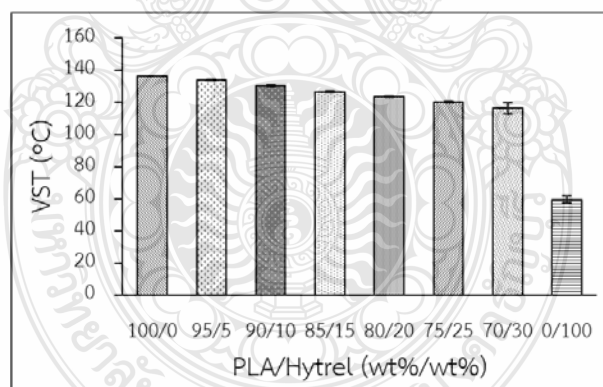
4.1.4 สมบัติทางความร้อน

4.1.4.1 อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต (Vicat softening temperature, VST)

ในตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.7 แสดงอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต (VST) ของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักต่างๆ (95/5, 90/10, 85/15, 80/20, 75/25 และ 70/30)

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนต่างๆ

PLA/Hytrel (wt%/wt%)	Vicat softening point (°C)
100/0	136.3 ± 0.2
0/100	59.6 ± 2.2
95/5	134.0 ± 0.4
90/10	130.5 ± 0.4
85/15	126.7 ± 0.4
80/20	123.7 ± 0.3
75/25	120.3 ± 0.3
70/30	116.4 ± 3.2

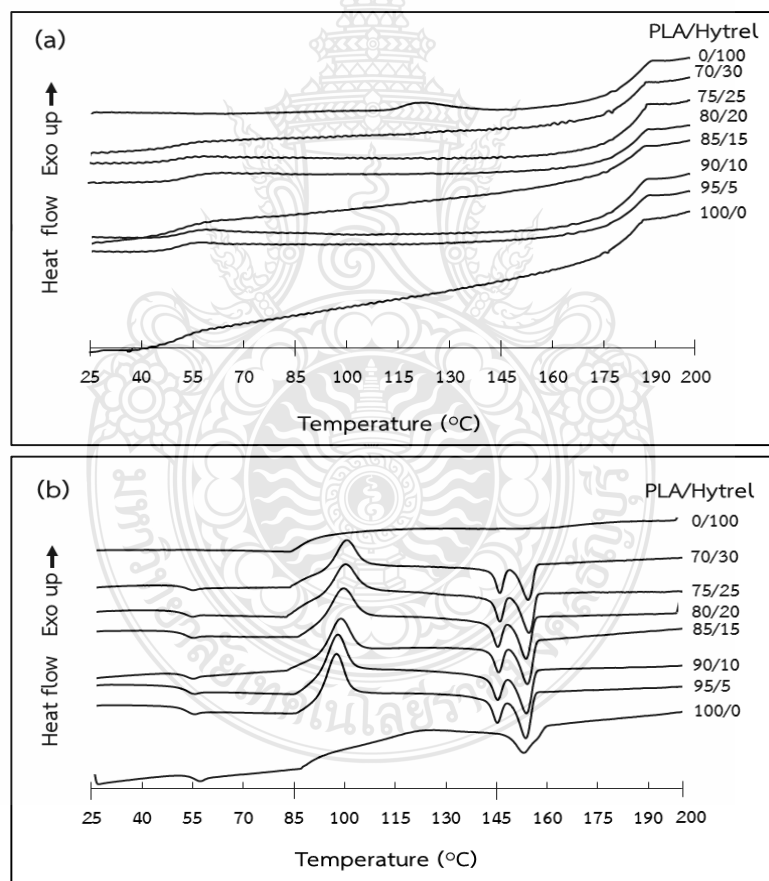


ภาพที่ 4.7 อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากภาพที่ 4.7 พบว่า PLA และ Hytrel มีอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตเท่ากับ 136.3 และ 59.6 MPa ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตของ Hytrel มีค่าต่ำกว่าของ PLA มาก ซึ่งการใส่ Hytrel ใน PLA มีผลทำให้อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตของ PLA/Hytrel ค่อยๆลดลงตามปริมาณของ Hytrel ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 116.4-134.0 องศาเซลเซียส ดังนั้น อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนไม่ได้รับการปรับปรุงเมื่อใส่ Hytrel

4.1.4.2 สมบัติทางความร้อนและพฤติกรรมการเกิดผลึก

ภาพที่ 4.8 แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและพฤติกรรมการเกิดผลึกของ PLA, Hytrel และพอลิเมอร์ผสม PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยเทคนิค DSC ในขั้นตอนการเย็นตัว (Cooling scan) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (Second heating scan) ส่วนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 (First heating scan) เป็นขั้นตอนที่ใช้ลูปประวัติทางความร้อนของชิ้นงาน โดยตารางที่ 4.3 แสดงอุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization temperature, T_c) ที่บันทึกจากขั้นตอนการเย็นตัว และอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (Glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (Cold crystallization, T_{cc}), อุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) เอนทัลปีของการหลอมเหลว (Enthalpy of melting, ΔH_m), เอนทัลปีของการเกิดผลึกเย็น (Enthalpy of cold crystallization, ΔH_{cc}) และระดับของการเกิดผลึก (Degree of crystallinity, χ_c) ของ PLA ที่ได้จากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2



ภาพที่ 4.8 DSC เทอร์โมแกรมของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel อัตราส่วนต่างๆ ที่ได้จาก (a) ขั้นตอนการเย็นตัว และ (b) ขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวและการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel ที่อัตราส่วนต่างๆ

PLA/Hytrel (wt%/wt%)	T_c (°C)	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	ΔH_m (J/g)	ΔH_{cc} (J/g)	$\chi_{c,PLA}$ (%)
100/0	-	53.5	-	151.9	-	15.3	-	16.4
0/100	123.0	-	-	-	-	9.2	-	-
95/5	-	52.0	97.6	145.2	153.6	30.3	19.4	12.3
90/10	-	52.5	98.1	145.5	153.9	29.4	18.0	13.6
85/15	-	52.4	99.0	145.8	154.3	25.3	16.7	10.9
80/20	-	51.8	100.0	145.8	154.1	25.8	17.8	10.8
75/25	-	50.6	100.5	146.4	155.0	23.6	17.9	8.2
70/30	-	52.4	100.8	146.3	154.7	20.8	14.4	9.8

ตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.8(a) แสดงผลที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวของชิ้นงานภายหลังจากกลับประวัติทางความร้อนในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ซึ่งพบว่า มี Hytrel บริสุทธิ์เท่านั้นที่ปรากฏ T_c ที่อุณหภูมิ 123.0 องศาเซลเซียส โดยไม่ปรากฏ T_c ของทั้ง PLA บริสุทธิ์ และ PLA เมทริกซ์ใน PLA/Hytrel ทุกอัตราส่วน เนื่องจาก PLA มีอัตราการเกิดผลึกช้ามาก [34, 45, 47] จึงไม่มีเวลามากพอที่ทำให้โมเลกุลของ PLA จัดเรียงตัวเป็นผลึก โดยเฉพาะเมื่อถูกทำให้เย็นลงภายหลังขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่า Hytrel ไม่มีอิทธิพลต่อกระบวนการเกิดผลึกของ PLA และจากตารางและภาพที่ 4.8(b) พบว่า PLA บริสุทธิ์มีเพียง T_g และ T_m ที่อุณหภูมิ 53.5 และ 151.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline polymer) ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 อย่างไรก็ตาม การใส่ Hytrel เข้าไปใน PLA ทำให้พบ T_g , T_{cc} และ T_m (2 ตำแหน่ง) ของ PLA เมทริกซ์ โดย T_g ของ PLA ใน PLA/Hytrel ทุกอัตราส่วนมีค่าลดต่ำลงเล็กน้อย (1.0-2.9 องศาเซลเซียส) เมื่อเปรียบเทียบกับของ PLA บริสุทธิ์ เนื่องจาก Hytrel ที่มีความยืดหยุ่นสูงช่วยให้สายโซ่โมเลกุลของ PLA เคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ ยังสามารถพบ T_{cc} ของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นเหนือ T_g ของ PLA โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 97.6-100.8 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่สามารถพบใน PLA บริสุทธิ์ และ T_{cc} ยังมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ Hytrel ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก Hytrel ขัดขวางการจัดเรียงตัวของ PLA จึงหน่วงการเกิดผลึกของ PLA (T_{cc} มีค่าสูงขึ้น) นอกจากนี้ ยังปรากฏพีก T_m ของ PLA เมทริกซ์เกิดขึ้น 2 ตำแหน่งในพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากผลึกที่ไม่สมบูรณ์ของ PLA เกิดการหลอมเหลวได้ก่อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า (T_{m1}) ในช่วงอุณหภูมิ 145.2-146.3 องศาเซลเซียส จากนั้น PLA หลอมเหลวสามารถเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) ที่มีโครงสร้างสมบูรณ์มากกว่า และเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงกว่า (T_{m2}) [45] ในช่วงอุณหภูมิ 153.6-155.0 องศาเซลเซียส และจากการคำนวณด้วยสมการที่ 3.2 พบว่า PLA

บริสุทธิ์มีระดับความเป็นผลึกร้อยละ 16.4 และของ PLA ใน PLA/Hytrel ทุกอัตราส่วนมีค่าลดลง โดยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 8.2-13.6 เนื่องจากปริมาณ PLA ใน PLA/Hytrel ลดน้อยลง ขณะที่ Hytrel ซึ่งกระจายตัวอยู่ใน PLA เมทริกซ์มีปริมาณเพิ่มขึ้นจึงขัดขวางการเกิดผลึกของ PLA ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อนของ PLA/Hytrel ที่ใส่ Hytrel ปริมาณร้อยละ 5-30 โดยน้ำหนัก ใน PLA พบว่า Hytrel สามารถเพิ่มความเหนียวให้กับ PLA ได้โดยปรับปรุงทั้งความทนแรงกระแทกและการยืดตัว ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมได้ ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ Hytrel ที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงที่สุดเมื่อใส่ Hytrel ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากการกระจายตัวที่ดีของ Hytrel ใน PLA เมทริกซ์ ยืนยันได้จากผลการตรวจสอบสันฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM อย่างไรก็ดีตามการใส่ Hytrel ไม่ได้ช่วยปรับปรุงความทนแรงดึงยังสัมมอดูลัสและอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตของพอลิเมอร์ผสม และการใส่ Hytrel ไม่ได้เป็นสารก่อผลึกให้กับ PLA ดังนั้น เมื่อพิจารณาจากสมบัติเชิงกลด้านความทนแรงกระแทกเป็นหลักจึงได้เลือกอัตราส่วน 70/30 PLA/Hytrel มาเตรียมเป็นนาโนคอมพอสิตโดยใส่เบนโทไนด์ (1, 3 และ 5 phr) เพื่อศึกษาและปรับปรุงสมบัติดังกล่าว

4.2 พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต PLA/Hytrel/BN

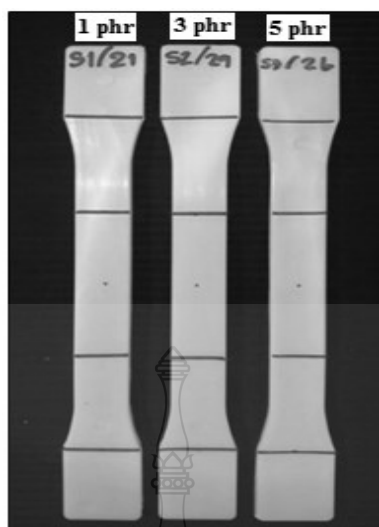
4.2.1 ลักษณะของเม็ดนาโนคอมพอสิตและชิ้นงาน

ภาพที่ 4.9 แสดงตัวอย่างเม็ดพลาสติก PLA/Hytrel/BN ที่ได้จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่และถูกทำให้เย็นโดยการดึงผ่านน้ำแล้วตัดเป็นเม็ดพลาสติก ซึ่งเม็ดพลาสติกที่ได้มีสีขาวนวลทึบแสง



ภาพที่ 4.9 เม็ดพลาสติก PLA/Hytrel/BN

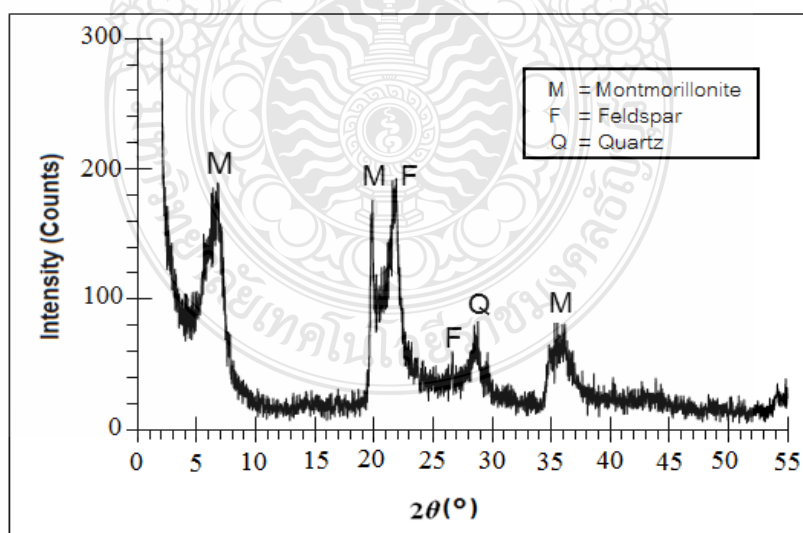
ภาพที่ 4.10 แสดงชิ้นงานรูปดัมเบลล์ที่ได้ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบพบว่า ชิ้นงาน มีสีขาวนวลเช่นเดียวกับเม็ดพลาสติกดังภาพที่ 4.9



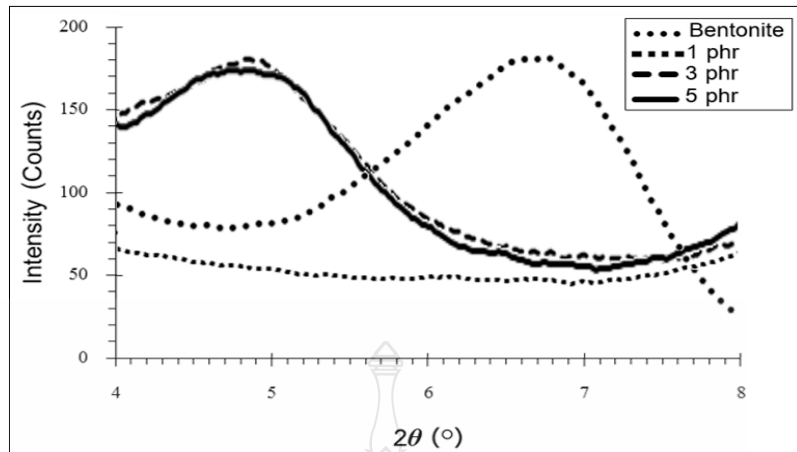
ภาพที่ 4.10 ชิ้นงาน PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr

4.2.2 องค์ประกอบและโครงสร้าง (Composition and structure)

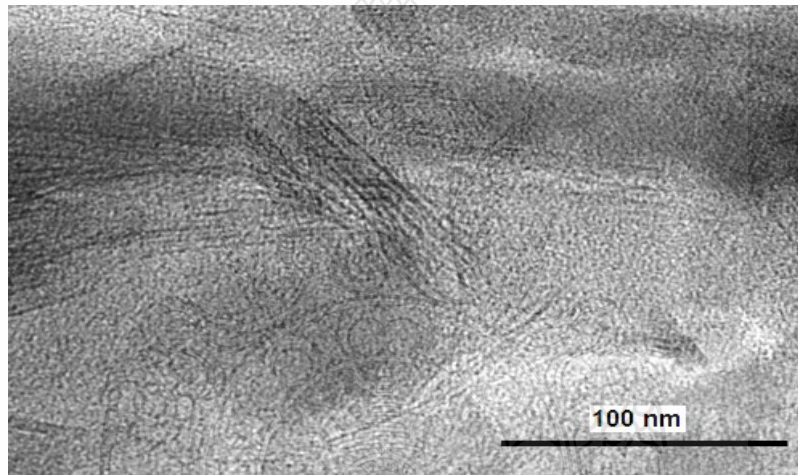
ภาพที่ 4.11 แสดงองค์ประกอบและโครงสร้างของผงเบนโทไนต์ที่ตรวจสอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD) ในช่วง $2\theta = 0-55^\circ$ พบว่า เบนโทไนต์มีมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT) เป็นส่วนประกอบหลัก โดยมีเฟลด์สปาร์ (Feldspar) และควอตซ์ (Quartz) ปะปนอยู่เล็กน้อย [57]



ภาพที่ 4.11 XRD ดิฟแฟรคโทแกรมของเบนโทไนต์



ภาพที่ 4.12 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของเบนโทไนด์และ PLA/HytreL/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ 1, 3 และ 5 phr



ภาพที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของ PLA/HytreL/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ปริมาณ 1 phr

ภาพที่ 4.12 แสดง XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของเบนโทไนด์และ PLA/HytreL/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ 1, 3 และ 5 phr ในช่วง $2\theta = 4-8^\circ$ จากการคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบ (001) หรือ d_{001} ของเบนโทไนด์บริสุทธิ์ด้วยสมการที่ 3.3 พบว่า มีค่าเท่ากับ 1.29 nm ($2\theta = 6.83^\circ$) ในขณะที่ไม่พบพีค d_{001} ของ PLA/HytreL/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ 1phr ซึ่งอาจกล่าวได้ว่านาโนคอมพอสิตอาจมีโครงสร้างแบบเอ็กซีโฟลิเอต (Exfoliate) เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์สอดแทรกเข้าไปในชั้นซิลิเกต (Layered silicates) ที่เรียกว่า ‘แกลเลอรี’ (Gallery) ของเบนโทไนด์จนทำให้ชั้นซิลิเกตแยกจากกันและกระจายอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ แต่จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD นั้นยังไม่เพียงพอและอาจเกิดความผิดพลาดได้ [58] ดังนั้น จึงได้ยืนยันผลด้วยการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.13 จะพบการเกิดโครงสร้างผสมระหว่างแบบเอ็กซีโฟลิเอต

กับแบบอินเทอร์คาเลต (Intercalate) ที่มีสายโซ่พอลิเมอร์แทรกอยู่ในแกลเลอรีของเบนโทไนด์และทำให้แกลเลอรีกว้างขึ้น ทำให้นาโนคอมพอสิตมีสัญญาณวิทยาที่ไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ 3 และ 5 phr แสดงพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 4.81, และ 4.63° ตามลำดับ สอดคล้องกับ d_{001} เท่ากับ 1.84 และ 1.92 nm ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าระยะห่างระหว่างระนาบ (001) ในนาโนคอมพอสิตทั้งสองนี้กว้างขึ้นเมื่อเทียบกับของเบนโทไนด์บริสุทธิ์ และอาจสรุปได้ว่านาโนคอมพอสิตทั้งสองอัตราส่วนนี้มีโครงสร้างแบบอินเทอร์คาเลต

4.2.3 สมบัติเชิงกล

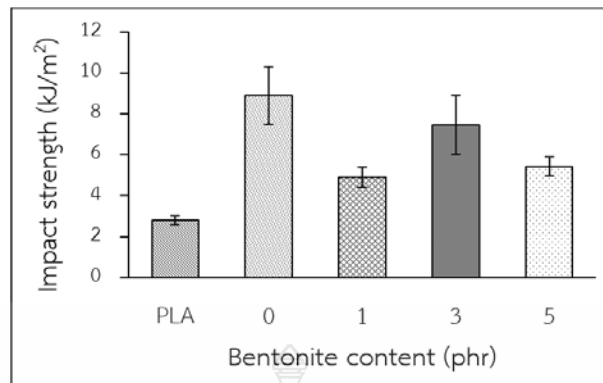
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกล (ความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และยังส์มอดุลัส) ของ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ใน 70/30 PLA/Hytrel

ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ 0, 1, 3 และ 5 phr

PLA/Hytrel/BN (wt%/wt%/phr)	Impact strength (kJ/m ²)	Elongation at break (%)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
70/30/0	8.9 ± 1.4	47.8 ± 9.3	35.0 ± 0.4	1671.4 ± 52.0
70/30/1	5.0 ± 0.5	4.0 ± 0.4	35.3 ± 0.5	1656.4 ± 71.3
70/30/3	7.5 ± 1.4	17.8 ± 5.3	34.0 ± 0.4	1596.2 ± 48.3
70/30/5	5.4 ± 0.5	17.7 ± 3.2	35.6 ± 0.3	1596.8 ± 93.0

4.2.3.1 ความทนแรงกระแทก (Impact strength)

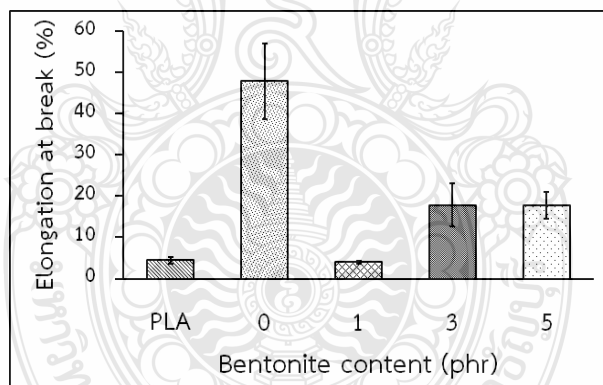
จากตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.14 พบว่า PLA/Hytrel/BN ทุกอัตราส่วนมีความทนแรงกระแทกต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมล้วน (0 phr เบนโทไนด์) เนื่องจากเบนโทไนด์เป็นสารอนินทรีย์ที่มีความแข็งสูง อย่างไรก็ตาม PLA/Hytrel/BN ทุกอัตราส่วนยังมีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่า PLA บริสุทธิ์ (2.8 kJ/m²) โดย PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ 3 phr มีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่าอัตราส่วนอื่นๆ ทั้งนี้อาจเนื่องจากเบนโทไนด์ที่ความเข้มข้นนี้เกิดการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงช่วยให้มีการส่งผ่านความเค้นระหว่างพอลิเมอร์กับเบนโทไนด์ได้ดี ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Error bar) พบว่า ชิ้นงานนาโนคอมพอสิตบางชิ้นนั้นมีความทนแรงกระแทกสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมล้วน นอกจากนี้ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ปริมาณ 1 phr อาจมีอันตรกิริยาระหว่างผิว (Interfacial interaction) กับพอลิเมอร์สูงมากในส่วนที่มีโครงสร้างแบบเอ็กซีฟลิเอตจึงขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อได้รับแรงกระแทก ในขณะที่ความทนแรงกระแทกของ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ปริมาณ 5 phr มีค่าลดลง ซึ่งอาจเนื่องจากเบนโทไนด์เกิดการเกาะกลุ่มกัน [38, 40, 43] และทำให้การส่งผ่านความเค้นระหว่างพอลิเมอร์กับเบนโทไนด์ลดลง



ภาพที่ 4.14 ความทนแรงกระแทกของ PLA และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 0, 1, 3 และ 5 phr

4.2.3.2 การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break)

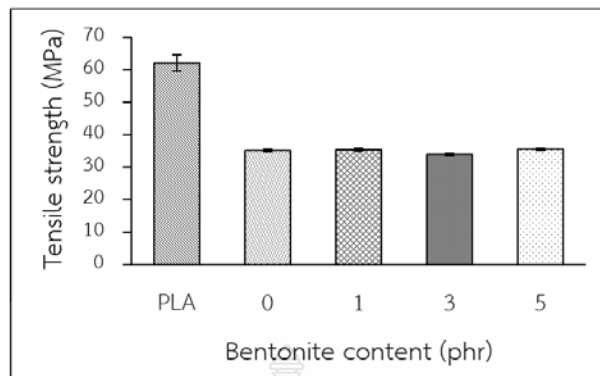
จากตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.15 พบว่า PLA/Hytrel/BN ทุกอัตราส่วนมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมล้วน หากแต่ยังสูงกว่า PLA บริสุทธิ์ โดย PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ปริมาณ 3 phr มีการยืดตัว ณ จุดขาด เฉลี่ยสูงกว่าอัตราส่วนอื่นๆ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลของการทดสอบความทนแรงกระแทกที่ได้กล่าวมาแล้ว



ภาพที่ 4.15 การยืดตัว ณ จุดขาด ของ PLA และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 0, 1, 3 และ 5 phr

4.2.3.3 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

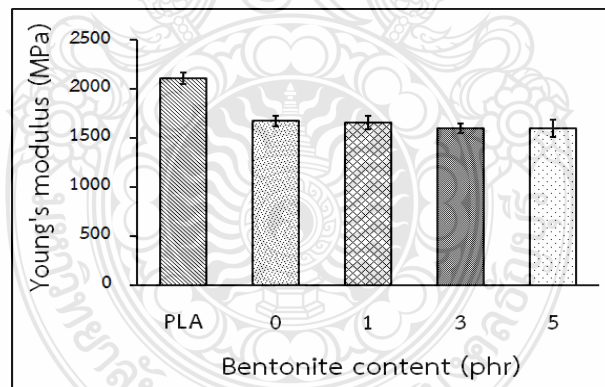
จากตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.16 พบว่า PLA/Hytrel/BN ทุกอัตราส่วนมีความทนแรงดึงแตกต่างจากของพอลิเมอร์ผสมล้วนอย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 34.0-35.6 MPa ดังนั้น การใส่เบนโทไนต์จึงไม่มีผลทำให้ความทนแรงดึงของชิ้นงานเสียไป ถึงแม้จะมีผลทำให้ความทนแรงกระแทกตกลงก็ตาม เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของเบนโทไนต์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์และสามารถเกิดอันตรกิริยากับพอลิเมอร์ได้ดีจากการมีโครงสร้างแบบเฮกซ์ไฟลิเอตและอินเทอร์คาเลตดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



ภาพที่ 4.16 ความทนแรงดึงของ PLA และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 0, 1, 3 และ 5 phr

4.2.3.4 ยังส์มอดุลัส (Young's modulus)

จากตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.17 พบว่า ยังส์มอดุลัสของ PLA/Hytrel/BN ทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับของ 70/30 PLA/Hytrel (1671.4 MPa) โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1596.2-1656.4 MPa เนื่องจากนาโนคอมพอสิตมีเบนโทไนต์ปริมาณน้อยมากจึงส่งผลต่อความแข็งดึงของชิ้นงานไม่มากนัก และเป็นค่าที่ยอมรับได้ โดยพบว่านาโนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบเอ็กซ์โฟลิตเอตมียังส์มอดุลัสสูงกว่าแบบอินเทอร์คาเลตเล็กน้อย

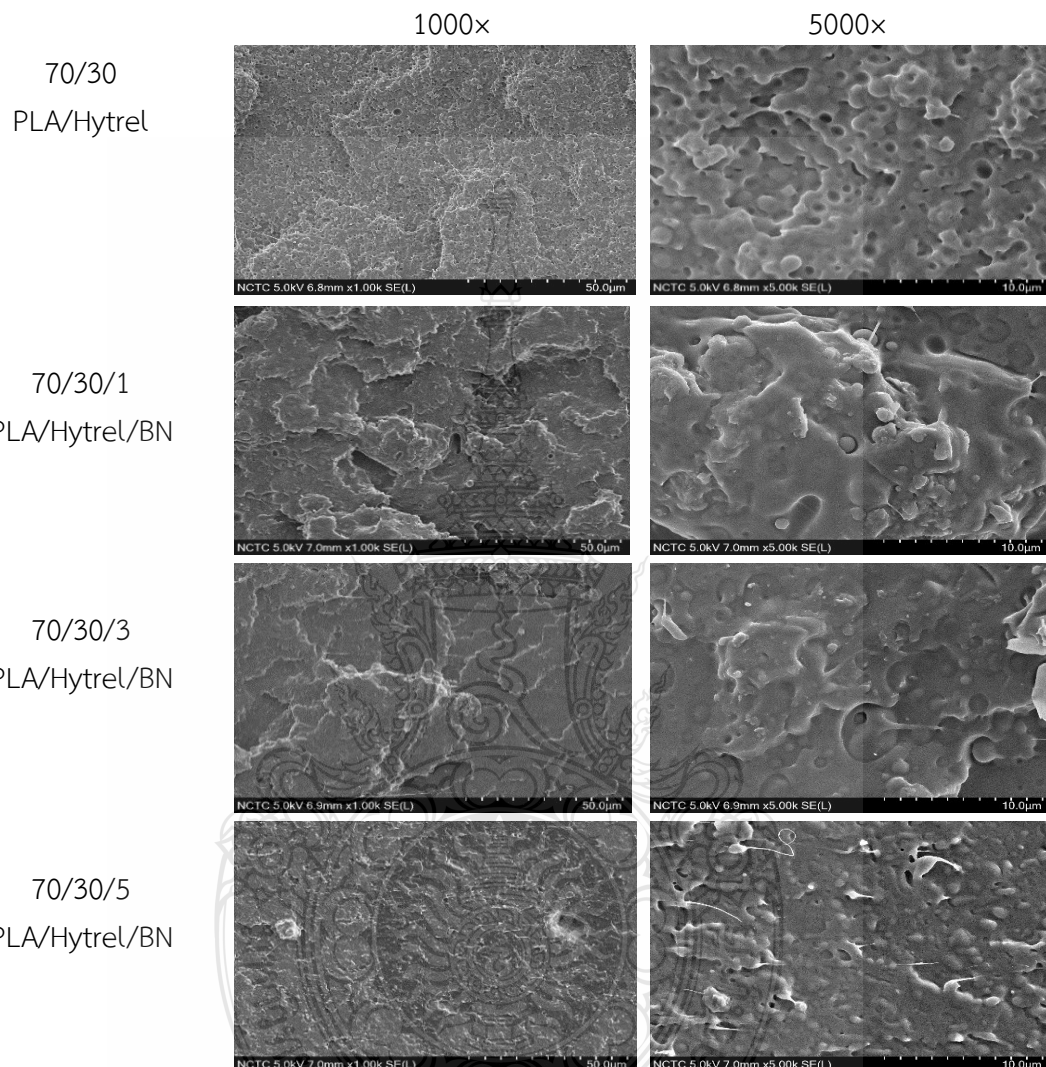


ภาพที่ 4.17 ยังส์มอดุลัสของ PLA และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 0, 1, 3 และ 5 phr

4.2.4 สัณฐานวิทยา (Morphology)

ภาพที่ 4.18 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณผิวรอยแตกของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทกของทั้ง 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 1, 3 และ 5 phr จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้กำลังขยาย 1000x และ 5000x พบว่า อนุภาคทรงกลมของ Hytrel มีขนาดเล็กถึง ซึ่งแสดงว่า Hytrel และ PLA สามารถเข้ากัน

ได้มากขึ้น เนื่องจากการมีโครงสร้างแบบเอ็กซ์โฟลิตและอินเทอร์คาเลต [39, 41, 48] รวมทั้งหลุมที่เกิดจากอนุภาค Hytrel ที่ถูกดึงออกมามีปริมาณลดลงและขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของ 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 1, 3 และ 5 phr

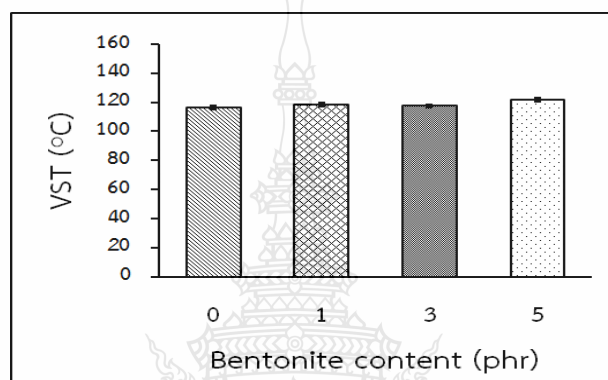
4.2.5 สมบัติทางความร้อน

4.2.5.1 อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต (Vicat softening temperature, VST)

ตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.19 แสดงอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตของ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ลงใน 70/30 PLA/Hytrel

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิอ่อนตัวไวด์แคตของ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ 0, 1, 3 และ 5 phr

PLA/Hytrel/BN (wt%/wt%/phr)	Vicat softening point (°C)
70/30/0	116.4 ± 3.2
70/30/1	118.4 ± 0.8
70/30/3	117.5 ± 1.6
70/30/5	121.8 ± 0.9



ภาพที่ 4.19 อุณหภูมิอ่อนตัวไวด์แคตของ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ 0, 1, 3 และ 5 phr

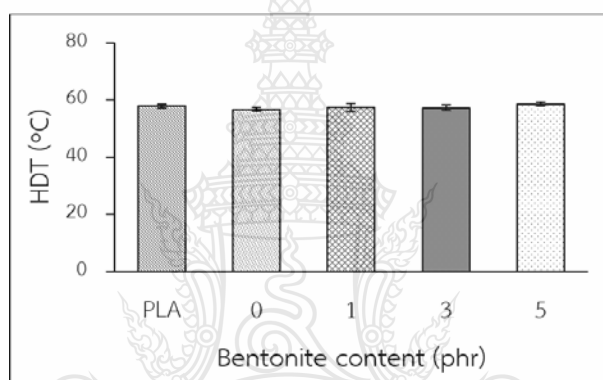
จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.19 พบว่า PLA/Hytrel/BN ทุกอัตราส่วนมีอุณหภูมิอ่อนตัวไวด์แคตสูงกว่า 70/30 PLA/Hytrel (116.4 องศาเซลเซียส) ทั้งนี้เนื่องมาจากเบนโทไนด์เป็นสารอนินทรีย์ที่มีความแข็งตึงและมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าพอลิเมอร์มาก จึงส่งผลให้ PLA/Hytrel/BN ที่เตรียมได้มีอุณหภูมิอ่อนตัวไวด์แคตสูงขึ้น

4.2.5.2 อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน (Heat distortion temperature, HDT)

ตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.20 แสดงอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน (HDT) ของ PLA, 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของ PLA, Hytrel, 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 1, 3 และ 5 phr

PLA/Hytrel/BN (wt%/wt%/phr)	Heat distortion temperature (°C)
100/0/0	57.9 ± 0.7
0/100/0	N/A
70/30/0	56.7 ± 0.7
70/30/1	57.4 ± 1.4
70/30/3	57.3 ± 1.0
70/30/5	58.6 ± 0.7



ภาพที่ 4.20 อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของ PLA และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 0, 1, 3 และ 5 phr

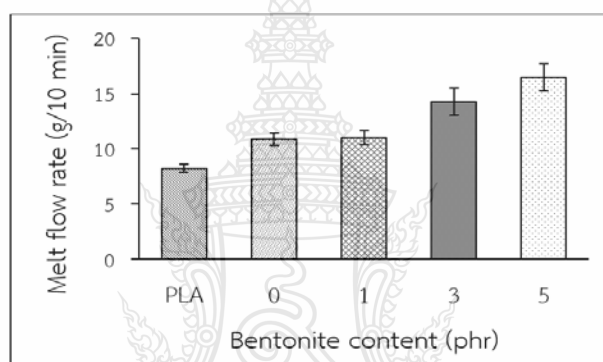
จากตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.20 พบว่า PLA/Hytrel/BN ทุกอัตราส่วนมีอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนใกล้เคียงกับ PLA บริสุทธิ์ และพอลิเมอร์ผสมล้วน ซึ่งแสดงว่าทั้ง Hytrel และเบนโทไนต์ไม่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของ PLA ถึงแม้ว่า Hytrel มีอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนต่ำมาก อาจเนื่องจากการพันกันของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด [59] ทำให้อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของพอลิเมอร์ผสมลดลงไม่มากนัก รวมทั้งความแข็งตึงและเสถียรภาพทางความร้อนของเบนโทไนต์ที่ช่วยให้อุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนของนาโนคอมพอสิตไม่เสียไป

4.2.5.3 ดัชนีการหลอมไหล (Melt flow index, MFI)

ตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.21 แสดงดัชนีการหลอมไหลของ PLA, 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 1, 3 และ 5 phr ซึ่งทดสอบที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ภายใต้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม โดยค่าดัชนีการหลอมไหลคำนวณจากสมการที่ 3.4

ตารางที่ 4.7 ดัชนีการหลอมไหลของ PLA, Hytrel, 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 1, 3 และ 5 phr

PLA/Hytrel/BN (wt%/wt%/phr)	Melt flow index (g/10 min)
100/0/0	8.2 ± 0.4
0/100/0	16.0 ± 2.4
70/30/0	10.8 ± 0.5
70/30/1	11.0 ± 0.6
70/30/3	14.2 ± 1.2
70/30/5	16.5 ± 1.2



ภาพที่ 4.21 ดัชนีการหลอมไหลของ PLA และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 0, 1, 3 และ 5 phr

จากตารางที่ 4.7 และ ภาพที่ 4.21 พบว่า Hytrel มีอัตราการไหลสูงเป็น 16.0 กรัม/10 นาที ซึ่งมากกว่าของ PLA บริสุทธิ์ (8.2 กรัม/10 นาที) โดย 70/30 PLA/Hytrel มีอัตราการไหลเท่ากับ 10.8 กรัม/10 นาที ซึ่งมีค่าต่ำกว่าของ Hytrel แต่ยังมีอัตราการไหลมากกว่าของ PLA บริสุทธิ์ ซึ่ง PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ในปริมาณต่างๆ พบว่า PLA/Hytrel/BN ทุกอัตราส่วนมีอัตราการไหลมากกว่าของพอลิเมอร์ผสมล้วน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเบนโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก Hytrel มีการแตกตัวทำให้อนุภาคทรงกลมของ Hytrel มีขนาดเล็กลง [37] และเกิดการกระจายตัวที่ดีใน PLA เมทริกซ์ ขณะที่เบนโทไนต์มีโครงสร้างแบบแผ่นซีตจึงช่วยให้พอลิเมอร์มีอัตราการไหลเพิ่มขึ้น

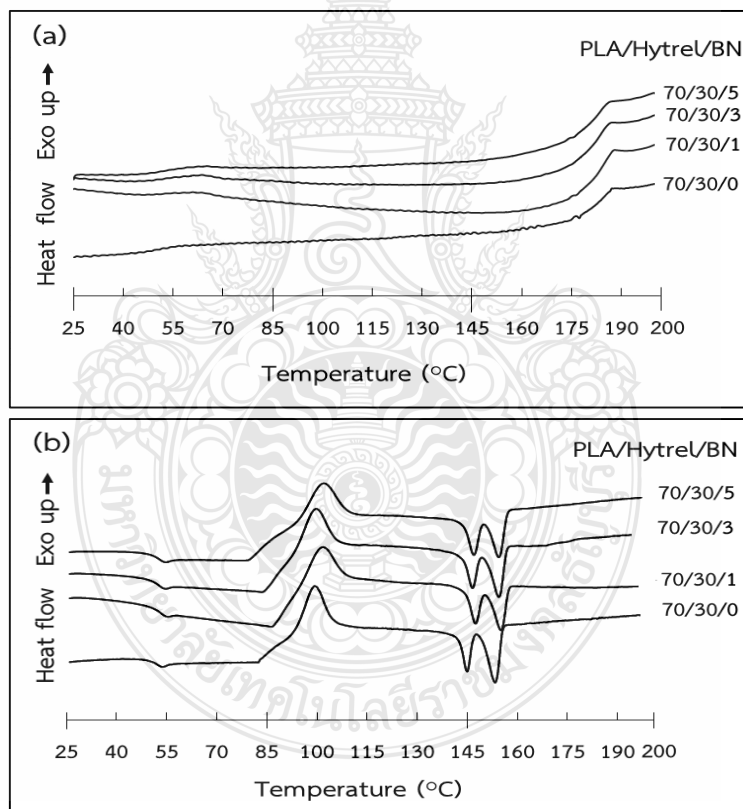
4.2.5.4 สมบัติทางความร้อนและพฤติกรรมกาเกิดผลึก

ภาพที่ 4.22 แสดงเทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและพฤติกรรมกาเกิดผลึกของ 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ด้วยเทคนิค DSC ในขั้นตอนการเย็นตัวและการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ซึ่งการให้ความร้อนครั้งที่ 1 เป็นขั้นตอนการลบประวัติทางความร้อนของชิ้นงาน โดยตารางที่ 4.8 แสดงค่า T_g , T_{cc} , T_m , ΔH_m ,

ΔH_{cc} และ χ_c ของ PLA ใน 70/30 PLA/Hytrel และ PLA ใน PLA/Hytrel/BN ที่ได้จากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.8 พารามิเตอร์จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวและการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 1, 3 และ 5 phr

PLA/Hytrel/BN (wt%/wt%/phr)	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	ΔH_m (J/g)	ΔH_{cc} (J/g)	$\chi_{c,PLA}$ (%)
70/30/0	52.4	100.8	146.3	154.7	20.8	14.4	9.8
70/30/1	52.6	102.6	148.1	155.7	17.9	13.8	6.3
70/30/3	52.9	101.1	147.7	155.6	20.0	14.6	8.3
70/30/5	53.2	103.3	148.1	155.6	19.4	14.0	8.3



ภาพที่ 4.22 DSC เทอร์โมแกรมของ PLA, Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 phr ที่ได้จาก (a) ขั้นตอนการเย็นตัว และ (b) ขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2

จากภาพที่ 4.22(a) แสดงให้เห็นได้ว่าไม่ปรากฏพีก T_c ของ PLA ใน PLA/Hytrel/BN ทุกอัตราส่วนในขั้นตอนการเย็นตัว เนื่องจาก PLA มีอัตราการเกิดผลึกช้ามาก ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตาม ภาพที่ 4.22(b) แสดงพีกของทั้ง T_g , T_{cc} และ T_m ของ PLA ใน PLA/Hytrel/BN โดยมีรูปแบบเทอร์โมแกรมคล้ายกับของ 70/30 PLA/Hytrel โดยทั้ง T_g , T_{cc} และ T_m ของ PLA ใน PLA/Hytrel/BN มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเท่านั้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงว่าเบนโทไนด์ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกให้กับ PLA อีกทั้งยังทำให้ระดับการเกิดผลึกลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องจากอนุภาคของเบนโทไนด์ขัดขวางการจัดเรียงตัวของ PLA นอกจากนี้ ยังปรากฏพีก T_m ของ PLA เกิดขึ้น 2 ตำแหน่ง เช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกับที่ได้กล่าวมาแล้ว

4.2.5.5 เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability)

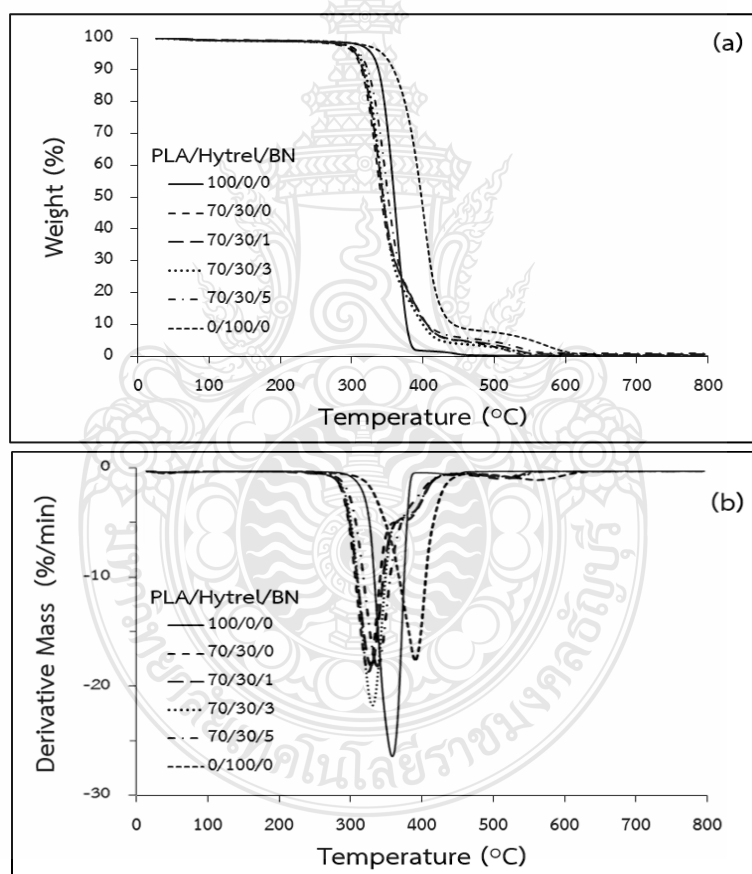
ตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.23 แสดงเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA, Hytrel, 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ด้วยเทคนิควิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) ในเทอมของอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (T_{onset}), อุณหภูมิการสลายตัวร้อยละ 50 ($T_{50\%}$), อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว ($T_{end\ set}$) และอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด (T_{max}) ที่ทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 25-800 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.9 อุณหภูมิการสลายตัวของ PLA, Hytrel, 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนด์ 1, 3 และ 5 phr

PLA/Hytrel/BN (wt%/wt%/phr)	T_{onset1} (°C)	$T_{end\ set1}$ (°C)	T_{onset2} (°C)	$T_{end\ set2}$ (°C)	T_{onset3} (°C)	$T_{end\ set3}$ (°C)	$T_{50\%}$ (°C)	T_{max} (°C)
100/0/0	341.4	379.2	-	-	-	-	360.6	364.7
0/100/0	369.0	421.0	531.0	612.3	-	-	397.5	401.4
70/30/0	312.2	349.0	371.8	411.0	492.0	545.2	341.0	335.6
70/30/1	315.0	354.0	375.5	410.7	504.0	555.6	343.6	338.7
70/30/3	318.0	355.3	377.0	411.6	502.7	558.6	344.0	340.8
70/30/5	322.6	374.5	505.3	561.5	-	-	350.8	347.7

ดังตารางที่ 4.9 และจากภาพที่ 4.23 พบว่า PLA มีการสลายตัวขั้นตอนเดียวในช่วงอุณหภูมิ 341.4-379.2 องศาเซลเซียส (T_{onset} - $T_{end\ set}$) โดยมี $T_{50\%}$ และ T_{max} ที่ 360.6 และ 364.7 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ขณะที่ Hytrel มีการสลายตัว 2 ชั้น โดยการสลายตัวหลักปรากฏในช่วงอุณหภูมิ 369.0-421.0 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของบล็อกที่อ่อน (พอลิอีเทอร์ไกลคอล)

และชั้นที่ 2 เป็นการสลายตัวของบล็อกที่แข็ง (PBT) ในช่วงอุณหภูมิ 531.0-612.3 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนน้อย โดยมี $T_{50\%}$ และ T_{max} (หลัก) ที่อุณหภูมิ 397.5 และ 401.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงว่า Hytrel มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่า PLA อย่างไรก็ตาม เมื่อเติม Hytrel ใน PLA ปริมาณร้อยละ 30 พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวของ 70/30 PLA/Hytrel เกิดขึ้น 3 ชั้น ซึ่งเป็นของ PLA และ Hytrel ดังอุณหภูมิในตารางที่ 4.9 ซึ่งทั้งเฟส PLA และ Hytrel ในพอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนลดลง เนื่องจากเฟสที่แตกต่างกัน 2 เฟส ทำให้ความร้อนผ่านเข้าไปในชิ้นงานตามรอยต่อระหว่างเฟสได้ง่าย อย่างไรก็ตาม การใส่เบนโทไนต์ช่วยให้เสถียรภาพทางความร้อนของ PLA/Hytrel/BN เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับของพอลิเมอร์ผสมล้วนเนื่องจากแผ่นซีทเบนโทไนต์ขัดขวางการส่งผ่านความร้อนเข้าไปในชิ้นงาน โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเบนโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น [43, 47] นอกจากนี้ ชิ้นงานทั้งหมดสลายตัวได้เกือบทั้งหมดโดยแทบไม่มีชาร์ (Char) เหลืออยู่เลย (ภาพที่ 4.23(a))



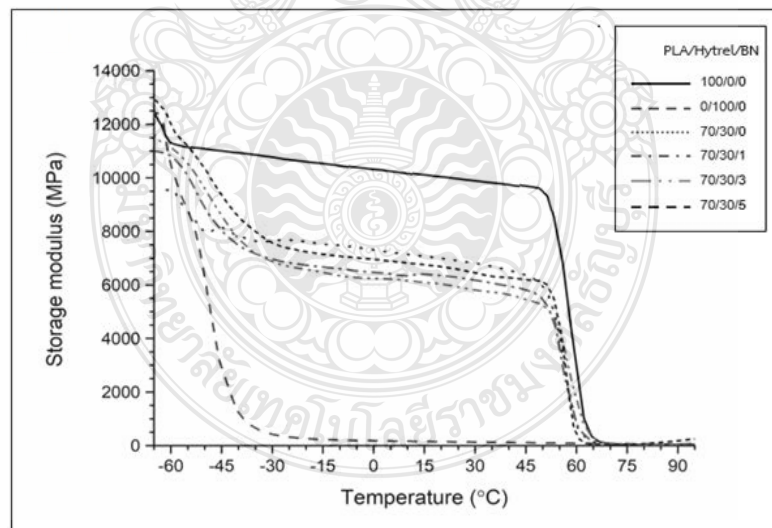
ภาพที่ 4.23 (a) TGA และ (b) DTG เทอร์โมแกรมของ PLA, Hytrel, 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr

4.2.6 สมบัติเชิงกลพลวัต

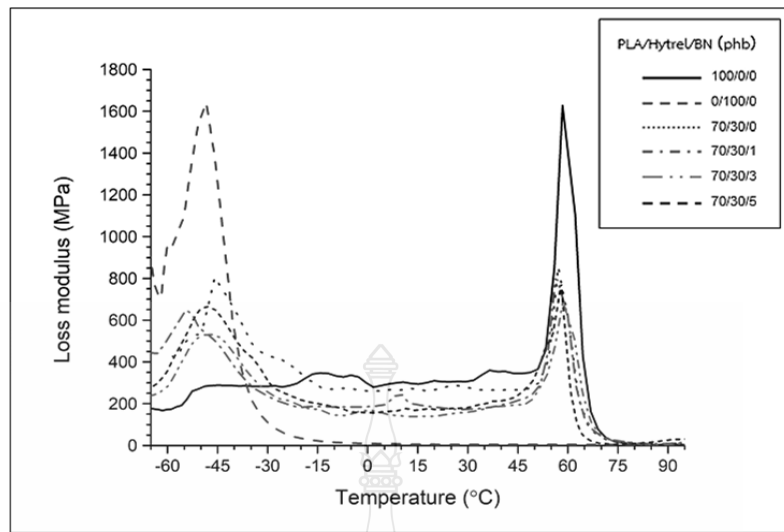
ภาพที่ 4.24-4.26 แสดงมอดุลัสสะสม (Storage modulus, E'), มอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus, E'') และแทนเจนต์สูญเสีย (Loss tangent, $\tan\theta$) เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ตามลำดับ (รายงานผลในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -65 ถึง 95 องศาเซลเซียส) ของ PLA, Hytrel, 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN (BN = 1, 3 และ 5 phr) โดยมีค่า E' ที่อุณหภูมิ -50 และ 25 องศาเซลเซียสและ T_g ที่ได้จากรูป E' , E'' และ $\tan\theta$ แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 สมบัติเชิงกลพลวัตของ PLA, Hytrel, 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 1, 3 และ 5 phr

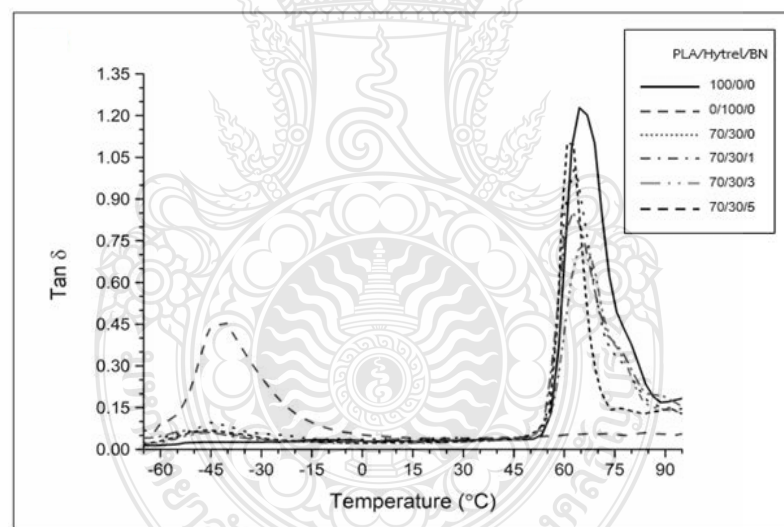
PLA/Hytrel/BN (wt%/wt%/phr)	E' ที่ -50°C (GPa)	E' ที่ 25°C (GPa)	T_g (°C) จาก E'	T_g (°C) จาก E''	T_g (°C) จาก $\tan\theta$
100/0/0	11.0	9.6	53.4	59.8	65.0
0/100/0	6.6	-	-52.7	-47.8	-41.0
70/30/0	7.9	7.0	-60.0, 51.0	-48.0, 57.0	-45.0, 62.3
70/30/1	8.8	6.3	-56.0, 51.6	-54.0, 57.8	-47.0, 64.0
70/30/3	9.4	6.0	-55.5, 53.2	-46.0, 60.0	-47.0, 65.0
70/30/5	10.2	6.6	-58.0, 53.6	-47.5, 59.0	-47.0, 65.0



ภาพที่ 4.24 มอดุลัสสะสมของ PLA, Hytrel, 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr



ภาพที่ 4.25 มอดุลัสสูญเสียของ PLA, Hytrel, 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr



ภาพที่ 4.26 แทนเจนต์สูญเสียของ PLA, Hytrel, 70/30 PLA/Hytrel และ PLA/Hytrel/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr

ภาพที่ 4.24 แสดง E' ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ จะสังเกตเห็นบริเวณที่แตกต่างกัน คือ บริเวณคล้ายแก้ว (Glass-like) ที่มีค่า E' สูง, บริเวณการเปลี่ยนสภาพ (Transition) และบริเวณคล้ายยาง (Rubber-like) ที่มีค่า E' ต่ำ โดย E' ของ PLA ที่อุณหภูมิ -50 และ 25 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 11.0 GPa และ 9.6 GPa ตามลำดับ เนื่องจาก PLA มีสภาพคล้ายแก้ว ($T_g = 53.4$ องศาเซลเซียส) จึงทำ

ให้มี E' สูง ในขณะที่ Hytrel มี E' ต่ำกว่าของ PLA มาก (6.6 GPa ที่ -50 องศาเซลเซียสและไม่พบค่า E' ที่ 25 องศาเซลเซียส) เนื่องจากเข้าสู่สภาพคล้ายยาง ($T_g = -52.7$ องศาเซลเซียส) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของยังส์มอดุลัสที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้น 70/30 PLA/Hytrel จึงมีค่า E' ต่ำกว่า PLA แต่สูงกว่า Hytrel เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิเดียวกัน (ที่ -50 และ 25 องศาเซลเซียส) เป็น 7.9 GPa และ 7.0 GPa ตามลำดับ และพบ T_g ปรากฏขึ้น 2 พีก ซึ่งค่าที่ต่ำกว่าเป็นของ Hytrel (-60.0 องศาเซลเซียส) และค่าที่สูงกว่าเป็นของ PLA (51.0 องศาเซลเซียส) ซึ่งแสดงถึงความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์และเมื่อใส่เบนโทไนด์พบว่าค่า E' ที่ -50 องศาเซลเซียส ของ PLA/Hytrel/BN ทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณเบนโทไนด์ที่เพิ่มขึ้น แสดงว่า PLA/Hytrel/BN มีความแข็งตึงเพิ่มขึ้น [41] เนื่องจากอนุภาคของเบนโทไนด์ขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในขณะที่ค่า E' ที่ 25 องศาเซลเซียส ของ PLA/Hytrel/BN ทุกอัตราส่วนเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและมีค่าต่ำกว่าของพอลิเมอร์ผสมล้วน นอกจากนี้พบว่า T_g ของ PLA/Hytrel/BN มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณของเบนโทไนด์ที่เพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องมาจากเบนโทไนด์ขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ภาพที่ 4.25 แสดง E'' ของชิ้นงานเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ จากกราฟสามารถหาค่า T_g ของชิ้นงานได้จากพีกของ E'' ดังแสดงค่าในตารางที่ 4.10 ซึ่งพบว่า T_g ของ PLA มีค่าเท่ากับ 59.8 องศาเซลเซียส ขณะที่ T_g ของ Hytrel มีค่าเท่ากับ -47.8 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิเมอร์ผสมล้วน มี T_g ปรากฏขึ้น 2 พีก ซึ่งเป็นของ Hytrel (-48.0 องศาเซลเซียส) และ PLA (57.0 องศาเซลเซียส) ส่วน T_g ของ Hytrel ใน PLA/Hytrel/BN มีค่าลดลง (-46.0 ถึง -54.0 องศาเซลเซียส) และของ PLA มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (57.8-60.0 องศาเซลเซียส) เมื่อเปรียบเทียบกับของพอลิเมอร์ผสมล้วน ซึ่งเป็นการยืนยันถึงความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสอง

ภาพที่ 4.26 แสดง $\tan\theta$ ของชิ้นงานเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ จากกราฟสามารถหาค่า T_g ของชิ้นงานได้จากพีกของ $\tan\theta$ ดังแสดงตารางที่ 4.10 ซึ่งพบว่า T_g ของ PLA มีค่าเท่ากับ 65.0 องศาเซลเซียส ขณะที่ T_g ของ Hytrel มีค่าเท่ากับ -41.0 องศาเซลเซียส นอกจากนี้พบว่า พอลิเมอร์ผสมล้วนมี T_g ปรากฏขึ้น 2 พีก เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นของ Hytrel (-45.0 องศาเซลเซียส) และของ PLA (62.3 องศาเซลเซียส) ส่วน T_g ของ Hytrel ในนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลง (-47.0 องศาเซลเซียส) และของ PLA มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (64.0-65.0 องศาเซลเซียส) เมื่อเปรียบเทียบกับของพอลิเมอร์ผสมล้วน ซึ่งเป็นการยืนยันถึงความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ทั้งสอง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การทดสอบและวิเคราะห์ผลด้านสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของ PLA, HytreL, พอลิเมอร์ผสม PLA/HytreL และพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต PLA/HytreL/BN สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า HytreL ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเหนียวให้กับ PLA โดยปรับปรุงทั้งความทนแรงกระแทกและการยืดตัว ณ จุดขาด ของ PLA ได้อย่างดี โดยเฉพาะที่ใส่ HytreL ร้อยละ 30 หากแต่ไม่ปรับปรุงความทนแรงดึงและยังสัมพันธ์ของ PLA/HytreL ดังนั้น จึงได้นำอัตราส่วน 70/30 PLA/HytreL ไปเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตโดยเติมเบนโทไนต์ (1, 3 และ 5 phr)

5.1.2 จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยา พบว่า พื้นผิวรอยแตกของ PLA มีลักษณะเรียบ ซึ่งเมื่อใส่ HytreL ใน PLA พบว่า พื้นผิวรอยแตกของ PLA/HytreL มีความหยาบมากขึ้น โดยมีอนุภาคทรงกลมของ HytreL กระจายอยู่ในเมทริกซ์ PLA ซึ่งการใส่เบนโทไนต์ทำให้อนุภาคทรงกลมของ HytreL มีขนาดเล็กลง แสดงว่า HytreL และ PLA เข้ากันได้ดีขึ้น

5.1.3 จากการทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต พบว่า การใส่ HytreL ไม่มีผลต่อการปรับปรุงอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตของ PLA/HytreL อย่างไรก็ตาม การใส่เบนโทไนต์มีผลทำให้อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตของ PLA/HytreL/BN มีค่าเพิ่มขึ้นได้

5.1.4 จากการทดสอบอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อน พบว่า PLA/HytreL/BN ทุกอัตราส่วนมีอุณหภูมิการโค้งงอเนื่องจากความร้อนใกล้เคียงกับ PLA และ 70/30 PLA/HytreL

5.1.5 จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและพฤติกรรมการเกิดผลึกด้วยเทคนิค DSC พบว่า PLA บริสุทธิ์, PLA ใน PLA/HytreL และ PLA ใน PLA/HytreL/BN ไม่ปรากฏ T_c ในขั้นตอนการเย็นตัวภายหลังการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ดังนั้น การใส่ HytreL และเบนโทไนต์ไม่ส่งผลต่อการเกิดผลึกขณะเย็นตัวของ PLA และในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 พบว่า T_{cc} ของ PLA ทั้งใน PLA/HytreL และ PLA/HytreL/BN มีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ HytreL และเบนโทไนต์ที่เพิ่มขึ้น และระดับความเป็นผลึกของ PLA ลดลง แสดงว่าทั้ง HytreL และเบนโทไนต์ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกให้กับ PLA

5.1.6 จากการวิเคราะห์โครงสร้างของ PLA/HytreL/BN ด้วยเทคนิค XRD และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่า PLA/HytreL/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 1 phr มีโครงสร้างผสมระหว่างเอ็กซ์ฟลิเอตและอินเทอร์คาลेट ส่วนโครงสร้างของ PLA/HytreL/BN ที่ใส่เบนโทไนต์ 3 และ 5 phr มีโครงสร้างแบบอินเทอร์คาลेट

5.1.7 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของ PLA/Hytrel/BN พบว่า การใส่เบนโทไนด์ไม่มีผลต่อการปรับปรุงยังสัมมอดูลัสและความทนแรงดึง อีกทั้งทำให้ความทนแรงกระแทกและการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าต่ำกว่าของ 70/30 PLA/Hytrel หากแต่ยังมีค่ามากกว่าของ PLA บริสุทธิ์

5.1.8 จากการทดสอบดัชนีการหลอมไหล พบว่า การใส่ Hytrel ทำให้ดัชนีการหลอมไหลของ 70/30 PLA/Hytrel มีค่าสูงกว่าของ PLA บริสุทธิ์ ขณะที่การใส่เบนโทไนด์ทำให้ PLA/Hytrel/BN มีดัชนีการหลอมไหลสูงกว่า 70/30 PLA/Hytrel

5.1.9 จากการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน (ทีจีเอ) พบว่า 70/30 PLA/Hytrel มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่า PLA หากแต่การใส่เบนโทไนด์ช่วยให้เสถียรภาพทางความร้อนของ PLA/Hytrel/BN สูงกว่าของ 70/30 PLA/Hytrel ได้

5.1.10 การทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่า Hytrel มีมอดูลัสสะสมต่ำกว่า PLA จึงทำให้ 70/30 PLA/Hytrel มีมอดูลัสสะสมต่ำกว่า PLA อย่างไรก็ตาม การใส่เบนโทไนด์มีผลทำให้มอดูลัสสะสมของ PLA/Hytrel/BN เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พบว่า มี T_g เกิดขึ้น 2 พีก ในกราฟของมอดูลัสสูญเสีย และแทนเจนต์สูญเสีย ซึ่งยืนยันความไม่เข้ากันของ Hytrel และ PLA

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาการใช้สารเชื่อมประสาน (compatibilizer) ร่วมกับเบนโทไนด์

5.2.2 ศึกษาการใช้สารเสริมแรงประเภทอื่นแทนเบนโทไนด์

บรรณานุกรม

- [1] Hakan Karan, Christiane Funk, Martin Grabert, Melanie Oey, Ben Hankamer. (2019). **Green Bioplastics as Part of a Circular Bioeconomy**. Trends in Plant Science, 24(3). 237-249
- [2] Gareth Ross, Sukunya Ross, Brian, Tighe. (2017). **Chapter 23 - Bioplastics: New Routes, New Products**. Brydson's Plastics Materials (Eighth Edition), 631-652
- [3] Adriaan S Luyt, Sarah S.Malik. (2019). **16 - Can Biodegradable Plastics Solve Plastic Solid Waste Accumulation?**. Plastics to Energy, 403-423
- [4] ธนา บุนนาค. (2560). **พฤติกรรมกร่อยสลายทางชีวภาพและความเข้ากันได้ของพอลิแลคติกแอซิดที่เติมแต่งด้วยแอซิติเลตเซลลูโลส**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
- [5] นาวิณ เนสุสินธุ์. (2554). **การย่อยสลายพลาสติกชีวภาพในดินจากบ่อฝังกลบขยะผสมกากตะกอนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
- [6] อมรรรัตน์ เลิศวรสิริกุล. (2554). **Poly(lactic acid):polyester from renewable resources**. วิศวกรรมสาร มก., 24(77). 99-110
- [7] วราภรณ์ จันทาสี. (2557). **ประสิทธิภาพการย่อยสลายพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพของจุลินทรีย์**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
- [8] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. (2561). **บทที่ 4 รายละเอียดข้อมูลพลาสติกชีวภาพประเภทพอลิแลคติกแอซิด (Poly(Lactic Acid))** [ออนไลน์]. โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ, 1-21. สืบค้นจาก http://asp.plastics.or.th:8001/files/article_file/20180624235102u.pdf
- [9] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. (2561). **งานวิจัยและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพชนิดPLA(รายงานการวิจัย)**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [10] Madhavan Nampoothiri K., Nimisha RajendranNair, Rojan PappyJohn. (2010). **An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research**. Bioresource Technology, 101(24). 8493-8501
- [11] กลุ่มส่งเสริมอุตสาหกรรมชีวภาพ. (2561). **พลาสติกที่สลายตัวได้ทางชีวภาพ: Polylactic acid (PLA)** [ออนไลน์]. สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม, 1-18. สืบค้นจาก <http://www.ocsb.go.th/upload/bioindustry/fileupload/9757-9874.pdf>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [12] ณชฎ พิณสุรงค์. (2554). การเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกจากแป้งและโปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้น. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยศิลปากร)
- [13] Dr. Qahtan. Adnan. (2017). **Lecture No. (6) Thermoplastic Elastomers Materials.** Rubber Technology.1-7
- [14] Jasna D., jonlagic and Marija S., Nikolic. (2016). **Thermoplastic Copolyester Elastomers.** Handbook of Engineering and Specialty Thermoplastics. 377-428
- [15] วนิดา นันตะยศ. (2560). **เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนซ์จากการเบลนด์ยางธรรมชาติกราฟต์ด้วยพอลิอะซิโตนอะซิโทกซีเอทิลเมทาคริเลทกับพอลิเอไมด์-12.** (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์)
- [16] Polyone. (2015). **Thermoplastic elastomer (TPE) FAQs** [online]. Retrieved from <http://www.polyone.com/products/thermoplastic-elastomers/tpe-knowledge-center/tpe-faqs>
- [17] Jing Huang, Jun Wang, Yaxin Qiu, Defeng Wu. (2016). **Mechanical properties of thermoplastic polyester elastomer controlled by blending with poly(butylene terephthalate).** Polymer Testing, 55. 152-159
- [18] Laurence W.McKeen. (2010). **Chapter 10 - Thermoplastic Elastomers.** Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers (Second Edition). 245-247
- [19] Nagai Y., Ogawa T., Nishimoto Y., Ohishi F. (2010). **Analysis of weathering of a thermoplastic polyester elastomer II. Factors affecting weathering of a polyether–polyester elastomer.** Polymer Degradation and Stability, 65(2). 217-224
- [20] Geoffrey Holden. (2011). **6 - Thermoplastic Elastomers.** Applied Plastics Engineering Handbook Processing and Materials Plastics Design Library. 77-91
- [21] สมจิตต์ ตั้งชัยวัฒนา. (2548). **พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend)** [ออนไลน์]. โครงการพินิจส์และวิศวกรรม. 1-4. สืบค้นจาก http://www.dss.go.th/images/st-article/cp_5_2548_polymer_blend.pdf
- [22] Jatuphorn Wootthikanokkhan. (2557). **PolymerBlends and Composites** [online]. King Mongkut’s University of Technology Thonburi. 1-71. Retrieved from <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/images/Introduction%20to%20polymer%20blends%20and%20composites.pdf>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [23] จารีนุช โรจน์เสถียร. (2554). ศึกษาการผสมระหว่างสไตรีนอะครีโลไนไตรล์โคพอลิเมอร์ออฟเกรดและยางธรรมชาติ. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยศิลปากร)
- [24] Yixin Deng, Changyi Yu, Peangpatu Wongwiwattana, Noreen L. Thomas. (2018). **Optimising Ductility of Poly(Lactic Acid)/Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate) Blends Through Co-continuous Phase Morphology.** Journal of Polymers and the Environment, 26(9). 3802–3816
- [25] De-Jun Kong, Huai-Na Wu, Jin-Chun Chai, Arul Arulrajah. (2017). **State-Of-The-Art Review of Geosynthetic Clay Liners.** Sustainability in Civil Engineering: from Sustainable Materials to Sustainable Cities, 9(11). 2110
- [26] ชวาล พรรคเจริญ, ภิมาะ วันแรก, นิพนธ์ สายแก้วราช. (2559). การศึกษาการลดปริมาณการรั่วซึมของน้ำในดินลูกรังโดยใช้เบนโทไนต์. โครงการงานวิศวกรรมชลประทาน (ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์)
- [27] ภัทรนันท์ ทวดอาจ. (2556). แร่ดินและการประยุกต์ใช้ในด้านเครื่องสำอาง. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์)
- [28] Henriette Monteiro Cordeiro de Azeredo, Luiz Henrique Capparelli Mattoso, Tara Habig McHugh. (2011). **Nanocomposites in food packaging-A Review.** Advances in Diverse Industrial Applications of Nanocomposites. DOI: 10.5772/14437
- [29] อำพร เสน่ห์. (2553). โพลีเมอร์นาโนคอมโพสิตสำหรับประยุกต์ใช้ทางการบรรจุ. วารสารบรรจุภัณฑ์ไทย, 19460. 56-58
- [30] Anamarija kutli, Gordan Bedekovi, Ivan Sobota. (2012). **Bentonite processing oplemenjivanje Bentonita.** Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 24. 61-65
- [31] หนึ่งฤทัย เปรมนิม. (2560). การเตรียมและสมบัติของวัสดุคอมโพสิต Poly(lactic acid) ที่เสริมแรงด้วยแบคทีเรียเซลลูโลส. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยศิลปากร)
- [32] อินทรีย์ ศรีสุข. (2560). การศึกษาการใช้ผงเปลือกไข่ไก่ผสมในอีพอกซีเรซิน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)
- [33] Laurence W.McKeen. (2016). **3 - Introduction to Plastics and Polymers.** Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers (Third Edition), 45-64
- [34] Sisi Wang, Sujuan Pang. (2016). **Isothermal Cold Crystallization, Heat Resistance, and Tensile Performance of Polylactide/Thermoplastic Polyester Elastomer Blends: Effects of Annealing and Reactive Compatibilizer.** Polymers (Basel), 8(12). 417

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [35] Dogan S.K., Boyacioglu S., Kodal M., Gokce M., Ozkoc G. (2017). **Thermally induced shape memory behavior, enzymatic degradation and biocompatibility of PLA/TPU blends: “Effects of compatibilization”**. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 71. 349-361
- [36] Abdo Dani., Gleadall Andrew., Sprengel Dirk., Silberschmidt Vadim V. (2018). **Experimental and Morphological Investigations of Fracture Behavior of PBT/TPEE**. Procedia structural Integrity Procedia, 13. 511-516
- [37] Najafi N., Heuzey M.C., Carreau P.J. (2012). **Polylactide (PLA)-clay nanocomposites prepared by melt compounding in the presence of a chain extender**. Composites Science and Technology, 72. 608-615
- [38] Liu Ru., Xiaoqian Yin., Anmin Huang., Chen Wang., Erni Ma. (2019). **Preparation of Organo-Montmorillonite Modified Poly(lactic acid) and Properties of Its Blends with Wood Flour**. Polymers MDPI, 11. 204
- [39] Aghjeh Masoud Razavi, Asadi Vahid, Mehdijabbar Pegah, Hossein Ali Khonakdar. (2016). **Application of linear rheology in determination of nanoclay localization in PLA/EVA/Clay nanocomposites: Correlation with microstructure and thermal properties** Composites Part B, 86. 273-284
- [40] Ebadi-Dehaghani Hassan, Ali Khonakdar Hossein, Barikani Mehdi, Hassan Jafari Seyed. (2015). **Experimental and theoretical analyses of mechanical properties of PP/PLA/clay nanocomposites**. Composites: Part B, 69. 133-144
- [41] Wacharawichanant S., Ounyai C., Rassamee P. (2017). **Effects of organoclay to miscibility, mechanical and thermal properties of poly(lactic acid) and propylene-ethylene copolymer blends**. Materials Science and Engineering, 233. 012016 DOI : 10.1088/1757-899X/223/1/012016.
- [42] สุภารัตน์ ปั้นพุ่มโพธิ์, รศ.ดร.เบญจวรรณ ประภักดี. (2561). **การย่อยสลายพอลิแลคติกแอซิดโดยกลุ่มจุลินทรีย์ในดินจากหลุมฝังกลบขยะและตะกอนน้ำเสีย โรงงานปลาทุ่นากระป๋อง. การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 6, 569-579**
- [43] Ozkoc Guralp, Kemaloglu Sebnem. (2009). **Morphology, Biodegradability, Mechanical, and Thermal Properties of Nanocomposite Films Based on PLA and Plasticized PLA**. Wiley InterScience, DOI : 10.1002/app.30772.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [44] ธาริณี นามพิชญ์, เรณูมาศ ทิพย์มณี, รัตนาวรรณ มกรพันธ์. (2555). **คุณสมบัติเชิงความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด/ยางธรรมชาติอีพอกไซด์/อแกโนเคลย์ นาโนคอมโพสิต**. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48: สาขาอุตสาหกรรมเกษตร, 34-41
- [45] เกรียงไกร พงศ์ธนาบุตร. (2556). **การศึกษาเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ของพอลิแลคติกแอซิดกับยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกไซด์**. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยศิลปากร)
- [46] Ishihara J., Harada M., Nakano K., and Enomoto K. (2016). **Toughening of polylactic acid by blending with thermoplastic elastomer** [online]. AIP Conference 1779, 080002. Retrieved from <https://doi.org/10.1063/1.4965546>.
- [47] Bitinisa Natacha, Fortunatib Elena, Verdejoa Raquel, Armentanob Ilaria, Torreb José Luigi, Kennyab María, Ángel Miguel, López- Manchado. (2014). **Thermal and bio-disintegration properties of poly(lactic acid)/natural rubber/organoclay nanocomposites**. Applied Clay Science, 93-94. 78-84
- [48] Wang Sisi, Pang Sujuan, Pan Lisha, Xu Nai, Huang Hanxiong, Li Tan. (2016). **Compatibilization of poly(lactic acid)/ethylene-propylene-diene rubber blends by using organic montmorillonite as a compatibilizer**. Applied Polymer Science, DOI: 10.1002/app.44192
- [49] Nature works. (n.d). **Ingeo™ Biopolymer 4043D Technical Data Sheet** [online]. Retrieved from https://www.natureworkslc.com/~/_media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_4043D_3D_monofilament_.pdf.
- [50] Dupont. (2014). **Hytrell G3548 NC010** [online]. Retrieved from http://www.gc.co.th/upload/datasheet/hytrell_g_3548_nc_010.pdf.
- [51] Mat web. (2019). **BYK Bentolite® H Bentonite** [online]. Retrieved from <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=93f3001cb13943919d6a2043cf8f10cb&ckck=1>.
- [52] Gbadebo Owolabi, Alex Peterson, Ed Habtour, Jaret Riddick, Michael Coatney, Adewale Olasumboye, Denzell Bolling. (2016). **Dynamic response of acrylonitrile butadiene styrene under impact loading** [online]. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1186/s40712-016-0056-0>.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [53] Shimadzu. (n.d). **DSC** [online]. Retrieved from <http://www.instruservltda.com/thermal.html>
- [54] Becthai. (2019). **Jeol - JEM-2100Plus / Transmission Electron Microscope** [online]. Retrieved from <http://www.becthai.com/en/products/435635-jeol---jem-2100plus-/-transmission-electron-microscope>.
- [55] Shimadzu. (n.d). **TG/DTA: DTG-60 / DTG-60H** [online]. Retrieved from <https://thermalsupport.com/wp-content/uploads/2018/05/T144.pdf>
- [56] Madical expo. (2019). **Thermogravimetric analyzer** [online]. Retrieved from <https://www.medicaexpo.fr/fabricant-medical/analyseurthermogravimetrique-43949.html>.
- [57] Fil B. A., Özmetin C., Korkmaz M. (2014). **Characterization and electrokinetic properties of montmorillonite**, Bulgarian Chemical Communications. 258-263.
- [58] Jinguo Zhang, Evangelos Manias and Charles A. Wilkie. (2008). **Polymerically Modified Layered Silicates: An Effective Route to Nanocomposites**, Nanoscience and Nanotechnology. 1597-1615.
- [59] Xiao-Ting, Rui-Ying Bao, Yan-Mei Li, Ming-Bo Yang. (2016). **Effect of chain entanglement on the melt-crystallization behavior of poly(l-lactide) acid**, Journal of Polymer Research, 23. 8

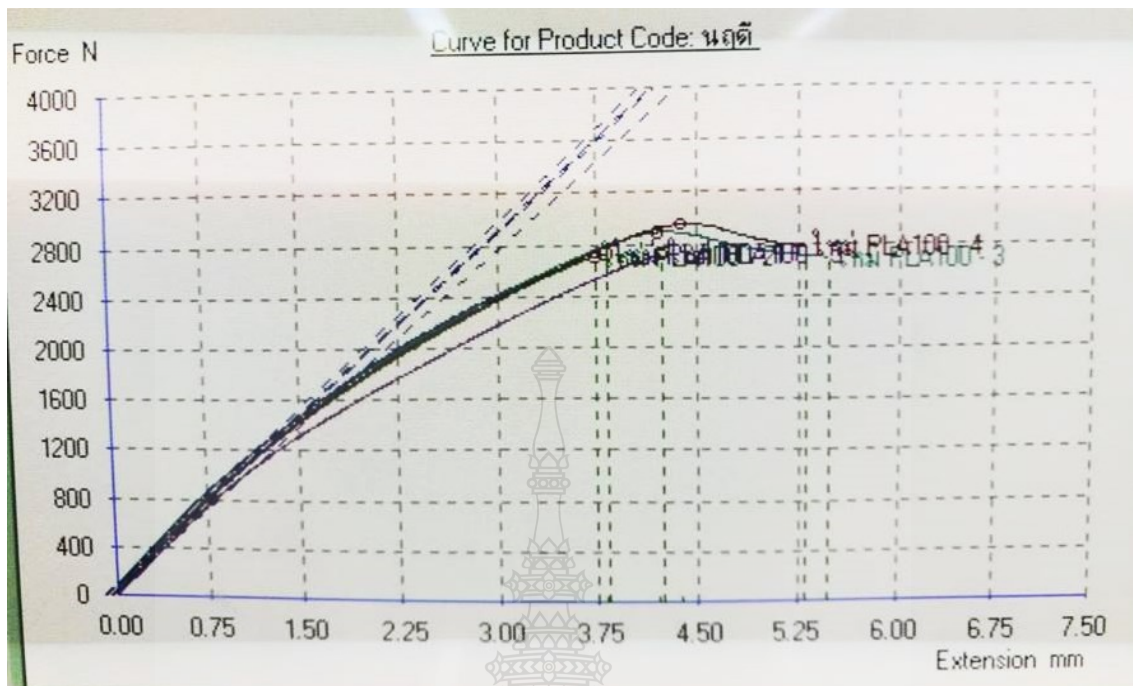


ภาคผนวก

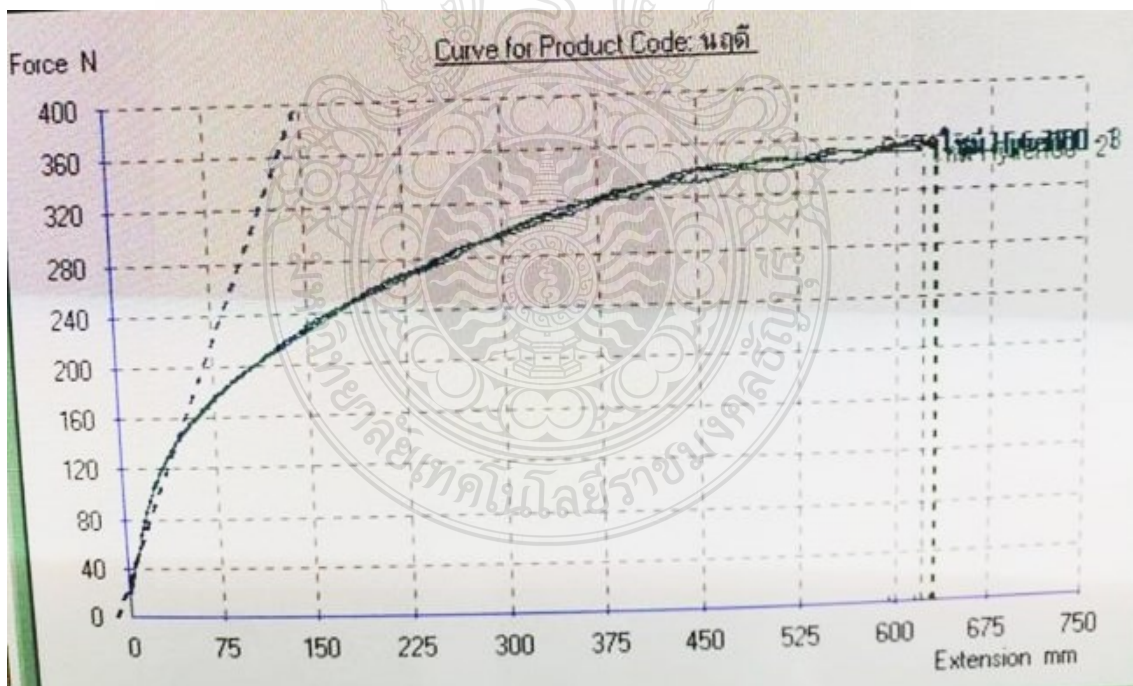


ภาคผนวก ก
กราฟผลการทดสอบความทนแรงดึงด้วยเครื่องยูนิเวอร์แซล

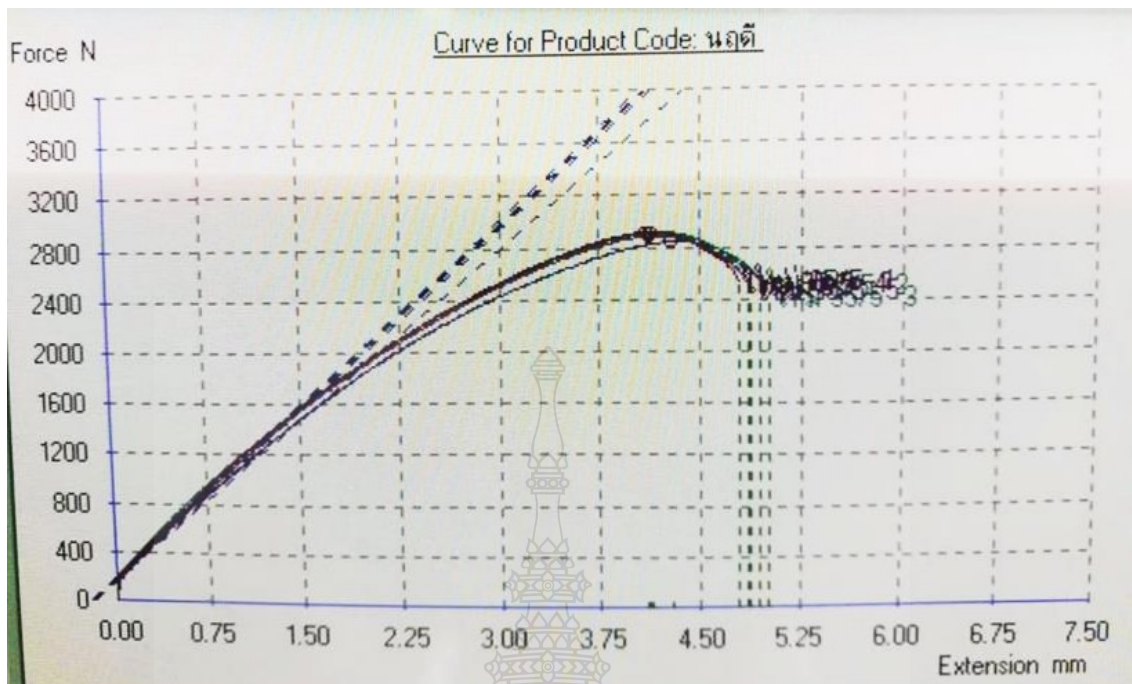




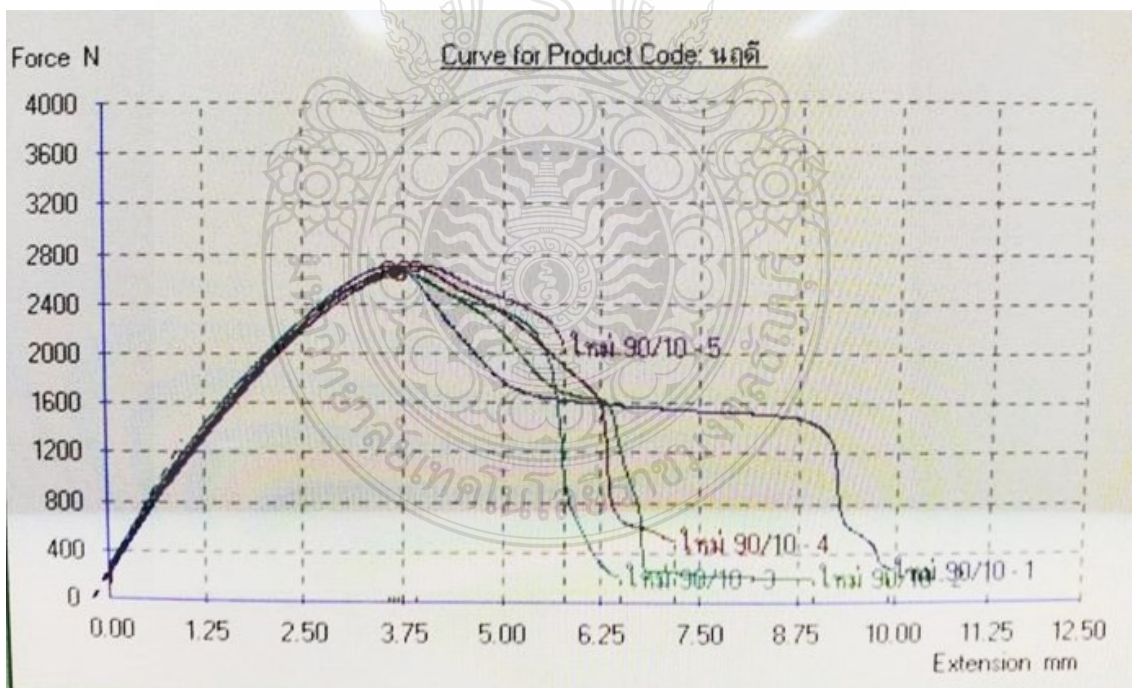
ภาพที่ 1-ก กราฟจากการทดสอบความทนแรงดึงของพอลิแลกติกแอซิด



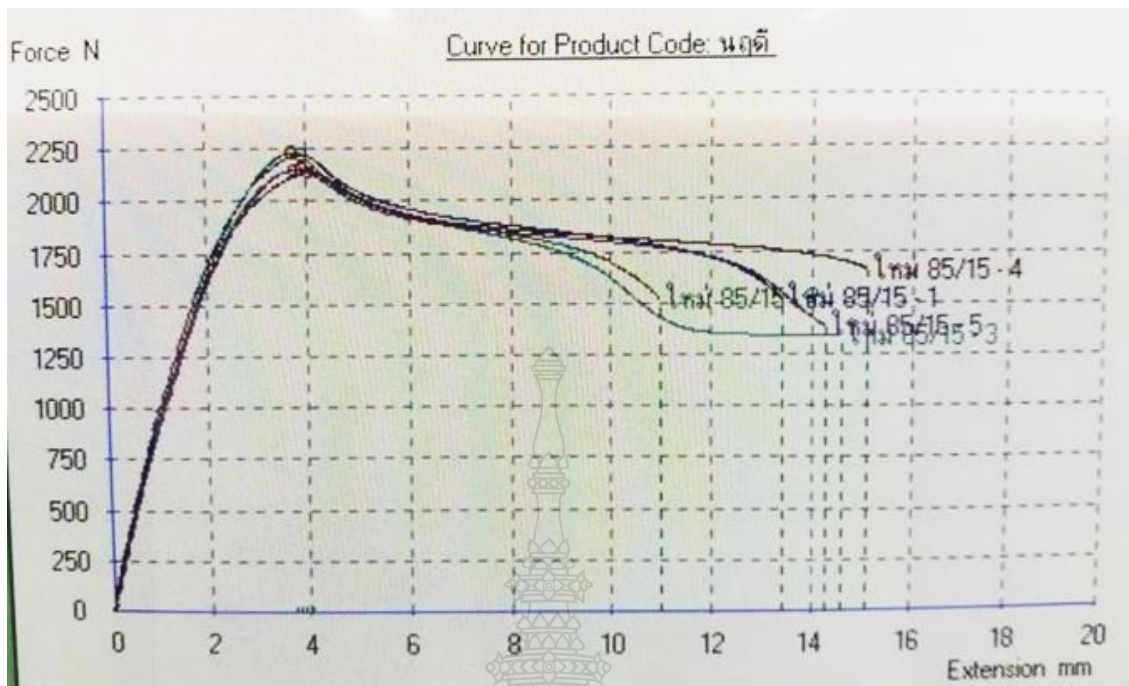
ภาพที่ 2-ก กราฟจากการทดสอบความทนแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกโพลีเอสเตอร์อีลาสโตเมอร์



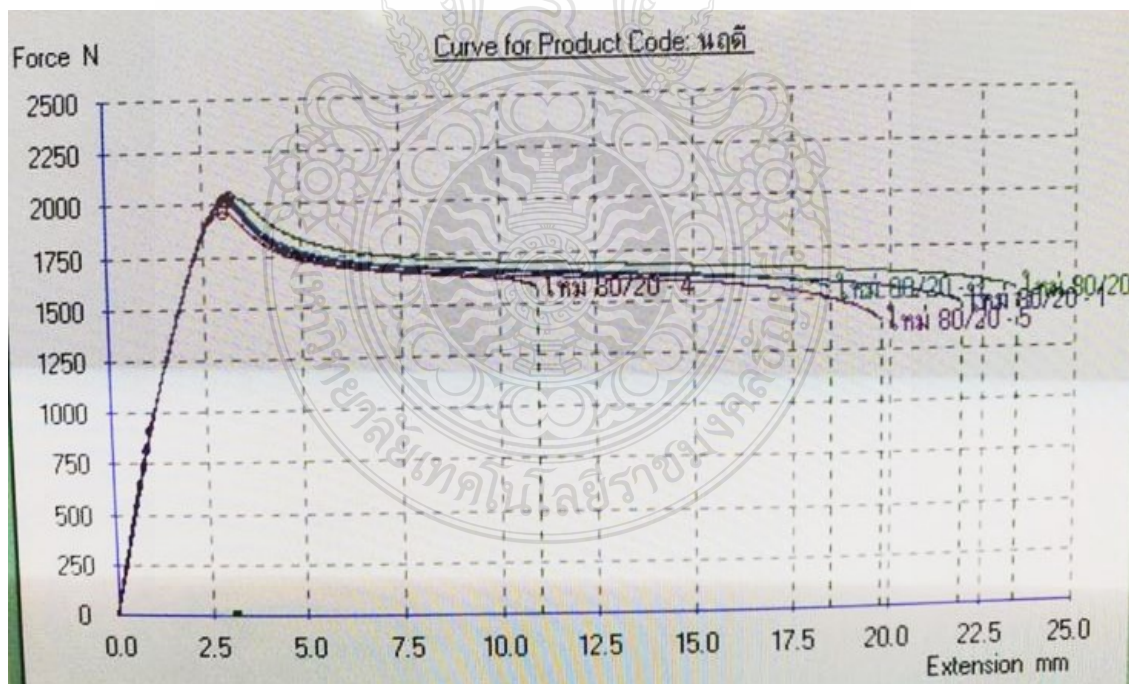
ภาพที่ 3-ก กราฟจากการทดสอบความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/Hytrel 95/5 (wt%/wt%)



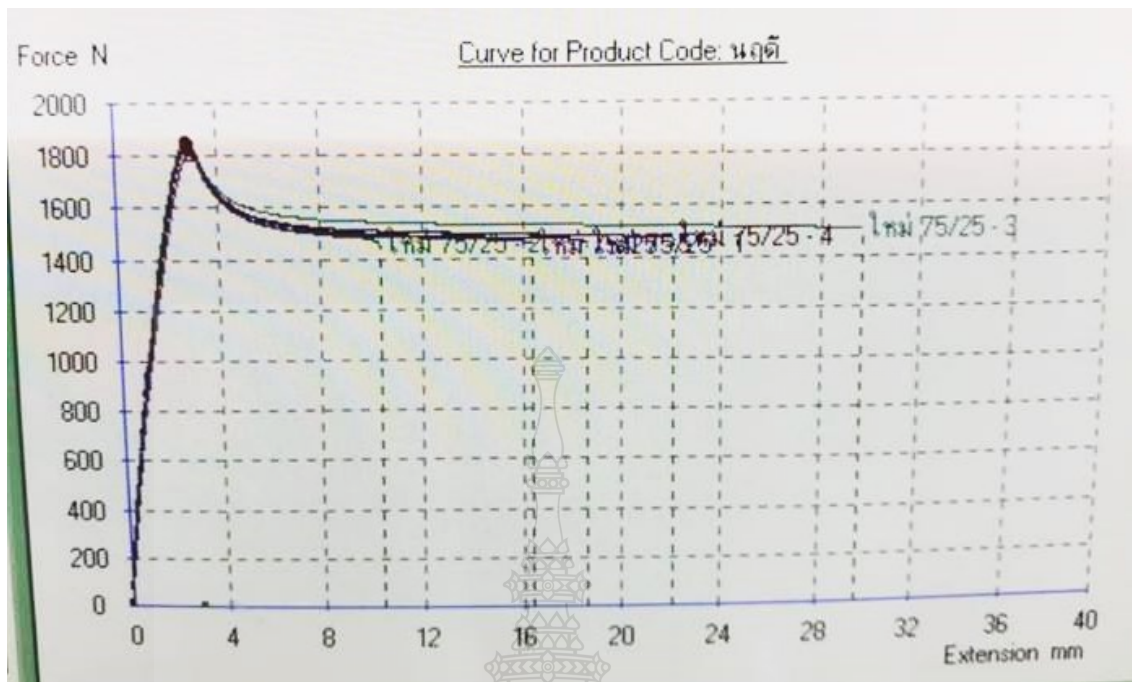
ภาพที่ 4-ก กราฟการทดสอบความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/Hytrel 90/10 (wt%/wt%)



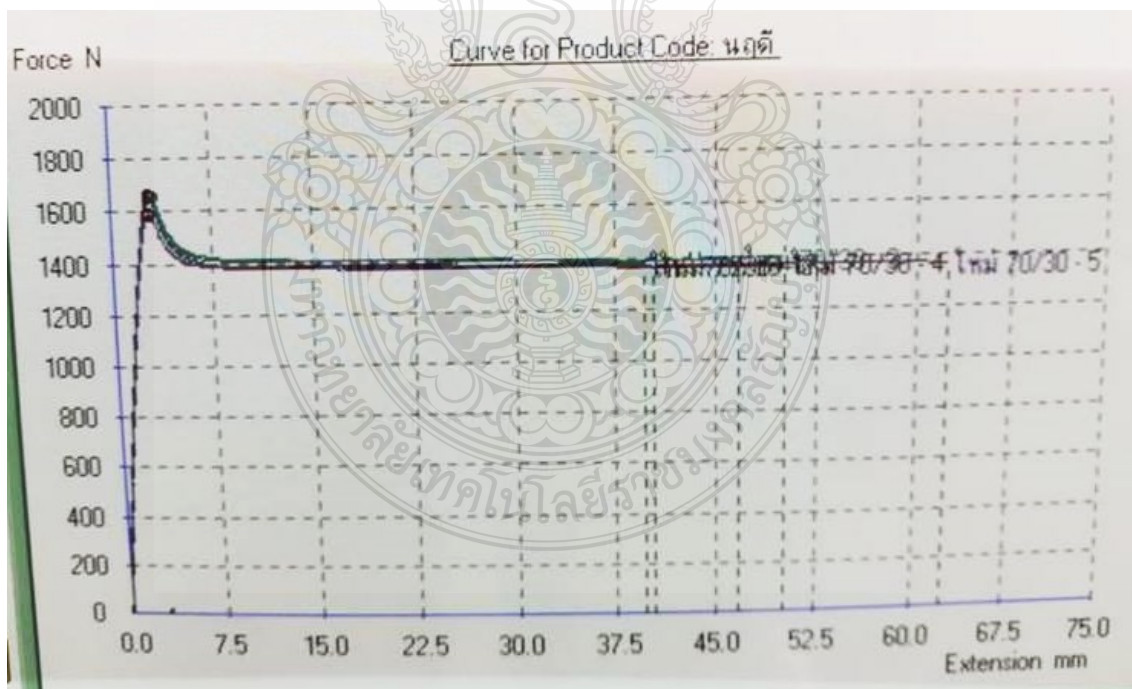
ภาพที่ 5-ก กราฟการทดสอบความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/Hytrel 85/15 (wt%/wt%)



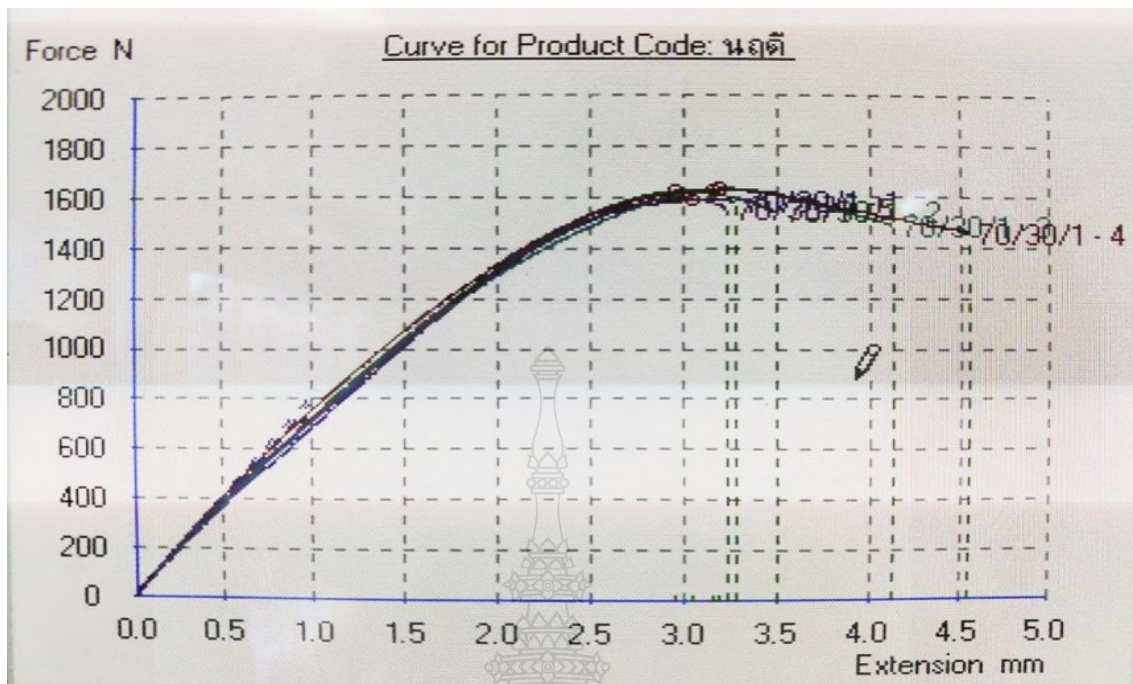
ภาพที่ 6-ก กราฟการทดสอบความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/Hytrel 80/20 (wt%/wt%)



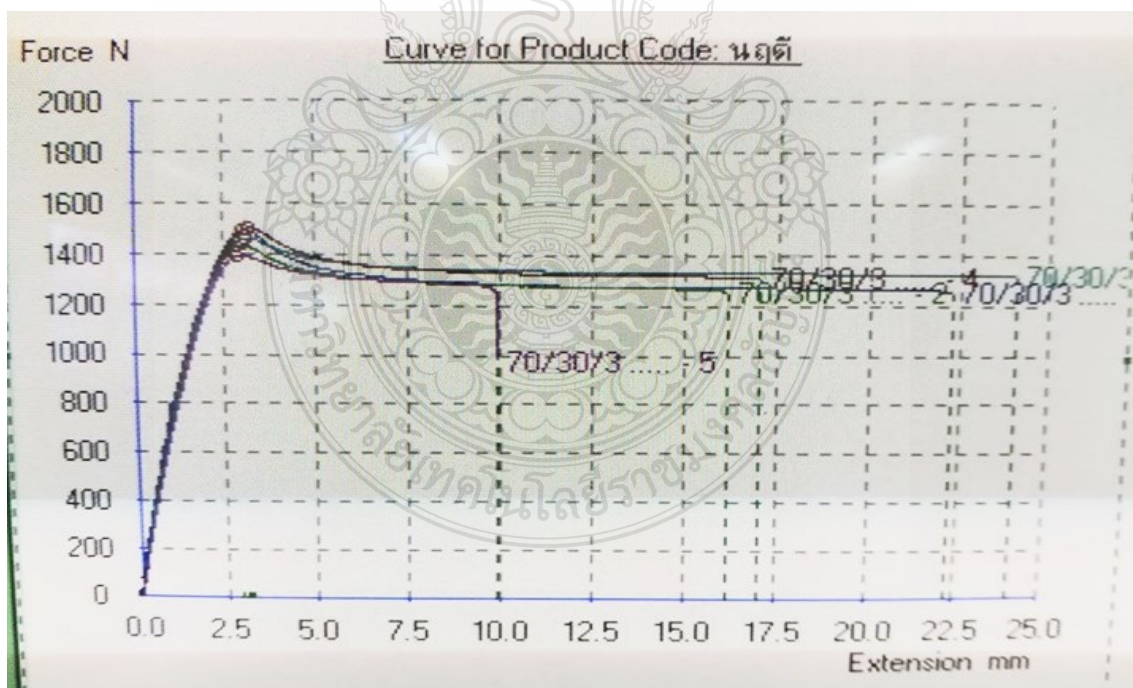
ภาพที่ 7-ก กราฟการทดสอบความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/Hytrel 75/25 (wt%/wt%)



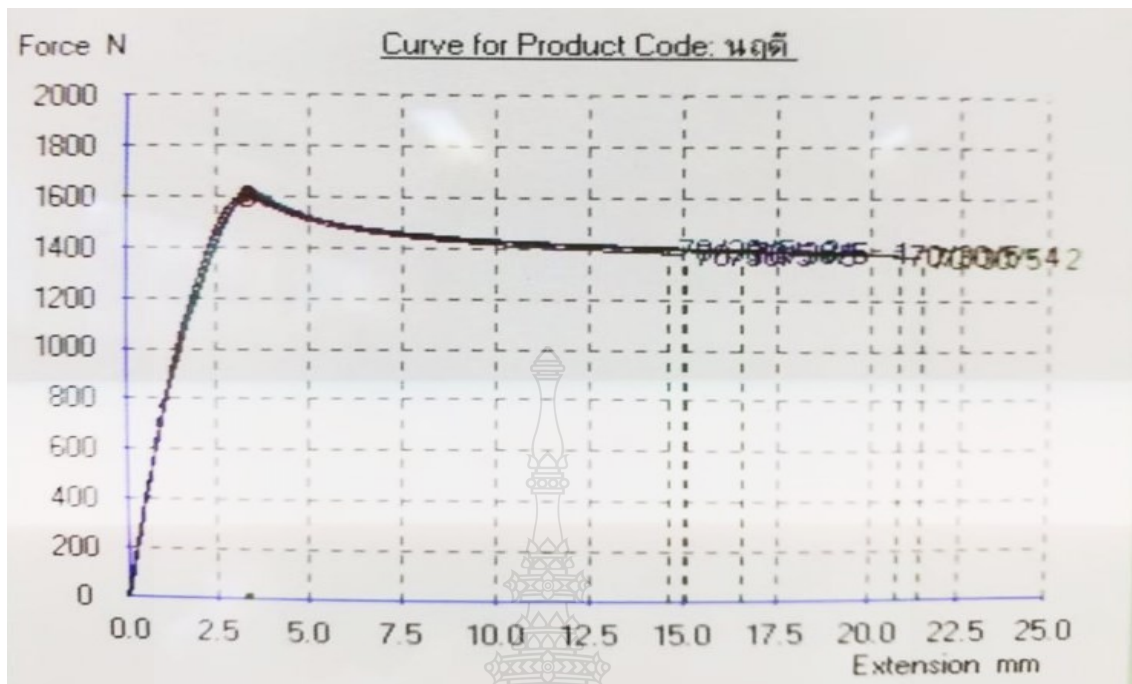
ภาพที่ 8-ก กราฟการทดสอบความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/Hytrel 70/30 (wt%/wt%)



ภาพที่ 9-ก กราฟการทดสอบความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตที่เติมเบนโทไนต์ 1 phr



ภาพที่ 10-ก กราฟการทดสอบความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตที่เติมเบนโทไนต์ 3 phr

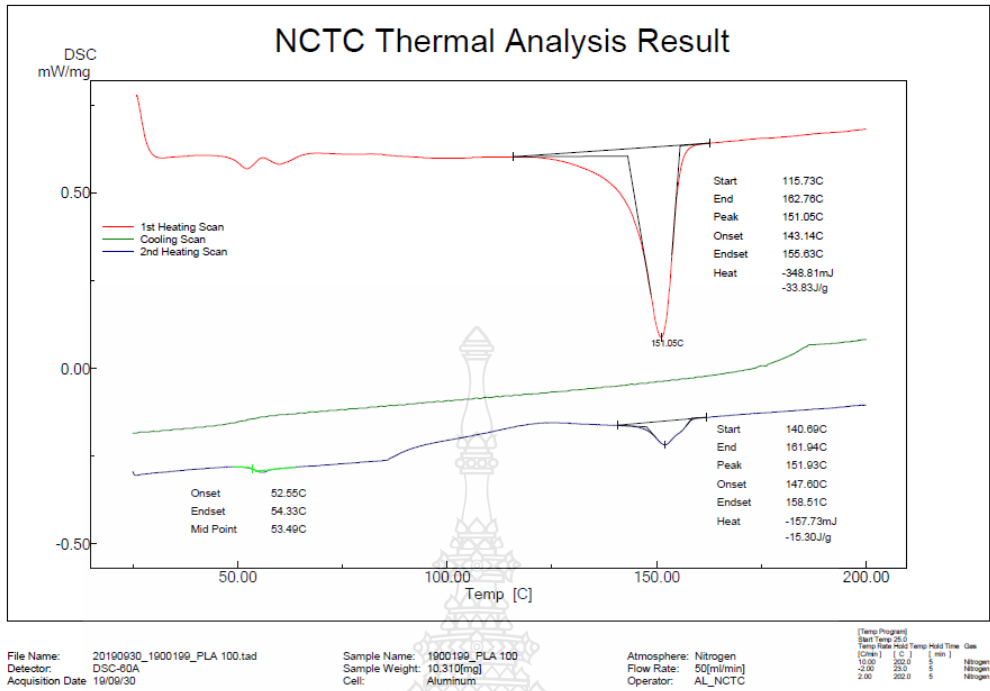


ภาพที่ 11-ก กราฟการทดสอบความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตที่เติมเบนโทไนต์ 5 phr

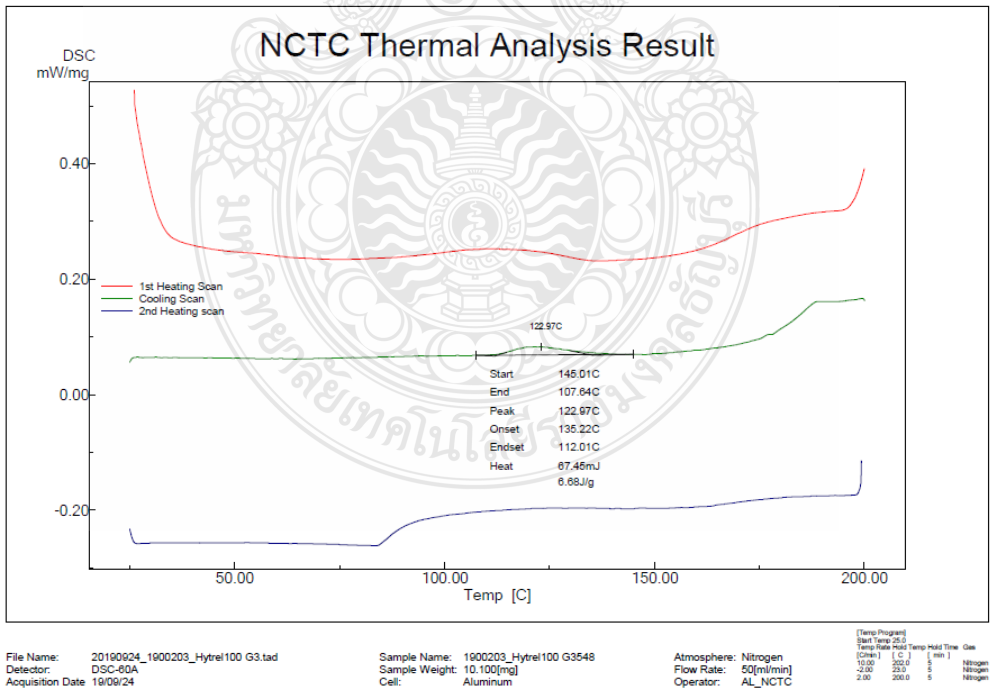


ภาคผนวก ข
DSC เทอร์โมแกรม
จากการทดสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

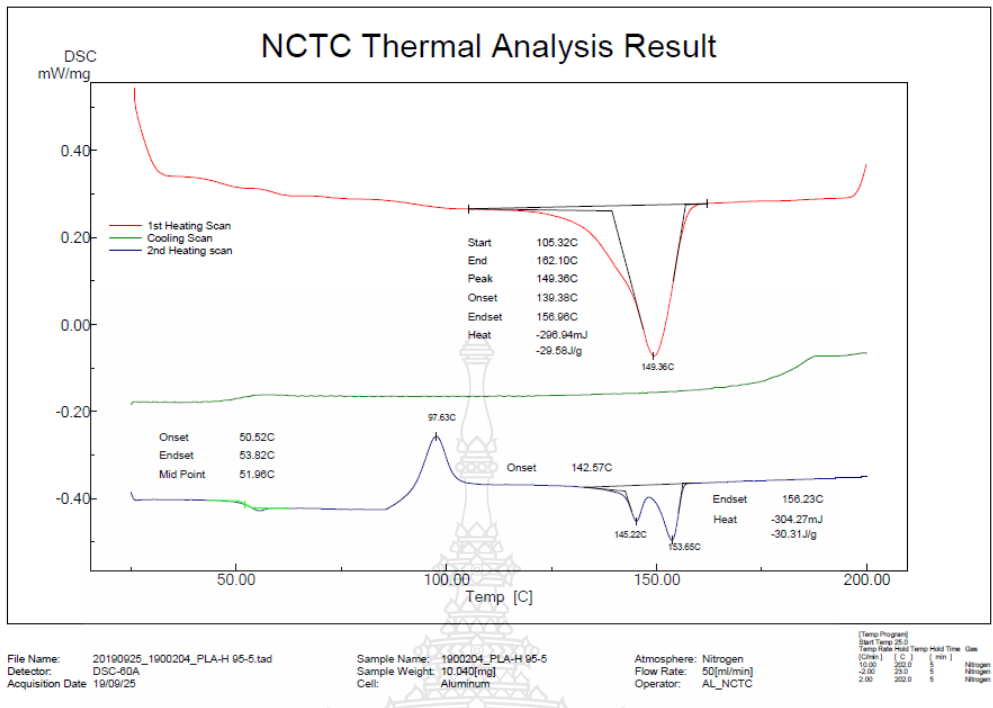




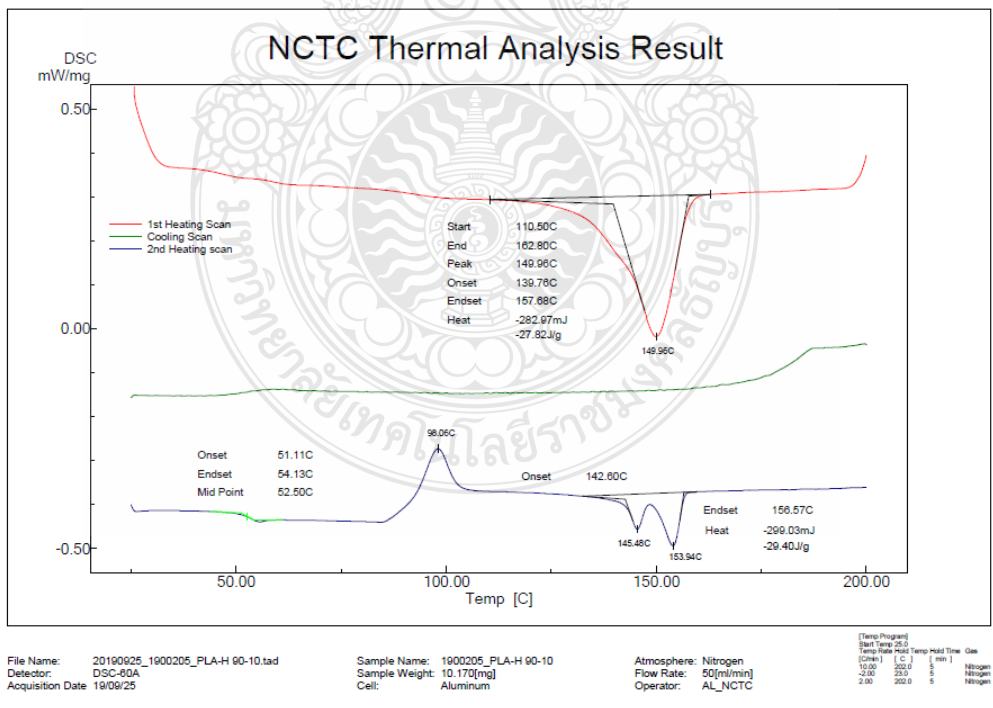
ภาพที่ 1-ข DSC เทอร์โมแกรมของพอลิแลกติกแอซิด



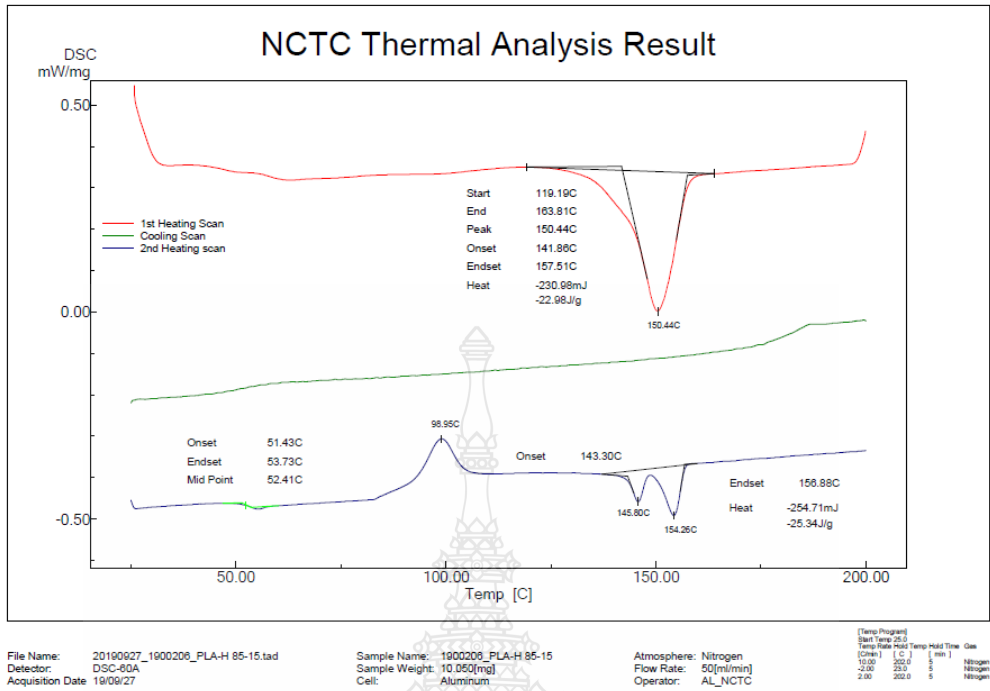
ภาพที่ 2-ข DSC เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกโพลีเอสเตอร์อีลาสโตเมอร์



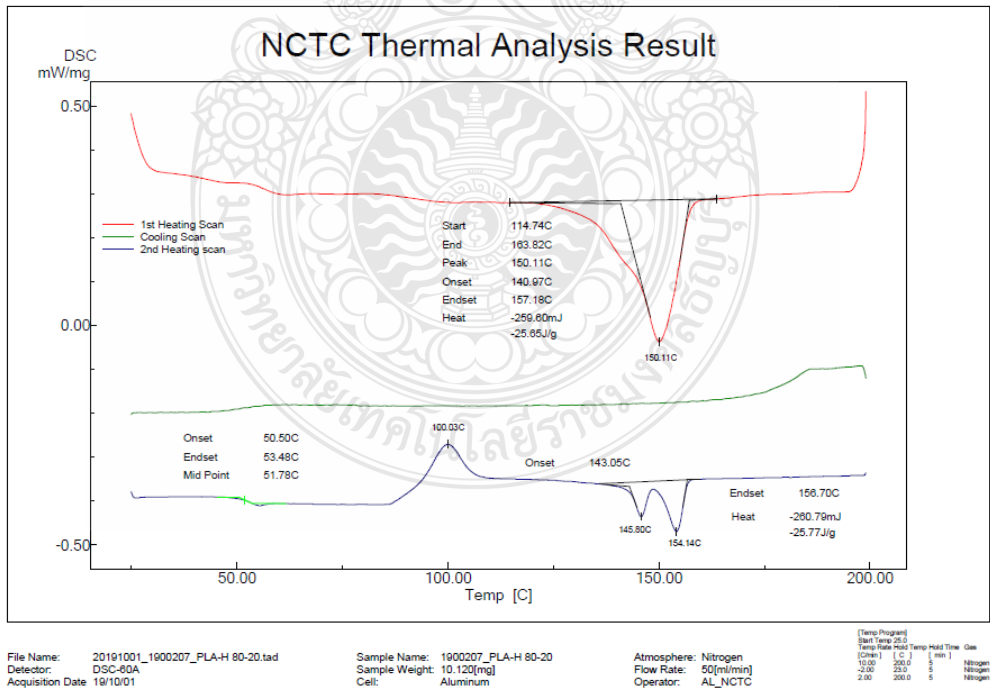
ภาพที่ 3-ข DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม PLA/Hytrel 95/5 (wt%/wt%)



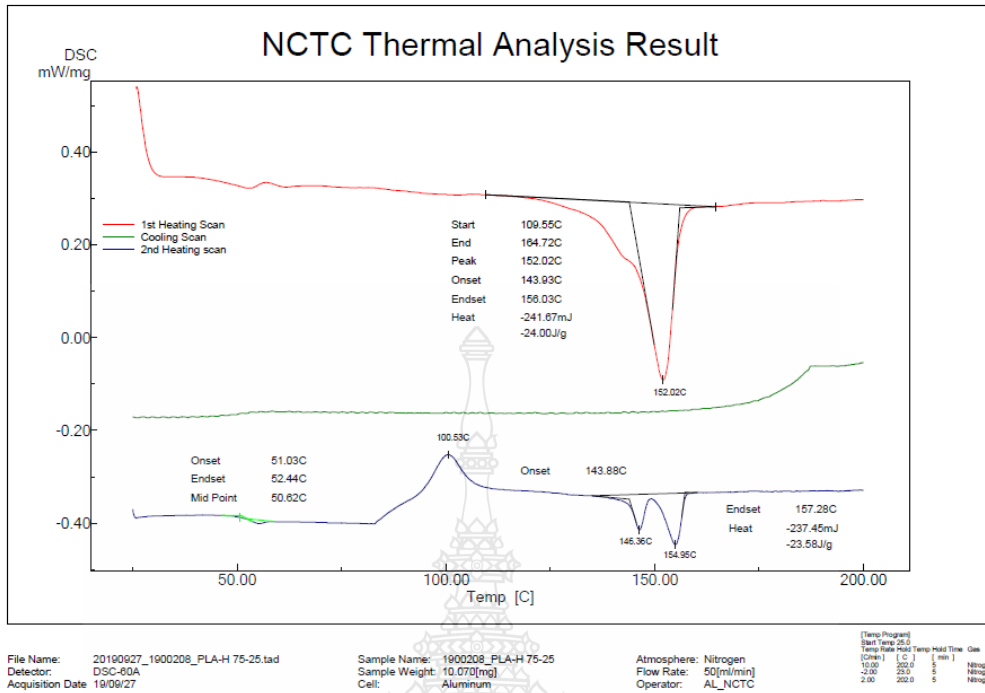
ภาพที่ 4-ข DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม PLA/Hytrel 90/10 (wt%/wt%)



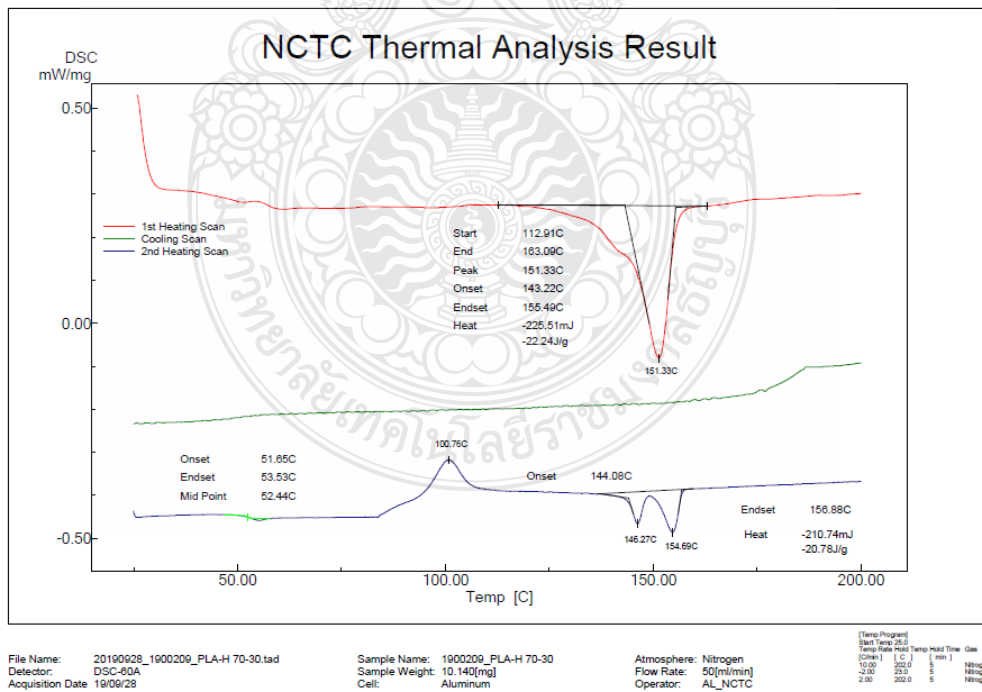
ภาพที่ 5-ข DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม PLA/Hytrel 85/15 (wt%/wt%)



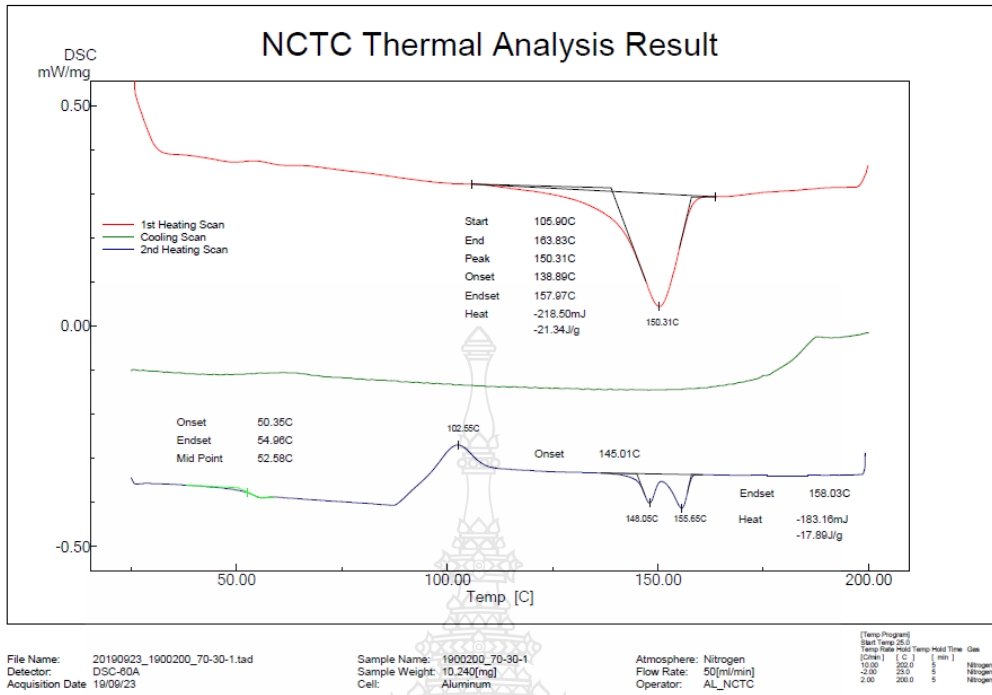
ภาพที่ 6-ข DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม PLA/Hytrel 80/20 (wt%/wt%)



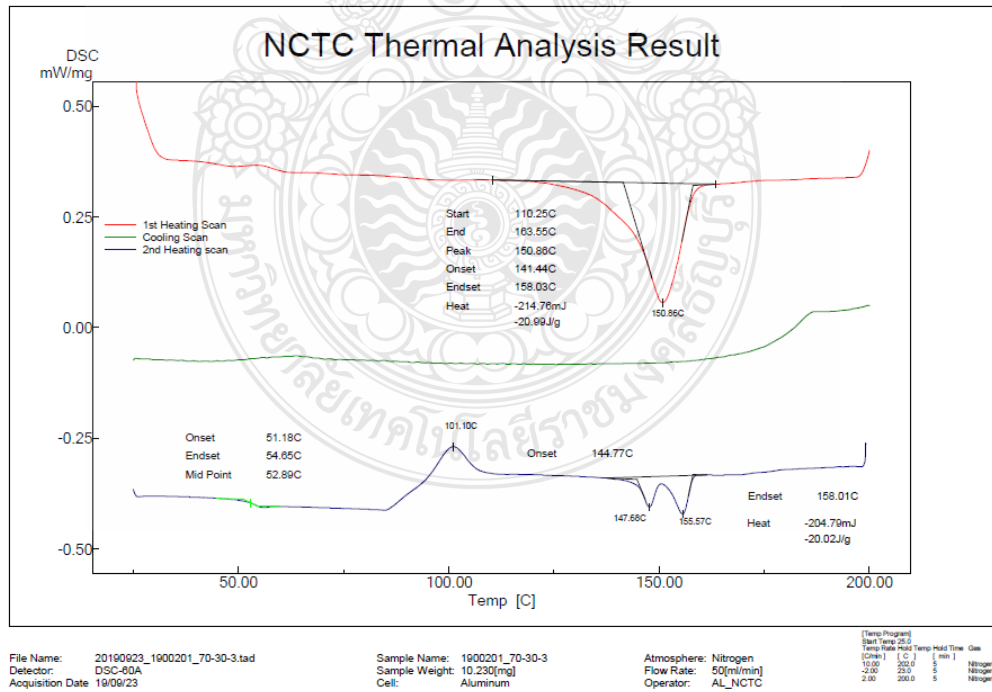
ภาพที่ 7-ข DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม PLA/Hytrel 75/25 (wt%/wt%)



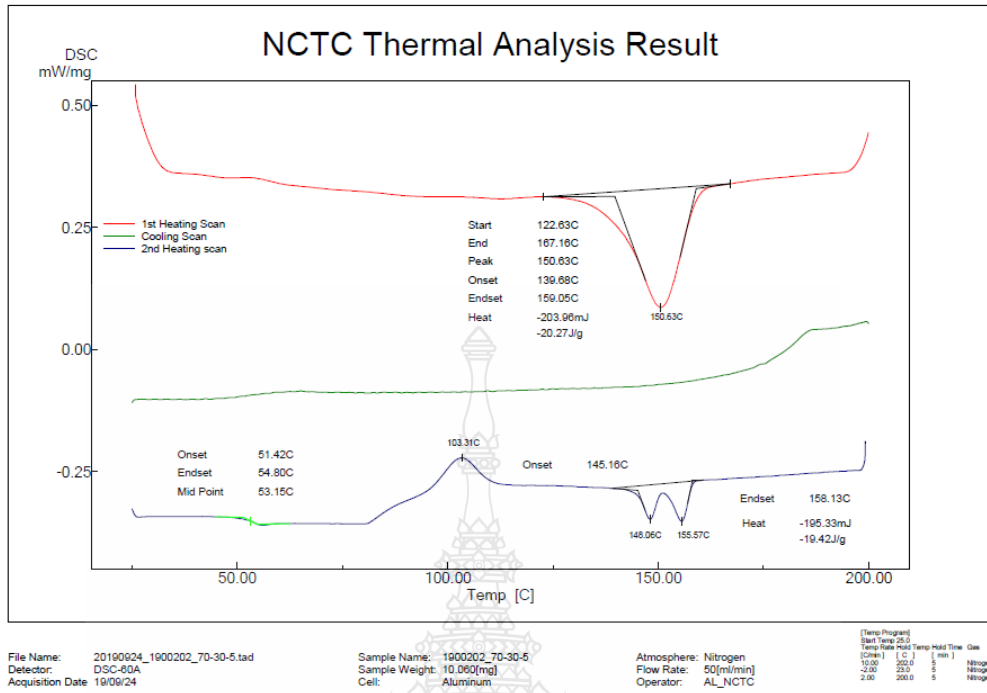
ภาพที่ 8-ข DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม PLA/Hytrel 70/30 (wt%/wt%)



ภาพที่ 9-ข DSC เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิตที่เติมเบนโทไนต์ 1 phr



ภาพที่ 10-ข DSC เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิตที่เติมเบนโทไนต์ 3 phr



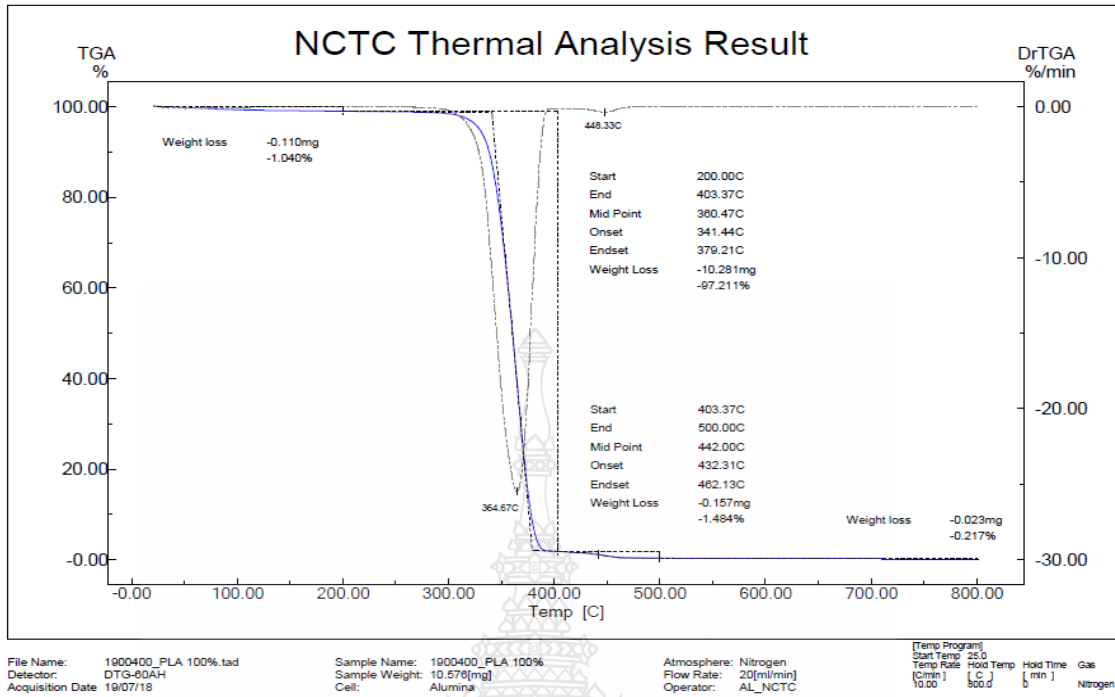
ภาพที่ 11-ข DSC เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิตที่เติมเบนโทไนต์ 5 phr



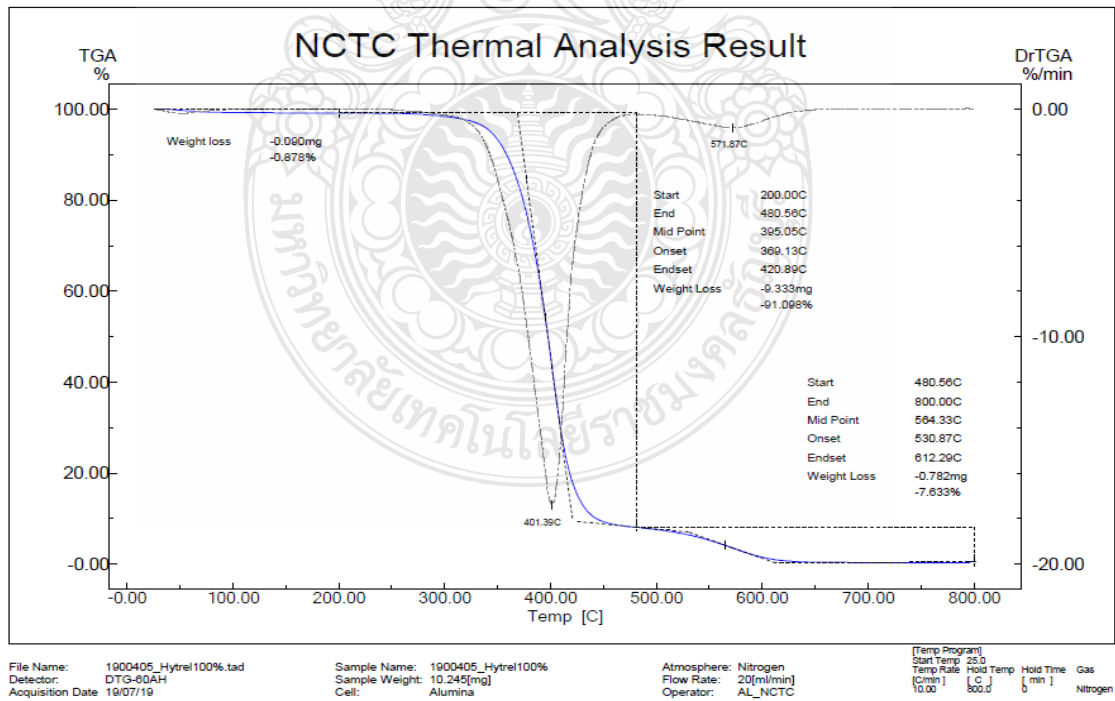
ภาคผนวก ค

TGA เทอร์โมแกรมจากการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน

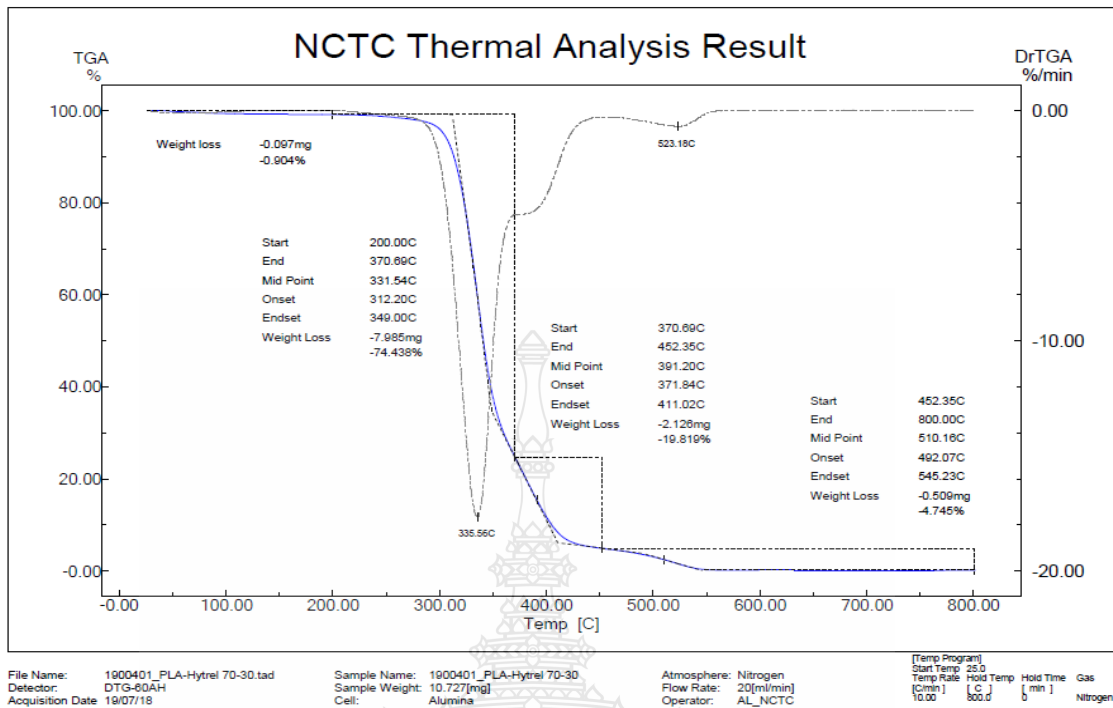




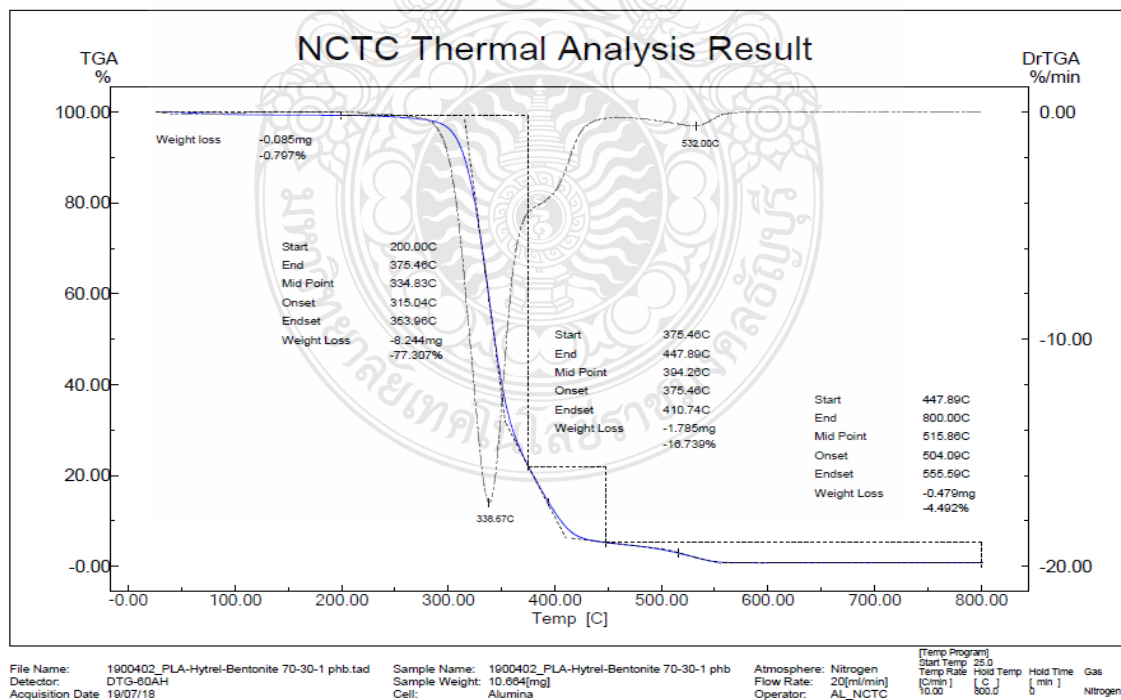
ภาพที่ 1-ค TGA เทอร์โมแกรมของพอลิแล็กติกแอซิด



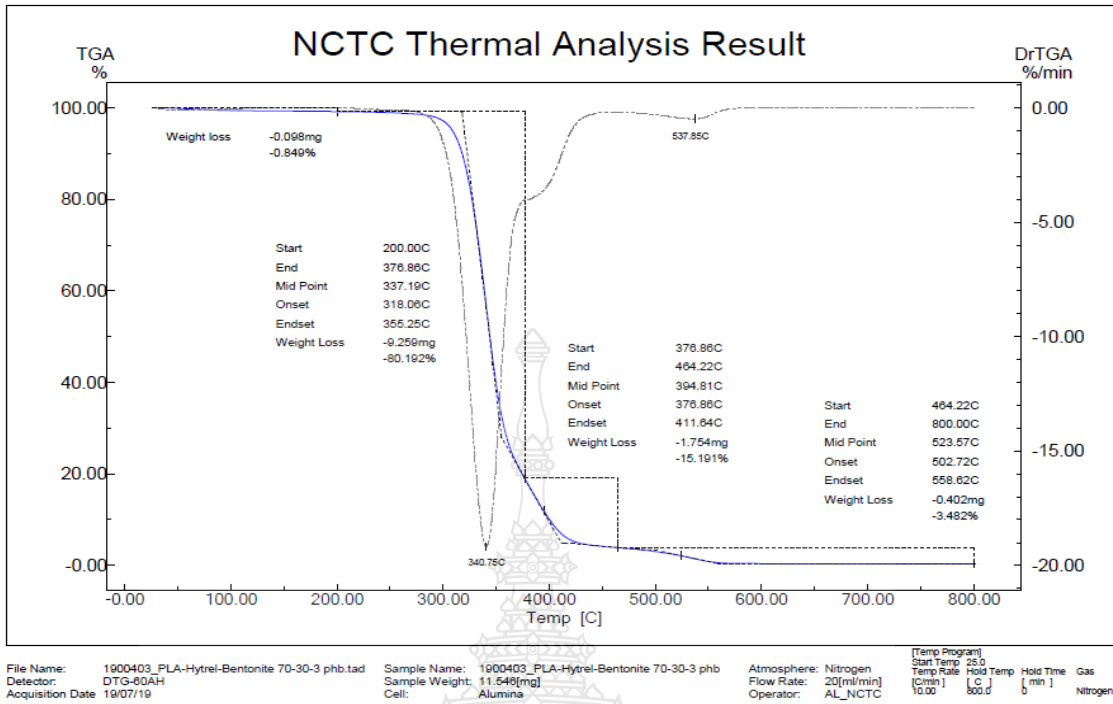
ภาพที่ 2-ค TGA เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกโพลีเอสเตอร์อีลาสโตเมอร์



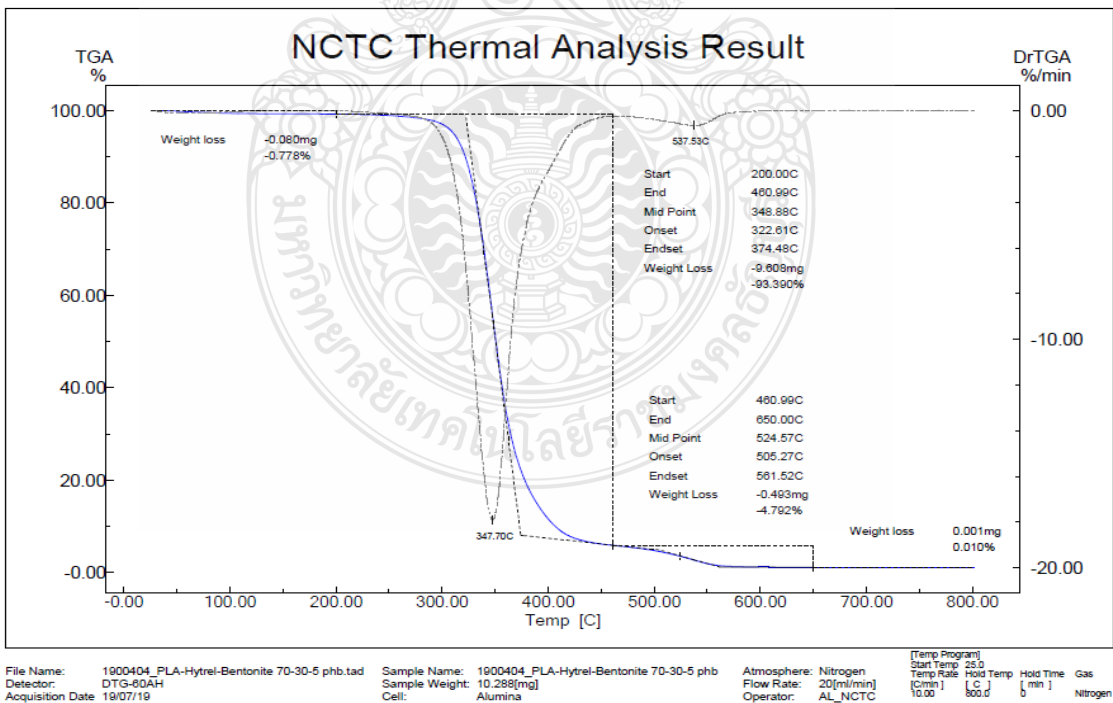
ภาพที่ 3-ค TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม PLA/Hytrel 70/30 (wt%/wt%)



ภาพที่ 4-ค TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิตที่เติมเบนโทไนต์ 1 phr



ภาพที่ 5-ค TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิตที่เติมเบนโทไนต์ 3 phr



ภาพที่ 6-ค TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิตที่เติมเบนโทไนต์ 5 phr

ภาคผนวก
การนำเสนอผลงานทางวิชาการ





เกษตรกำแพงแสน ตามรอยพ่อ สานต่อศาสตร์แห่งแผ่นดิน

Proceedings

การประชุมวิชาการระดับชาติ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 16

The 16th KU-KPS National Conference

ระหว่างวันที่ 3 - 4 ธันวาคม 2562

ณ อาคารศูนย์เรียนรวม

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

ผลงานทางวิชาการ 8 สาขา

1. พืชและเทคโนโลยีชีวภาพ
2. สัตว์และสัตวแพทย์
3. วิศวกรรมศาสตร์
4. ศึกษาศาสตร์และพัฒนศาสตร์
5. มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์
6. วิทยาศาสตร์สุขภาพและการกีฬา
7. วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม
และความหลากหลายทางชีวภาพ
8. ส่งเสริมการเกษตร



คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
วิทยาเขตกำแพงแสน
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์





การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เลขมาตรฐานสากลประจำหนังสืออิเล็กทรอนิกส์: 978-616-278-536-8

จัดทำโดย กองบริหารวิชาการและนิสิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เลขที่ 1 หมู่ 6 ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

พิมพ์ครั้งที่ 1 : ธันวาคม 2562



การศึกษาและลดผลกระทบของการปล่อยประจุไฟฟ้าสถิตในโรงงานผลิตผ้าใยสังเคราะห์	147
คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนและความดันลดของสารทำความเย็น R290	
ภายในท่อแบบที่มีพื้นที่หน้าตัดสลับไปมา	154
การออกแบบและการวิเคราะห์ของโครงกรอบโซฟาพับและข้อต่อปรับระดับ	163
การลดอุณหภูมิห้องโดยใช้แผ่น Peltier	171
การลดอุณหภูมิห้องโดยใช้ Clay pot – Air cooler	179
การศึกษาออกแบบการระบายอากาศเฉพาะที่บริเวณเครื่องเชื่อมอัตโนมัติ	
ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์	188
การศึกษาและการลดผลกระทบจากการคายประจุไฟฟ้าสถิตในโรงงานเทปกาวพันสายไฟ	
แบบพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ด้วยเครื่องปล่อยประจุไอออน	196
สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/ พอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์	204
การศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการกัดกร่อนของรอยเชื่อมทิกทอต่อชนระหว่าง	
ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมต่างชนิด AISI304 และ AISI316L	213
การสร้างผิวอลูมิเนียมบนผิวเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ด้วยการเชื่อมอาร์กทั้งสแตนเลสคลุม	224
อิทธิพลของตัวแปรการเชื่อมอาร์คโลหะแก่สคลุมต่อสมบัติของรอยต่อชน	
เหล็กกล้าไร้สนิม SUS304L และเหล็กกล้าคาร์บอน SS400 โดยใช้แผ่นรองหลัง	233
การสร้างแผ่นวัดแรงกดขนาดใหญ่เพื่อประยุกต์ใช้งานงานทางการแพทย์	243
CFD Simulation of Downdraft Gasification	251
การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ไอโซนปรับปรุงคุณภาพน้ำ	
ก่อนเข้ากระบวนการผลิตน้ำประปา	259
การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำจากการเปิดประตูระบายน้ำ	
จังหวัดสมุทรสงคราม โดยวิธีวิเคราะห์หิมิต	267
การศึกษาศักยภาพการผลิตไฟฟ้าพลังน้ำขนาดเล็ก	
อ่างเก็บน้ำคลองตาพลาย จังหวัดจันทบุรี	275
การพยากรณ์น้ำของจังหวัดอุทัยธานี ในพื้นที่ลุ่มน้ำสะแกกรัง	287
การศึกษาพื้นที่น้ำท่วมในลุ่มน้ำยมตอนล่าง	297
การประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT เพื่อประเมินปริมาณน้ำท่าของพื้นที่ลุ่มน้ำป่าสักตอนบน	309
การศึกษาผลกระทบของปรากฏการณ์เอลนีโญและลานีญา	
ที่มีผลต่อปริมาณน้ำฝนในลุ่มน้ำยม	321
ฟังก์ชันย่อยส่วนเชิงเวลาสำหรับการประเมินน้ำฝนระยะสั้นกว่าหนึ่งชั่วโมงด้วยเรดาร์	328

39. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐร่า นิธิกุลวรวงศ์
40. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นลินี อิมบุญตา
41. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทนา ช่วยชูวงศ์
42. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทราพร ภูมิรินทร์
43. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอชาติ บุญเอก
44. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิฑริช โมพี
45. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริภาวี เจริญวัฒนศักดิ์
46. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสม อาตมางกูร
47. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยรัตน์ พลายมาศ
48. สัตวแพทย์หญิง ดร.ดวงใจ สุวรรณเจริญ
49. นายสัตวแพทย์ ดร.นฤพล พร้อมขุนทด
50. นายสัตวแพทย์ ดร.วงศ์อนันต์ ณรงค์วัฒนาการ
51. นางสุกัญญา จัตตพรพงษ์
52. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุไร กุลบุญ.
53. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณวี เอี่ยมสมบุรณ์
54. รองศาสตราจารย์ ดร.ธนาทิพย์ แผลมคม
55. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ รอดคำ

ผู้ทรงคุณวุฒิ สาขาวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. รองศาสตราจารย์ ดร.อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล
2. รองศาสตราจารย์ ดร.ประเทือง อุษาบริสุทธิ์
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัชรพล ชัยประเสริฐ
4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันรัฐ อับดุลลากาซิม
5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พรรณ ปรี่องาม
6. รองศาสตราจารย์ ดร.บัญชา ขวัญยืน
7. รองศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ไผ่สิตสกุลชัย
8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศธร โสภากันธุ์
9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ดอนเจดีย์
10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิษณุวัฒน์ แต่สมบัติ
11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยาพงษ์ เทพประสิทธิ์
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระกานต์ ศิริวิฑูว์โมตรี
13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิธิรัชต์ สงวนเดือน
14. รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์
15. รองศาสตราจารย์ ดร.รังสิณี ไสธรวิทย์

16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รณฤทธิ ฤทธิรณ
17. รองศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ ชำของ
18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกัญญา วิชชุกิจ
19. รองศาสตราจารย์ ดร.เชาว์ อินทร์ประสิทธิ์
20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กอบศักดิ์ กาญจนางศ์กุล
21. ผู้ช่วยศาสตราจารย์อมรเดช พุทธิพิพัฒน์ขจร
22. รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย กิจวัตรวรเวทย์
23. ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศ์ภวัลย์ ภัทรประภานันท์
24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปนัดดา กสิกิจวิวัฒน์
25. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทวัฒน์ ชมหวาน
26. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมล อมรฟ้า
27. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริญา ทองชาติ
28. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นที อธิคุณากร
29. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาวีณี ลิ้มสวัสดิ์
30. ผู้ช่วยศาสตราจารย์บรรพต กุลสุวรรณ
31. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณะ จันทร์โชติ
32. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐดนัย ตันทวิวิพน์
33. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ
34. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา ปราบกฏมาก
35. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กัณฑ์กรณิ์ เขาทอง
36. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนา ชีพสมทรง
37. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนมน จันทนา
38. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญญา กสานติกุล
39. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรัชย์ สุภาสุทธากุล
40. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิติพงษ์ สติวเมธีกุล
41. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรฤทธิ พุทธิพิพัฒน์ขจร
42. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นุชนาฏ สัตยาภาวี
43. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉกาเกษ วัตุยา
44. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยมงคล ลิ้มเพียรชอบ
45. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชษฐา ชำนาญหล่อ
46. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประภาพรพรณ เกษราพงศ์
47. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรินทร์ กลั่นเงิน
48. อาจารย์ ดร.วงศ์ผกา วงศ์รัตน์
49. อาจารย์ ดร.คณิต มานะธวัช

50. อาจารย์ ดร.วราญา เนื่องมัจฉา

ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

1. รองศาสตราจารย์ ดร.วราวุธ วุฒิมณีชัย
2. รองศาสตราจารย์ ดร.สมยศ เชิญอักษร
3. รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ไหมเรียง
4. รองศาสตราจารย์ ดร.ปานมนัส ศิริสมบุญ
5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประกิต ทิมขำ
6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เทวรัตน์ ตรีอำนาจ
7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนาจ
8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิตต์ สายสุนทร
9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ รัตนเดช
10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นารัตระพี นาคะวันนะ
11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารียา ฤทธิมา
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณพิมพ์ พุทธิรักษา มะเปี่ยม
13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันติยศ เตียวต้อย
14. รองศาสตราจารย์ ดร.สุนัน ปานสาคร
15. รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรนนท์ เจริญสกุล
16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนาคล คงสมบุญ
17. รองศาสตราจารย์ ดร.ทวิช พูลเงิน
18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กวิสน์ ชัยมุล
19. รองศาสตราจารย์ ดร.ณพล อยู่บรรพต
20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรพันธุ์ เขียมมีปรีชา
21. รองศาสตราจารย์ ดร.ประสาน สถิตเรืองศักดิ์
22. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศนพ กำเนิดทอง
23. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงษ์ เวศพันธุ์
24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤปดี ศรีสังข์
25. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัชพล จุ่งเจริญ
26. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ รัตนมีชัยสกุล
27. รองศาสตราจารย์ ดร.นภดล อุทัยชาติ
28. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ชัยศรีเจริญ
29. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชามญช์ ศรีจำเริญวัฒนา
30. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชรินทร์ ทิพย์วรรณากร
31. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาลิต มณีศรี
32. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณศ พันธุ์สวัสดิ์
33. รองศาสตราจารย์ ดร. พูนพัฒน์ พูนน้อย

34. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันฐณพงษ์ คงแก้ว
35. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลกฤษณ์ โตชัยวัฒน์
36. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวโรจน์ ใจสิน
37. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชรินทร์ นมรักษ์
38. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนา ม่วงรัตน์
39. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัลยา กิตติเลิศไพศาล
40. ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิสัน ขารี

ผู้ทรงคุณวุฒิ สาขาศึกษาศาสตร์และพัฒนศาสตร์

ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

1. รองศาสตราจารย์ ดร.วินัย พูลศรี
2. รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ต้นพิชัย
3. รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สมิตร สุวรรณ
4. รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ ศรีสวนแดง
5. รองศาสตราจารย์ ดร.มยุรี ถนอมสุข
6. รองศาสตราจารย์ ดร.ธนรัตน์ เต๋อวัฒนา
7. รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ ใจอารีย์
8. รองศาสตราจารย์ ดร.พัทธนันท์ ทรราชภิรมย์โชค
9. รองศาสตราจารย์ ดร.ชานนท์ จันทร์ธา
10. รองศาสตราจารย์ ดร.สมบุญ ศิลปรุ่งธรรม
11. รองศาสตราจารย์ ดร.ต่อศักดิ์ แก้วจรัสวิไล
12. รองศาสตราจารย์ ดร.อัจฉรา ปุระคม
13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณิ์ เนียมหอม
14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิศธริน วรรณเกตุศิริ
15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทรัตน์ เครืออินทร์
16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พินดา วราสุนันท์
17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ศรีพรหม
18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แสงเดือน เจริญฉิม
19. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วสันต์ เดือนแจ้
20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ เกียรติเผ่า
21. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธาวินทร์ ก้านเหลือง
22. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำพร ขุนเนียม
23. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงชัย อักษรคิด
24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิศวรา เลิศอมรพงษ์
25. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทัศน์ ผักเจริญผล

สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์

Mechanical and Thermal Properties of Polylactic acid/Polyester Elastomer Blends

นฤดี พุดพิัก¹ อำนวย ลากเกษมสุข¹ พศวรรณ์ ชัยวุฒินันท์² และเสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตรี³

Naruedee Phutfak¹, Amnoui Larpkasemsuk¹, Phasawat Chaiwutthinan² and Saowaroj Chuayjuljit³

บทคัดย่อ

พอลิแลกติกแอซิดถูกปรับปรุงความเหนียวโดยการผสมแบบหลอมเหลวกับพอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์หรือไฮเทรล ในปริมาณร้อยละ 5 ถึง 30 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ และขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการฉีด ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงให้เห็นว่าความทนแรงกระแทก และการยืดตัว ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตามปริมาณไฮเทรลที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับของพอลิแลกติกแอซิดล้วน แต่ความทนแรงดึงและยังไม่ดูลดลงเมื่อใส่ไฮเทรลในปริมาณมาก และจากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นทดสอบ พบว่า ไฮเทรลกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ของพอลิแลกติกแอซิด ซึ่งมีส่วนทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเหนียวเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการใส่ไฮเทรลในพอลิแลกติกแอซิดมีผลทำให้อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณไฮเทรลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พบว่า ไฮเทรลทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก โดยทำให้ระดับความเป็นผลึกของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: พอลิแลกติกแอซิด, พอลิเอสเทอร์อีลาสโตเมอร์, สมบัติเชิงกล, สัณฐานวิทยา, สมบัติทางความร้อน

Abstract

The toughness of polylactic acid (PLA) was improved by melt blending with thermoplastic polyester elastomer or Hytel[®] at 5-30 wt% via melt blending on a twin screw extruder, followed by injection molding process. The mechanical properties results showed that the impact strength and elongation at break of all the blends were markedly increased with increasing Hytel[®] contents compared to the neat PLA, while the tensile strength and young's modulus were decreased at high loading levels of Hytel[®]. Morphology of the blends revealed a well dispersed Hytel[®] in PLA matrix, leading to an improvement in the toughness of the blends. However, addition of Hytel[®] caused a reduction in the vicat softening point of the blends with increasing Hytel[®] contents. Moreover, Hytel[®] acted as a nucleating agent by significantly increasing the degree of crystallinity of PLA in the blends.

Keyword: Polylactic acid, Polyester elastomer, Mechanical properties, Morphology, Thermal properties

E-mail address: Naruedee_p@mail.rmutt.ac.th

¹ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12120

²ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย จ.ปทุมธานี 12120

³ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

คำนำ

พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid, PLA) เป็นอะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์แบบเชิงเส้น (linear aliphatic polyester) ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable) เมื่อถูกทิ้งอยู่ในกองขยะ โดยสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบทางการเกษตรที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ มันสำปะหลัง ข้าวสาลี และข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สามารถเกิดทดแทนใหม่ได้ในเวลาอันสั้น (Mamun *et al.*, 2013) จึงทำให้พอลิแลคติกแอซิดมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นวัสดุทางเลือกใหม่เพื่อใช้ทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม (Chieng *et al.*, 2014) ที่ส่วนใหญ่ไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ ดังนั้น จึงส่งผลให้มีปริมาณขยะพลาสติกเหล่านี้สะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก จนเกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงดังเช่นทุกวันนี้ โดยประเทศไทยมีศักยภาพและความพร้อมเป็นอย่างมากในการผลิตพอลิแลคติกแอซิดเนื่องจากมีวัตถุดิบเป็นจำนวนมากและราคาถูก นอกจากนี้ พอลิแลคติกแอซิดมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ มีความแข็งแรงสูง มีความใส ทนทานต่อน้ำมันและไขมัน และเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต เป็นต้น (Fortunati *et al.*, 2014) แต่มีข้อจำกัดในการใช้งานเนื่องจากเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีความเปราะ (Girdthep *et al.*, 2015, He *et al.*, 2019) ซึ่งได้มีการศึกษาเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ การใส่พลาสติกไฮเซอร (Chieng *et al.*, 2014) หรือผสมกับพอลิเมอร์อื่นๆ ที่มีความเหนียวมากกว่า และ/หรือสารเสริมแรง เช่น พอลิ-บิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต (polybutylene adipate-co-terephthalate) ร่วมกับผงไม้ (wood flour) และ โวลลาสโตไนต์ (wollastonite) (Chaiwutthinan *et al.*, 2019) ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (ethylene-propylene diene rubber) (Wang *et al.*, 2016) ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ (epoxidized natural rubber) (Bijarimi *et al.*, 2014) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate) (Chuayjuljit *et al.*, 2017) เป็นต้น จากการศึกษาดังกล่าว พบว่า ความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดได้รับการปรับปรุงอย่างเห็นได้ชัด ขึ้นกับชนิดและปริมาณของสารที่ใส่เข้าไป ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกโค-พอลิเอสเตอร์อีลาสโตเมอร์ (thermoplastic copolyester elastomer) ที่มีชื่อทางการค้าว่า 'ไฮเทรล' (Hytrell®) ของบริษัทดูปองต์ (DuPont Company) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงคล้ายยาง มีความทนทานสารเคมีสูง และสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการที่ใช้กับเทอร์โมพลาสติกทั่วไป (Aso *et al.*, 2016) ดังนั้น จึงคาดว่าพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้จะมีสมรรถนะในการใช้งานสูงขึ้น โดยไม่ทำให้ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้เสียไป อีกทั้งยังมีส่วนช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

ก่อนเตรียมพอลิเมอร์ผสมได้นำเม็ดพอลิแลคติกแอซิดและไฮเทรลมาอบไล่ความชื้นแยกกันที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการผสมพอลิแลคติกแอซิดและไฮเทรลด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ กัน (100/0, 95/5, 90/10, 85/15, 80/20, 75/25, 70/30 และ 0/100 พอลิแลคติก-แอซิด/ไฮเทรล) ในเครื่องผสมแบบหมุนเหวี่ยงก่อนนำไปหลอมผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (twin screw -

extruder) ในช่วงอุณหภูมิ 180 ถึง 210 องศาเซลเซียส แล้วนำพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการตัดเม็ดแล้วไปอบไล่ความชื้นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีด (injection machine) โดยใช้อุณหภูมิการฉีดอยู่ในช่วง 190 ถึง 230 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบสกรู 70 รอบ/นาที และแรงดันฉีด 700 บาร์

การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดที่มีรอยบาก (notched izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256 ด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact tester; ceast รุ่น resil impactor) โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด $63.5 \times 12.7 \times 3$ มิลลิเมตร (ยาว \times กว้าง \times หนา) ที่มีรอยบากตรงกลางชิ้นทดสอบทำมุม 45 องศา ความลึกกรวยบาก 2.54 มิลลิเมตร ทดสอบด้วยค้อนขนาด 1 จูล

ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง (tensile properties) ตามมาตรฐาน ASTM D638 (type I) ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine; hounsfield รุ่น H 50 KS) โดยขึ้นทดสอบรูปดัมเบลล์มีระยะดึง (gauge length) 50 มิลลิเมตร อัตราการดึงยึดคงที่ 10 มิลลิเมตร/นาที และโหลดเซลล์ (load cell) 25 kN ผลการทดสอบได้ค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ยังส์มอดุลัส (young's modulus) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break)

การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ตรวจสอบสัณฐานวิทยา (morphology) บริเวณผิวรอยแตกของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM; Hitachi รุ่น SU5000) โดยนำชิ้นทดสอบหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ไปเคลือบด้วยทองในระบบสุญญากาศ จากนั้นตรวจสอบโดยใช้ศักย์ไฟฟ้า 5 กิโลโวลต์ ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ทดสอบหาอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต (vicat softening temperature, VST) ตามมาตรฐาน ASTM D1525 (type A) ด้วยเครื่องทดสอบอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต (ceast รุ่น HDT vicat 6911) โดยเตรียมชิ้นทดสอบขนาด $12 \times 12 \times 3$ มิลลิเมตร (ยาว \times กว้าง \times หนา) ใช้น้ำมันซิลิโคนเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน อัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 50.0 ± 0.2 องศาเซลเซียส/ชั่วโมง น้ำหนักกดทดสอบ 1000 กรัม อุณหภูมิระหว่าง 25 ถึง 200 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบได้ค่าอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต โดยดูจากอุณหภูมิที่ทำให้หัวกดทดสอบกดลงบนผิวชิ้นงานลึกลงไปเป็นระยะ 1 มิลลิเมตร

ทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) (Shimadzu รุ่น DSC-60 plus series) โดยนำชิ้นทดสอบประมาณ 5 มิลลิกรัม วางบนจานอะลูมิเนียมแล้วปิดฝา ทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 250 องศาเซลเซียส โดยเริ่มให้ความร้อนด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส/นาที จนถึงอุณหภูมิ 250 องศา

เซลเซียส และให้คงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 5 นาที เพื่อลบประวัติทางความร้อนของชิ้นทดสอบ แล้วลดอุณหภูมิลงมาที่ 25 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิที่เท่ากัน และคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิก่อนถึงอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่เท่ากัน ผลการทดสอบแสดงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m), อุณหภูมิการเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำ (cold crystallization temperature, T_{cc}), อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c), เอนทัลปีของการหลอมเหลว (melting enthalpy, ΔH_m), เอนทัลปีของการเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำ (enthalpy of cold crystallization, ΔH_{cc}), เอนทัลปีของการเกิดผลึก (enthalpy of crystallization, ΔH_c) และคำนวณระดับความเป็นผลึก (X_c) ได้จากสมการต่อไปนี้

$$X_c (\%) = 100 \times [(\Delta H_m - \Delta H_{cc}) / \Delta H_m^0 w]$$

โดย w คือ สัดส่วนโดยน้ำหนัก (weight fraction) ของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสม และ ΔH_m^0 คือ เอนทัลปีของการหลอมเหลวของพอลิแลกติกแอซิดที่เกิดผลึก 100% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 93 จูล/กรัม (Arrieta *et al.*, 2014)

ผลการทดลองและวิจารณ์

สมบัติเชิงกล

จาก Table 1 และ Figure 1(a) พบว่า พอลิแลกติกแอซิดล้วนมีความทนแรงกระแทก 2811.3 J/m^2 และเมื่อใส่ไฮเทรลในพอลิแลกติกแอซิดมีผลทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ($3226.6-8905.0 \text{ J/m}^2$) เนื่องจากไฮเทรลมีสมบัติเป็นอีลาสโตเมอร์ที่มีความทนแรงกระแทกสูง (ตีไม่แตก) และเมื่อกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของพอลิแลกติกแอซิดได้ทำหน้าที่เป็นสารดัดแปรความทนแรงกระแทก (impact modifier) หรือสารเพิ่มความเหนียว (toughening agent) ให้กับพอลิเมอร์ผสม ซึ่งแสดงว่าพอลิแลกติกแอซิดและไฮเทรลมีความเข้ากันได้ดี โดยไฮเทรลสามารถดูดซับพลังงานการกระแทกไว้ได้มากกว่าก่อนแตกหัก ดังนั้น การใส่ไฮเทรลที่มีความยืดหยุ่นสูงในพอลิแลกติกแอซิดที่มีความทนแรงกระแทกต่ำจึงมีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมได้รับการปรับปรุงอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วน (4.9-47.8%) มีค่ามากกว่าของพอลิแลกติกแอซิดล้วน (4.5%) และมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของไฮเทรลที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากไฮเทรลล้วนมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดสูงมาก (627.3%) ดังแสดงใน Table 1 และ Figure 1(b) อย่างไรก็ตาม จาก Table 1 และ Figure 1(c) และ Figure 1(d) แสดงให้เห็นว่า การใส่ไฮเทรลปริมาณมากในพอลิแลกติกแอซิดไม่มีผลในการปรับปรุงทั้งยังโมดูลัสและความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากไฮเทรลล้วนมียังโมดูลัส (6 MPa) และความทนแรงดึง (7.9 MPa) ต่ำกว่าของพอลิแลกติกแอซิดล้วนมาก (2106.4 MPa และ 62 MPa ตามลำดับ)

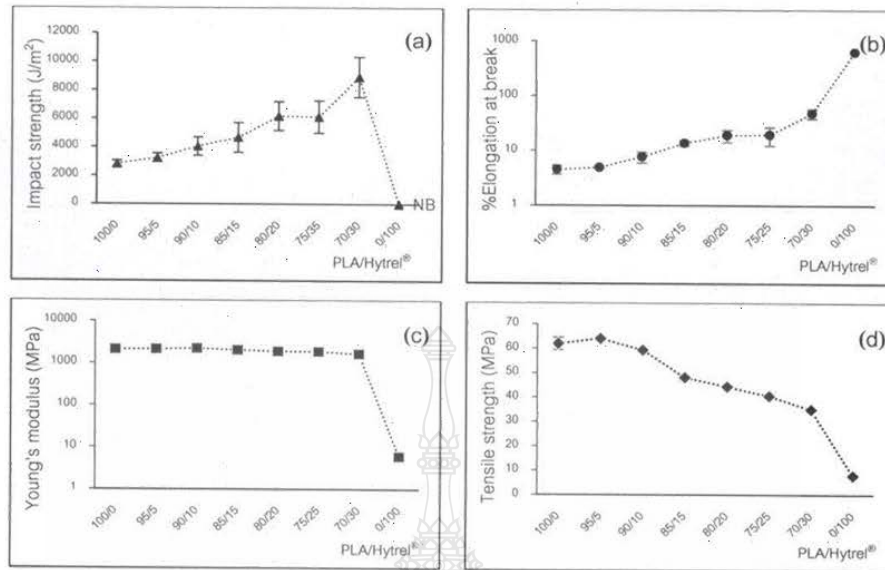


Figure 1 Mechanical properties of PLA, Hytrel[®] and PLA/Hytrel[®] blends in terms of (a) impact strength, (b) elongation at break, (c) young's modulus and (d) tensile strength

Table 1 Mechanical properties of PLA, Hytrel[®] and PLA/Hytrel[®] blends

PLA/Hytrel [®] (wt%/wt%)	Impact strength (J/m ²)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)
100/0	2811.3 ± 222.4	4.5 ± 0.8	2106.4 ± 55.6	62.0 ± 2.6
95/5	3226.6 ± 319.3	4.9 ± 0.1	2133.0 ± 65.8	64.1 ± 0.7
90/10	4036.0 ± 638.6	7.7 ± 1.7	2228.6 ± 100.8	59.3 ± 0.8
85/15	4660.0 ± 1043.4	13.7 ± 1.6	2060.0 ± 32.0	48.2 ± 1.0
80/20	6169.4 ± 1012.3	18.9 ± 4.8	1915.8 ± 116.4	44.5 ± 0.6
75/25	6107.0 ± 1137.5	19.4 ± 7.2	1871.6 ± 28.7	40.6 ± 0.4
70/30	8905.0 ± 1406.0	47.8 ± 9.3	1671.4 ± 52.1	35.0 ± 0.4
0/100	No break	627.3 ± 5.5	6.0 ± 0.03	8.0 ± 0.0

สัณฐานวิทยา

Figure 2 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณผิวรอยแตกของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทก จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายใต้กำลังขยาย 5,000 เท่า จาก Figure 2(a) พบว่า พอลิแลกติกแอซิดล้วนมีพื้นผิวรอยแตกหักที่ค่อนข้างเรียบ ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุที่มีความแข็งเปราะ ในขณะที่ไม่ได้ทำการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของไฮเทรลล้วน เนื่องจากไฮเทรลเป็นวัสดุที่มีความ

เหนียวและไม่แตกหักภายใต้การทดสอบความทนแรงกระแทก อย่างไรก็ตามเมื่อเติมไฮเทรลในพอลิแลกติกแอซิดพบว่า พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสม (Figure 2 (b)-(g)) มีลักษณะคล้ายคลื่นและมีความหยาบมากขึ้น นอกจากนี้ ยังพบหลุมลักษณะเป็นทรงกลมเล็กๆ ที่เกิดจากอนุภาคของไฮเทรลถูกดึงให้หลุดจากเมทริกซ์ของพอลิแลกติกแอซิด ซึ่งแสดงว่าไฮเทรลมีการกระจายที่ดีในพอลิแลกติกแอซิด เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองประกอบด้วยหมู่เอสเทอร์ที่เหมือนกันภายในโครงสร้าง จึงทำให้มีความเข้ากันได้ดี นอกจากนี้ พบว่า อนุภาคของไฮเทรลมีขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณของไฮเทรลที่เพิ่มขึ้น โดยอนุภาคของไฮเทรลทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความทนแรงกระแทกให้กับพอลิแลกติกแอซิด ซึ่งสอดคล้องกับผลความทนแรงกระแทกของชิ้นทดสอบที่ได้กล่าวมาแล้ว

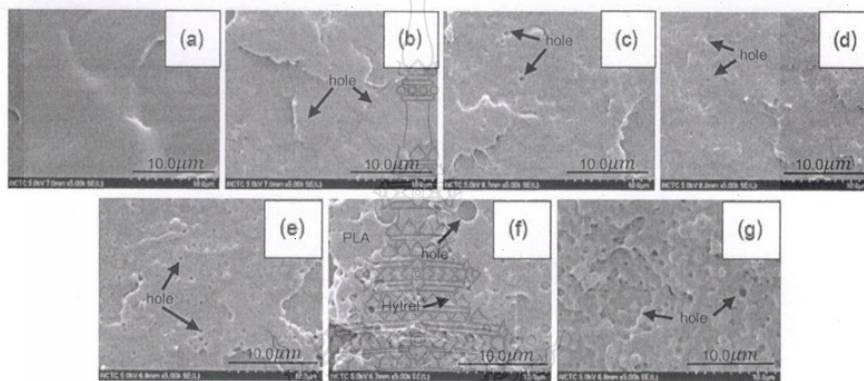


Figure 2 Representative SEM micrographs ($\times 5,000$) of (a) neat PLA and (b)-(g) PLA/Hytrel[®] blends at 90/10, 95/5, 85/15, 80/20, 75/25 and 70/30 (wt%/wt%), respectively

สมบัติทางความร้อน

จาก Figure 3 พบว่า อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต (VST) ของพอลิแลกติกแอซิดล้วน (136.3 องศาเซลเซียส) มีค่าสูงกว่าของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วน (116.4-133.9 องศาเซลเซียส) เนื่องจากไฮเทรลล้วนมีอุณหภูมิอ่อนตัวไวแคต (59.6 องศาเซลเซียส) ต่ำกว่าของพอลิแลกติกแอซิดมาก ดังนั้น การเติมไฮเทรลส่งผลให้อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของไฮเทรลที่เพิ่มขึ้น

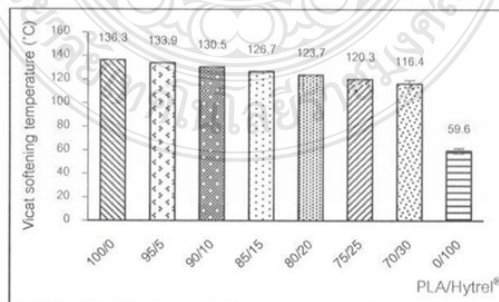


Figure 3 Vicat softening temperature of neat PLA, neat Hytrel[®] and PLA/Hytrel[®] blends

Table 2 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิดล้วน และพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมของขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (second heating scan) (Figure 4) พบว่า พอลิแลกติกแอซิดล้วนแสดงทั้ง T_g และ T_m ที่ 50.4 และ 144.0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าพอลิแลกติกแอซิดล้วนเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semi-crystalline polymer) นอกจากนี้ ยังพบ T_{cc} เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g แต่ต่ำกว่า T_m เนื่องจากระหว่างขั้นตอนการเย็นตัว (cooling scan) พอลิแลกติกแอซิดล้วนไม่สามารถเกิดผลึกได้ทันเวลา เพราะพอลิแลกติกแอซิดมีอัตราการเกิดผลึกช้ามาก แต่เมื่อให้ความร้อนอีกครั้งในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 มีผลทำให้สายโซ่พอลิแลกติกแอซิดในเฟสที่เป็นอสัณฐานได้รับพลังงานมากพอที่จะเคลื่อนที่มาจัดเรียงตัวเป็นระเบียบในรูปแบบที่เป็นสเฟียรูไลต์ (spherulite) ขนาดเล็กที่ตำแหน่ง T_{cc} (102.6 องศาเซลเซียส) ซึ่งสามารถคำนวณหา χ_c ของพอลิแลกติกแอซิดล้วนได้เท่ากับ 11.7% นอกจากนี้ พบว่า พอลิแลกติกแอซิด ในพอลิเมอร์ผสม มีค่า T_g ลดลงตามปริมาณของไฮเทรลที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 41.0-49.2 องศาเซลเซียส เนื่องจากไฮเทรลเป็นเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ที่มี T_g ต่ำกว่าพอลิแลกติกแอซิดมาก จึงมีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิแลกติกแอซิดเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น และยังส่งผลให้พอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมมี T_{cc} เพิ่มขึ้น 2-5 องศาเซลเซียส เมื่อใส่ไฮเทรล 5-10% โดยน้ำหนัก เนื่องจากใส่ปริมาณน้อยเกินไปที่จะทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) และขัดขวางการจัดเรียงตัวของพอลิแลกติกแอซิด อย่างไรก็ตาม เมื่อใส่ไฮเทรลเพิ่มมากขึ้น (15-30% โดยน้ำหนัก) มีผลทำให้ T_{cc} ของพอลิแลกติกแอซิดมีค่าต่ำลง ซึ่งแสดงว่าไฮเทรลช่วยให้พอลิแลกติกแอซิดเกิดผลึกได้เร็วขึ้นและทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกให้กับพอลิแลกติกแอซิด นอกจากนี้พบว่า พอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมี T_m เกิดขึ้น 2 ตำแหน่ง ดังแสดงใน Table 2 และ Figure 4 ซึ่งเป็นผลจากปรากฏการณ์การหลอมเหลวและการเกิดผลึกใหม่ (recrystallization) ระหว่างการให้ความร้อนครั้งที่ 2 โดย T_{m1} ที่อุณหภูมิต่ำเกิดจากการหลอมเหลวของผลึกที่มีความสมบูรณ์น้อย ขณะที่ T_{m2} ที่อุณหภูมิสูงเกิดจากการหลอมเหลวของผลึกที่ได้เข้ามารวมตัวกันใหม่ (reorganized crystals) จนมีโครงสร้างสมบูรณ์มากกว่า โดย T_{m1} มีค่า 136.5-141.2 องศาเซลเซียส และ T_{m2} มีค่า 142.1-148.0 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ พบว่า ค่า χ_c ของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (65.5-71.0%) เนื่องจากไฮเทรลทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกให้กับพอลิแลกติกแอซิด

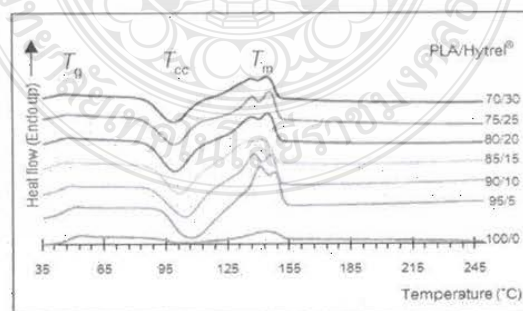


Figure 4 Representative DSC thermograms of neat PLA and PLA/Hytrel® blends obtained from the second heating scan

Table 2 Thermal DSC characteristics of neat PLA and PLA/Hytrel® blends obtained from second heating scan

PLA/Hytrel® (wt%/wt%)	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	X_c (%)
100/0	50.4	102.6	144.0	-	11.7
95/5	49.2	107.6	141.2	148.0	66.5
90/10	45.8	104.5	138.0	146.1	71.0
85/15	46.0	101.5	135.6	142.1	66.7
80/20	39.0	99.6	137.2	144.5	67.0
75/25	45.8	99.3	137.0	145.8	65.5
70/30	41.0	99.2	136.5	144.4	68.9

สรุป

พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและไฮเทรล® ได้ถูกเตรียมขึ้นและตรวจสอบสมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อน การผสมไฮเทรลปริมาณ 5-30% โดยน้ำหนัก พบว่า มีผลทำให้สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงกระแทกและการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น เมื่อเติมปริมาณของไฮเทรลเพิ่มขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบกับของพอลิแลคติกแอซิดล้วน ขณะที่สมบัติความทนแรงดึงและยังโมดูลัสของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมไฮเทรลในปริมาณมาก และจากการตรวจสอบสันฐานวิทยาพบว่าพอลิเมอร์ทั้งสองมีความเข้ากันได้ดี โดยอนุภาคทรงกลมของไฮเทรลกระจายตัวสม่ำเสมออยู่ในเมทริกซ์ของพอลิแลคติกแอซิดและช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีความเหนียวเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การใส่ไฮเทรลในพอลิแลคติกแอซิดมีผลทำให้อุณหภูมิอ่อนตัวไวแคตของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง แต่ยังเป็นค่าที่พอยอมรับได้เมื่อใส่ในปริมาณที่ไม่สูงมากนัก นอกจากนี้ การใส่ไฮเทรลมีผลทำให้ระดับความเป็นผลึกของพอลิแลคติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าเพิ่มมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Abdullah, A.Mamun., Andrzej, K.Bledzki. 2013. Micro fibre reinforced PLA and PP composites : Enzyme modification, mechanical and thermal properties. *Composites Science and Technology* 78: 10-17.
- Chieng, B.W., N.A. Ibrahim, W.Z.W. Yunus, M.Z. Hussein, Y.Y. Then and Y.Y. Loo. 2014. Effects of graphene nanoplatelets and reduced graphene oxide on poly(lactic acid) and plasticized poly(lactic acid): A Comparative Study. *Polymers* 6: 2232-2246.
- Arrieta, M.P., M.D. Samper, J. López and A. Jiménez. 2014. Combined effect of poly(hydroxybutyrate) and plasticizers on polylactic acid properties for film intended for food packaging. *Journal of Polymers and the Environment*. 22: 460-470.

- Girdhep, S., N. Komrapit, R. Molloy, S. Lumyong, W. Punyodom, P. Worajittiphon. 2015. Effect of plate-like particles on properties of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend: A comparative study between modified montmorillonite and graphene nanoplatelets. *Composites Science and Technology* 119: 115-123.
- He, Y., Z. Yang and J. Qu. 2019. Super-toughened poly(lactic acid)/thermoplastic poly(ether)urethane nanofiber composites with in-situ formation of aligned nanofibers prepared by an innovative eccentric rotor extruder. *Composites Science and Technology* 169: 135-141.
- Chaiwutthinan, P., S. Chuayjuljit, S. Srasomsab and A. Boonmahitthisud. 2019. Composites of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend with wood fiber and wollastonite: Physical properties, morphology, and biodegradability. *Journal of Applied Polymer Science* 136: 47543-4756.
- Sisi, Wang., Sujuan, Pang., Lisha, Pan., Nai Xu, Hanxiong Huang. 2016. Compatibilization of poly(lactic acid)/ethylene-propylene-diene rubber blends by using organic montmorillonite as a compatibilizer. *Applied Polymer Science* 133: 44192
- Bijarimi, M., S. Ahmad and R. Rasid. 2014. Mechanical, thermal and morphological properties of poly(lactic acid)/epoxidized natural rubber blends. *Journal of Elastomers & Plastics* 46(4): 338-354.
- Chuayjuljit, S., C. Wongwaiwattanakul, P. Chaiwutthinan and P. Prasassarakich. 2017. Biodegradable poly(lactic acid)/poly(butylene succinate)/wood flour composites: Physical and morphological properties. *Polymer Composites* 3(12): 2841-2851.
- Aso, O., J.I. Eguiazabal and J. Nazabal. 2007. The influence of surface modification on the structure and properties of a nanosilica filled thermoplastic elastomer. *Composite Science and Technology* 67: 2854-2863.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวนฤดี พุฒพีก
วัน เดือน ปีเกิด	30 มีนาคม 2538
ที่อยู่	123 หมู่ 8 ตำบลทุ่งทอง อำเภอท่าม่วง จังหวัดกาญจนบุรี 71110
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประวัติการทำงาน	-
เบอร์โทรศัพท์	08-1009-0178
อีเมล	Naruedee_p@mail.rmutt.ac.th

