

การปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิด
โดยการผสมเอทิลีนเอทิลอะคริเลตและสารคู่ควบไซเลน

TOUGHNESS IMPROVEMENT OF POLYLACTIC ACID BY
BLENDING WITH ETHYLENE ETHYL ACRYLATE AND
SILANE COUPLING AGENT



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปีการศึกษา 2561 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TOUGHNESS IMPROVEMENT OF POLYLACTIC ACID BY
BLENDING WITH ETHYLENE ETHYL ACRYLATE AND
SILANE COUPLING AGENT



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่
ACADEMIC YEAR 2018
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดโดยการผสม เอทิลีนเอทิลอะครีเลตและสารคู่ควบไซเลน Toughness Improvement of Polylactic Acid by Blending with Ethylene Ethyl Acrylate and Silane Coupling Agent
ชื่อนักศึกษา	นางสาวพิมพ์สุจี เลิศเจริญวงศ์ รหัสนักศึกษา 58050518 นางสาวมนติชา จันทร์ปัญญา รหัสนักศึกษา 58050530
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี
อุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ ประธานกรรมการ	
รศ.ดร.จตุรรัตน์ ปรัชญารากร กรรมการ	
ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดโดยการผสมเอทิลีนเอทิลอะคริเลตและสารคู่ควบไซเลน
ชื่อนักศึกษา	นางสาวพิมพ์สุจี เลิศเจริญวงศ์ รหัสนักศึกษา 58050518 นางสาวมนทิชา จันทร์ปัญญา รหัสนักศึกษา 58050530
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงสมบัติความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) โดยนำ PLA ผสมกับเอทิลีนเอทิลอะคริเลต (Ethylene ethyl acrylate, EEA) โดยใช้ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (APTES) เป็นสารคู่ควบ ศึกษาผลของอัตราส่วน PLA/EEA ที่ 90/10, 85/15, 80/20 และ 75/25 โดยน้ำหนัก ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) แล้วนำไปฉีดขึ้นรูป (Injection molding) จากผลการวิจัยพบว่า EEA กระจายตัวเป็นทรงกลมอยู่ในภูมิภาคหลักของ PLA เมื่ออัตราส่วนของ EEA เพิ่มขึ้น ทำให้ภูมิภาคกระจายมีขนาดใหญ่ขึ้น และพบช่องว่างของ EEA ในภูมิภาคของ PLA เป็นจำนวนมากแสดงให้เห็นว่า PLA และ EEA มีแรงยึดติดระหว่างภูมิภาคต่ำ ทำให้พอลิเมอร์ผสม PLA/EEA เป็นพอลิเมอร์ผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) ของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมแตกต่างกับ PLA อย่างไม่มีนัยสำคัญ ในทางตรงกันข้ามร้อยละความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง เนื่องจากภูมิภาคของ EEA ในพอลิเมอร์ผสมทำให้สายโซ่ของ PLA เคลื่อนที่เกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ยาก ส่งผลให้ค่าความเค้นสูงสุด ค่าร้อยละการยึด ผน จุดขาด และค่ามอดูลัสของยังมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ EEA ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ผสมสามารถรับแรงกระแทกได้มากขึ้น ค่าความแข็งแรงกระแทกจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น หลังจากนั้น นำพอลิเมอร์ผสมสูตร P80E20 มาศึกษาผลของปริมาณ APTES ตั้งแต่ร้อยละ 0.5-2.0 โดยน้ำหนักของ PLA พบว่า APTES มีส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว ทำให้สามารถกระจายตัวได้ในพอลิเมอร์ผสม อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) ของ PLA ในพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES มีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการใส่ APTES ไม่มีผลต่อขนาดผลึกของ PLA แต่มีผลต่อปริมาณผลึกของ PLA ที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาระหว่าง PLA และ APTES ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ผสมสั้นลง ดังผลของอัตราการหลอมไหลที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ APTES จึงส่งผลให้ค่าร้อยละความเป็นผลึก ค่าความเค้นสูงสุด และค่ามอดูลัสของยังมีแนวโน้มลดลง ในขณะเดียวกัน APTES สามารถเกิดปฏิกิริยาควบแน่นกันเอง ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และค่าร้อยละการยึด ผน จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงกระแทกไม่มีการ

ไม่วการณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก EEA ซึ่งเป็นส่วนที่ให้ความยืดหยุ่น มีอัตราส่วนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักเท่ากันทุกสูตร สรุปได้ว่าการเติม EEA และ APTES ทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกและค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น

คำสำคัญ : พอลิเมอร์ผสม พอลิแลคติกแอซิด เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ 3-อะมิโนโพรพิล-ไตรเอทอกซีไซเลน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Toughness Improvement of Polylactic Acid by Blending with Ethylene Ethyl Acrylate and Silane Coupling Agent
Students	Miss Pimsujee Lertjaroenwong Student ID 58050518 Miss Monticha Junpunya Student ID 58050530
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2018
Advisor	Asst. Prof. Dr. Chonlada Ritvirulh
Co-advisor	Asst. Prof. Dr. Suparat Rukchonlatee

Abstract

This research studied on the improving toughness properties of polylactic acid (PLA). PLA was blended with polyethylene ethyl acrylate (EEA) and 3-Aminopropyl-triethoxysilane (APTES), which was used as the coupling agent. The PLA/EEA ratios 90/10, 85/15, 80/20 and 75/25 by weight were investigated. The compounds were prepared using an internal mixer and the samples were formed using an injection molding machine. The result revealed that EEA dispersed as a spherical in PLA matrix. The size of the spherical was increased when increased the content of EEA. Various holes of EEA in PLA matrix were observed owing to a poor adhesion between PLA and EEA. It is suggested that PLA/EEA was immiscible blend. Therefore, the glass transition temperature (T_g) and crystalline melting temperature (T_m) of PLA in polymer blends were not significant difference from PLA. On the other hand, the percentage of crystallinity of polymer blends, stress at maximum load, percentage of elongation at break and Young's modulus tended to decrease. In addition, when increasing the ratio of EEA, the polymer blend chains can absorb more impact force, leading to an increase of impact strength. Thereafter, the P80E20 blend was selected to study the APTES contents at 0.5-2.0%wt of PLA. It was found that APTES was able to disperse in the polymer blend because it had polar and non-polar moieties. The crystalline melting temperature (T_m) was insignificant change, as compared to PLA. Additionally, it is shown that APTES had no effect on crystalline size. In contrast, the degree of crystallinity was reduced dramatically because PLA could interact with APTES, causing the chain of polymer blends shortens as evidenced by the increase of melt flow rate. The declined trend of the percentage of crystallinity, stress at maximum load and Young's modulus were observed. This is because APTES can

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่สามารถนำออกไปเผยแพร่ภายนอกได้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

condense and form chain entangled network, resulting in an increase of glass transition temperature (T_g) and the percentage of elongation at break. While, impact strength had no significant difference. In conclusion, adding EEA and APTES improved impact strength and percentage of elongation at break. It is indicated that the toughness of the polymer blend was increased.

Keywords : Polymer blends, Polylactic acid, Ethylene ethyl acrylate copolymer, 3-Aminopropyl triethoxysilane



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือ คำแนะนำ เป็นอย่างดีจากบุคคลผู้มีพระคุณดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ ริกชลธิ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา จัดหาสารเคมีที่ใช้สำหรับดำเนินงาน เสนอแนะ แนวทางแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างดำเนินงานจนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ภัทธวุธ มนต์วิเศษ และ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรีชญาวรรการ อาจารย์ คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำแนะนำต่าง ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ และช่วย ตรวจสอบ แก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี และเจ้าหน้าที่ อาคารปฏิบัติการพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ให้ความร่วมมืออำนวยความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์ สารเคมี และอาคารสถานที่สำหรับ ปฏิบัติงาน รวมทั้งคำแนะนำในการใช้เครื่องมือ เพื่อให้โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้ให้บริการในการตรวจวิเคราะห์

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา บุคคลในครอบครัว และเพื่อน ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือและ กำลังใจตลอดการทำโครงการพิเศษนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือตลอดมา หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

พิมพ์สุจี เลิศเจริญวงศ์
มนติชา จันทร์ปัญญา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พลาสติกชีวภาพ.....	4
2.1.1 ความหมายของพลาสติกชีวภาพ.....	4
2.1.2 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและโดยการฝังกลบ.....	5
2.1.3 มาตรฐานของพลาสติกชีวภาพ.....	5
2.1.4 การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้.....	6
2.2 พอลิเมอร์ผสม.....	6
2.3 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA).....	8
2.3.1 ลักษณะและสมบัติทั่วไปของ PLA.....	8
2.3.2 ประเภทของ PLA.....	9
2.3.3 กระบวนการสังเคราะห์ PLA.....	9
2.3.3.1 กระบวนการสังเคราะห์ Lactic acid ทางเคมี.....	9
2.3.3.2 กระบวนการสังเคราะห์ Lactic acid ทางชีวภาพ.....	10
2.3.3.3 การสังเคราะห์ PLA โดยการพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น.....	10
2.3.3.4 การสังเคราะห์ PLA โดยการพอลิเมอไรเซชันแบบการเปิดวง.....	11
2.3.4 การย่อยสลายของ PLA.....	11
2.3.5 การนำไปใช้งาน.....	11
2.4 เอทิลีนเอทิลอะคริเลต (Ethylene ethyl acrylate, EEA).....	11
2.5 สารคู่ควบไซเลน (Silane Coupling agent).....	12
2.5.1 สมบัติทางเคมี.....	12
2.5.2 การนำไปใช้งาน.....	12
2.5.3 3-Aminopropyl triethoxysilane (APTES).....	12
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	15
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	15
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	16
3.3 การเตรียมชิ้นงาน	17
3.3.1 การเตรียมชิ้นงาน PLA/EEA	17
3.3.2 การเตรียมชิ้นงาน PLA/EEA/APTES	17
3.4 การฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน	18
3.5 การทดสอบอัตราการหลอมไหล	18
3.6 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมี	18
3.7 การศึกษาสัณฐานวิทยา	19
3.7.1 ศึกษาสัณฐานวิทยาของ PLA/EEA	19
3.7.2 ศึกษาสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของ APTES	19
3.8 การศึกษาสมบัติทางความร้อน	19
3.9 การทดสอบสมบัติรับแรงดึง	19
3.10 การทดสอบความแข็งแรงกระแทก	20
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	21
4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนของ PLA/EEA	21
4.1.1 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมี	21
4.1.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา	22
4.1.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อน	23
4.1.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล	26
4.2 การศึกษาผลของปริมาณ APTES	28
4.2.1 การศึกษาอัตราการหลอมไหล	28
4.2.2 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมี	29
4.2.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของ APTES ในพอลิเมอร์ผสม	31
4.2.4 การศึกษาสมบัติทางความร้อน	32
4.2.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล	35
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	38
5.1 สรุปผลการวิจัย	38
5.2 ข้อเสนอแนะ	39
เอกสารอ้างอิง	40
ภาคผนวก	43
ภาคผนวก ก	44
ภาคผนวก ข	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้พิมพ์ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค.....	52
ภาคผนวก ง.....	57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญัตินี้

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์และตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ.....	7
3.1 สมบัติบางประการของ PLA	15
3.2 สมบัติบางประการของ EEA.....	15
3.3 สมบัติบางประการของ APTES	16
3.4 สูตรของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA	17
3.5 สูตรของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES	17
4.1 T_g , T_{cc} , T_m และร้อยละความเป็นผลึกของ PLA ในพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA	24
4.2 T_g , T_m และร้อยละความเป็นผลึกของของ EEA ในพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA	24
4.3 อัตราการหลอมไหลของ PLA, PLA/EEA และ PLA/EEA/APTES.....	29
4.4 T_g , T_{cc} , T_m และร้อยละความเป็นผลึกของ PLA ในพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES	33
4.5 T_g , T_{cc} , T_m และร้อยละความเป็นผลึกของ EEA ในพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES.....	33
ง.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ	57
ง.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม P80/E20/APTES ที่อัตราส่วนต่าง ๆ.....	57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความหมายของพลาสติกชีวภาพ (Bioplastics)	5
2.2 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเป็นเนื้อเดียวกัน.....	8
2.3 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน.....	8
2.4 โครงสร้างของ PLA	8
2.5 โครงสร้างของ D(-)-Lactic acid และ L-(+)-Lactic acid.....	9
2.6 โครงสร้างของกรดแลคติก.....	10
2.7 โครงสร้างของ EEA.....	12
2.8 โครงสร้างของ APTES	13
4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PLA, EEA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA.....	22
4.2 สัมฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA.....	23
4.3 การให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของสูตร P100 และพอลิเมอร์ผสม	25
4.4 การให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของสูตร P100 และพอลิเมอร์ผสม	25
4.5 ค่าความเค้นสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA.....	26
4.6 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA	27
4.7 ค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA	27
4.8 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA.....	28
4.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PLA และพอลิเมอร์ผสม P100A0.5.....	30
4.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม P100A0.5, P80E20 และ P80E20A0.5	31
4.11 การกระจายตัวของ Si ใน APTES ของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES	32
4.12 การให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของพอลิเมอร์ผสม P80E20 และ P80E20APTES	34
4.13 การให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์ผสม P80E20 และ P80E20APTES	34
4.14 ค่าความเค้นสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES.....	35
4.15 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES	36
4.16 ค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES.....	36
4.17 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES	37
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและการยืดตัวของพอลิเมอร์ผสม	37
ก.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PLA.....	44
ก.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของ EEA.....	45
ก.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม P80E20	45
ก.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม P100A0.5.....	46
ก.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม P80E20A0.5	46
ก.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม P80E20A1.0	47
ก.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม P80E20A1.5	47
ก.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม P80E20A2.0	48
เอกส.1 สัมฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA ที่กำลังขยาย 1000 เท่า	49
เอกส.2 สัมฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	50

เอกส.1 สัมฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกส.2 สัมฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.3 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	51
ค.1 เทอร์โมแกรมของ PLA	52
ค.2 เทอร์โมแกรมของ EEA	52
ค.3 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม P90E10.....	53
ค.4 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม P85E15.....	53
ค.5 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม P80E20.....	54
ค.6 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม P75E25.....	54
ค.7 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม P80E20A0.5.....	55
ค.8 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม P80E20A1.0.....	55
ค.9 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม P80E20A1.5.....	56
ค.10 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม P80E20A2.0.....	56



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบัน มีการใช้พลาสติกกันอย่างแพร่หลาย ในชีวิตประจำวันเราใช้ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติก เช่น แปรงสีฟัน หลอดยาสีฟัน แก้วน้ำ ขวดน้ำ แก้วอ้อ ถูบรบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น เนื่องจากพลาสติกเป็นวัสดุที่มีสมบัติหลากหลาย ทั้งน้ำหนักเบา ทนทาน และผลิตได้หลากหลายรูปแบบ จึงทำให้พลาสติกเป็นที่นิยมมาก ซึ่งพลาสติกส่วนใหญ่ผลิตมาจากสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีที่ใช้เวลานานในการย่อยสลาย ถึงแม้ว่าพลาสติกสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse) หรือนำกลับมาผลิตซ้ำใหม่ (Recycle) ได้ แต่ค่าใช้จ่ายในกระบวนการค่อนข้างสูง และสมบัติบางประการของพลาสติกเปลี่ยนแปลง เช่น สีของพลาสติกเข้มขึ้นเพราะมีสิ่งเจือปนมากขึ้น หรือความทนทานต่อการใช้งานลดลง ทำให้ไม่นิยมนำพลาสติกที่ใช้แล้วกลับมาผลิตซ้ำใหม่ จึงก่อให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกตามมา

จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีการนำวัสดุจากธรรมชาติ เช่น อ้อย ข้าวโพด มันสำปะหลังมาผลิตเป็นพลาสติก หรือที่เรียกว่า พลาสติกชีวภาพ (Bioplastics) เพื่อใช้ทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีบางชนิดทำให้มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น แต่เนื่องจากพลาสติกชีวภาพบางชนิดยังไม่สามารถย่อยสลายได้ จึงมีการคิดค้นการผลิตพลาสติกจากธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ (Biodegradable plastics) โดยอาศัยความชื้นและจุลินทรีย์ในธรรมชาติได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และน้ำ (H₂O) [1] เพื่อแก้ไขปัญหาด้านขยะและสิ่งแวดล้อม

พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) เป็นพลาสติกที่สามารถผลิตมาจากวัสดุที่มาจากธรรมชาติ เช่น มันสำปะหลัง อ้อย ข้าวโพด นำมาหมัก (Fermentation) ให้เกิดกรดแลคติก (Lactic acid) แล้วนำมาผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) เกิดเป็น PLA ซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกับพลาสติกที่ผลิตจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแต่สามารถย่อยสลายได้ ทำให้เริ่มมีการนำ PLA มาใช้ทดแทนพลาสติกในชีวิตประจำวัน เช่น แก้วน้ำ หลอด ถูบพลาสติก และใช้ในการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) ซึ่งในปี พ.ศ. 2553 PLA เป็นพลาสติกชีวภาพที่มีการใช้เป็นอันดับสองของโลก [2] แต่ปัญหาหลักของ PLA คือ เป็นพลาสติกที่เปราะ แตกหักง่าย ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งาน จึงมีการปรับปรุงสมบัติของ PLA ให้มีความเหนียวมากขึ้น เพื่อเพิ่มความหลากหลายในการใช้งาน

เอทิลีนเอทิลอะคริเลต (Ethylene ethyl acrylate, EEA) เป็นโคพอลิเมอร์ (Copolymer) ที่ได้จากการนำพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว มาทำปฏิกิริยากับพอลิเอทิลอะคริเลต (Polyethyl acrylate, EA) ได้โคพอลิเมอร์ที่มีขั้วมากขึ้น ส่งผลให้มีสมบัติการยึดติด (Adhesion property) ดีขึ้น [3] อีกทั้งหมู่อะคริเลต (Acrylate group) ยังทำให้มีปริมาตรอิสระ (Free volume) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ที่ได้มีความยืดหยุ่น (Flexibility) และความเหนียว (Toughness) มากขึ้น

จากงานวิจัยของ Meng, X. et al. (2017) ได้ศึกษาการเพิ่มความเหนียวของ PLA โดยการเติมออร์แกนออลคอกซีซิลเลน (Organoalkoxysilane) เกิดปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation) และปฏิกิริยาการต่อกิ่ง (Grafting) โดยนำเม็ดพลาสติก PLA ละลายในไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) และเติมสารคู่ควบที่ต่างชนิดกันและปริมาณที่ต่างกันเพื่อนำมาเปรียบเทียบ

โดยสารคู่ควบที่เติม 3 ชนิด คือ 3-Aminopropyl triethoxysilane (APTES), 3-Triethoxysilyl-ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ผลและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

propyl isocyanate (ICPTES) และ Trimethoxymethylsilane (MTMS) ปั่นกวนข้ามคืน แล้วนำมาเทหล่อแบบ (Casting) บนแผ่นพอลิเทตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) แล้วนำไปอบ จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด (Compression process) และทดสอบสมบัติเชิงกล ผลการทดสอบพบว่าพอลิเมอร์ที่ใส่ APTES 0.5% และ ICPTES 1.0% มีความอ่อนตัวเมื่อได้รับแรงดึง (Tensile ductility) และความเหนียว (Toughness) เพิ่มขึ้น เนื่องจาก APTES และ ICPTES มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาควบแน่นได้เองและเกิดการตอกกับ PLA ส่วน MTMS ไม่สามารถปรับปรุงความเหนียวของ PLA ได้ เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นเท่านั้น ต่อมา Gravalos, K. G. *et al.* (1995) [5] ได้ศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) กับ EEA ที่อัตราส่วน 95/5, 85/15, 75/25, 50/50 และ 25/75 โดยน้ำหนัก โดยทำการผสมแบบสารละลาย (Solution mixing) ปั่นกวนภายใต้บรรยากาศเฉื่อย (Inert atmosphere) หลังจากนั้นใช้เครื่องกดอัด (Compression machine) เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน PET/EEA เป็น 85/15 มีสมบัติเชิงกลดีที่สุดและจากผลของการศึกษาด้วย SEM พบว่าเป็นอัตราส่วนที่มีความเข้ากันได้มากที่สุด ภูมิภาคของ EEA เป็นภูมิภาคขนาดเล็ก ๆ กระจายทั่วภูมิภาคของ PET ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยา Transesterification ระหว่างหมู่เอสเตอร์ของ EEA กับหมู่ไฮดรอกซิล และหมู่คาร์บอกซิลของ PET ทำให้ PET และ EEA มีความเข้ากันได้ ซึ่ง PLA มีหมู่เอสเตอร์ (Ester) เหมือน PET

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการปรับปรุงสมบัติความเหนียวของ PLA ที่โดยการผสมกับ EEA ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ที่เป็นส่วนที่นิ่ม (Softness) และให้ความยืดหยุ่นสูง (Flexibility) เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงกระแทกของ PLA และใส่ APTES เป็นสารคู่ควบเพื่อให้ความเหนียวของ PLA เพิ่มขึ้น โดยทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA และปริมาณของ APTES ที่มีผลต่อโครงสร้างทางเคมี สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกล

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการปรับปรุงความเหนียวของ PLA โดยศึกษาผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA และปริมาณของสารคู่ควบ APTES ที่ส่งผลต่อสมบัติความเหนียวของพอลิเมอร์ผสม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาผลของการผสม PLA กับ EEA ที่อัตราส่วน 90/10, 85/15, 80/20, และ 75/25 โดยน้ำหนัก ที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางเคมี สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกล
- 2) ศึกษาผลของสารคู่ควบ APTES ที่ปริมาณร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักของ PLA ที่ส่งผลต่อโครงสร้างทางเคมี สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา และสมบัติเชิงกล
- 3) ผสมสารในเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)
- 4) ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการฉีด (Injection molding)
- 5) ศึกษาอัตราการไหลด้วยเครื่อง Melt flow indexer (MFI)
- 6) ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมีและวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ด้วยเครื่อง Fourier-transform infrared spectrophotometer (FTIR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 7) ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)
- 8) ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC)
- 9) ศึกษาสมบัติค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (Percentage of elongation at break) และค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ด้วยเครื่อง Universal testing machine
- 10) ศึกษาค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ด้วยเครื่องวัดความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถปรับปรุงความเหนียวของ PLA โดยการออกสูตรพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA ที่มี APTES เป็นสารคู่ควบ ที่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ และสามารถนำงานวิจัยไปใช้ต่อยอดในเชิงพาณิชย์ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกชีวภาพ

พลาสติก (Plastic) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มนุษย์คิดค้นขึ้นเพื่อนำมาใช้งานในชีวิตประจำวันอย่างกว้างขวาง แต่พลาสติกก่อให้เกิดปัญหาด้านปริมาณขยะและมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากย่อยสลายยากและใช้เวลานาน ด้วยเหตุนี้ นักวิทยาศาสตร์จึงได้คิดค้นและผลิตพลาสติกชนิดใหม่ขึ้นมาทดแทน เพื่อช่วยลดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยเรียกว่า พลาสติกชีวภาพ (Bioplastics) หรือพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) [6]

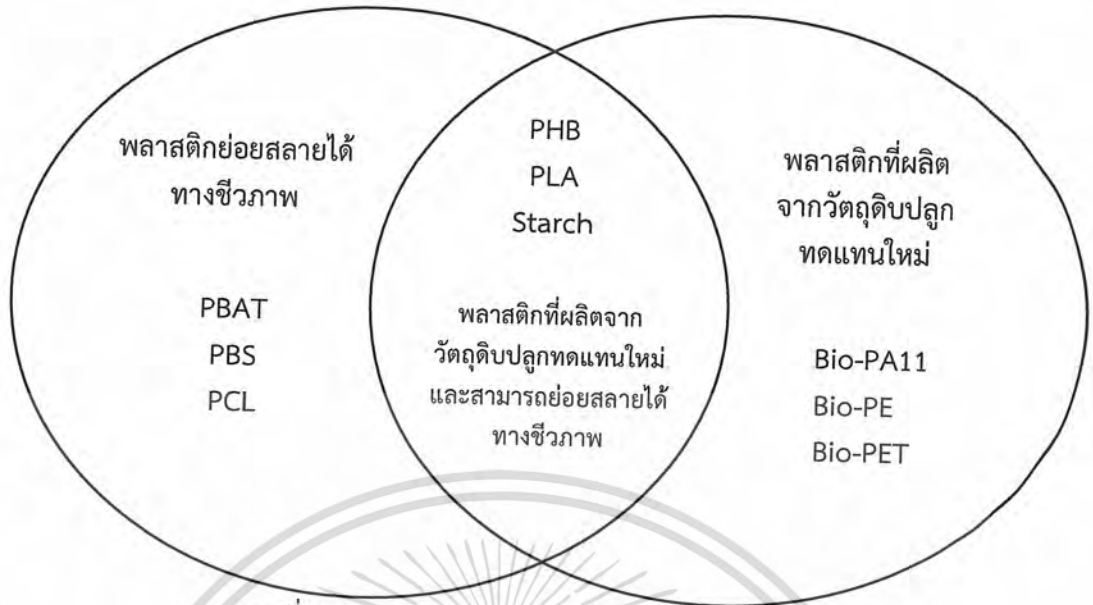
2.1.1 ความหมายของพลาสติกชีวภาพ (Bioplastics)

พลาสติกชีวภาพ ตามคำจำกัดความของสมาคมพลาสติกชีวภาพแห่งสหภาพยุโรป (European Bioplastics, EuBP) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ความหมาย [7] ได้แก่

1. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เป็นพลาสติกที่มีแหล่งวัตถุดิบชีวมวล (Biomass) ที่สามารถสร้างขึ้นจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ (Bio-based materials/Renewables) หรือสร้างขึ้นจากปิโตรเคมี (Petro-based materials/Non-renewables) หลังจากการใช้งาน สามารถย่อยสลายได้น้ำ ชีวมวล ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสารประกอบอินทรีย์ ตัวอย่างพลาสติกที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ เช่น พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน (Starch based plastics) พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate, PBS) และพอลิบิวทิลีนอะดิเพตเทเรฟทาเลต (Polybutylene adipate terephthalate, PBAT)

2. พลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ เป็นพลาสติกที่มีแหล่งวัตถุดิบชีวมวลที่สามารถสร้างขึ้นจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ โดยใช้แหล่งคาร์บอนที่มีอยู่ในโมเลกุลของแป้ง น้ำตาลหรือเซลลูโลส ซึ่งพืชที่นำมาใช้ผลิต ได้แก่ อ้อย ข้าวโพด มันสำปะหลัง เป็นต้น โดยพลาสติกในกลุ่มนี้มีสมบัติทั้งย่อยสลายได้ทางชีวภาพและไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ตัวอย่างพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ เช่น พลาสติกพอลิเอทิลีนจากเอทานอลที่ผลิตจากอ้อย (Bio-polyethylene, Bio-PE) พลาสติกกลุ่มไนลอนที่ผลิตมาจากน้ำมันเมล็ดสะทู่ (Bio-PA11) พลาสติกกลุ่มพอลิเอสเตอร์ที่ใช้วัตถุดิบจากโพรเพนไดออลที่มาจากพืช (Bio-Propanediol, PDO) ได้แก่ Bio-PET

ความหมายของพลาสติกชีวภาพสามารถแสดงได้ดังแผนภาพในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความหมายของพลาสติกชีวภาพ (Bioplastics) [8]

2.1.2 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและการย่อยสลายโดยการฝังกลบ (Biodegradability and Compostability)

พลาสติกชีวภาพใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์แตกต่างกันขึ้นกับวัสดุที่นำมาผลิต ความชื้น และอุณหภูมิ โดยถ้าใช้อุณหภูมิในการย่อยสลายสูงขึ้นสามารถย่อยสลายได้ภายใน 90-180 วัน มาตรฐานของนานาชาติส่วนใหญ่กำหนดให้พลาสติกต้องย่อยสลายได้ 60% ภายในระยะเวลา 180 วัน โดยมีหลักเกณฑ์อื่น ๆ สำหรับผลิตภัณฑ์ที่อ้างว่าสามารถย่อยสลายโดยการฝังกลบได้หรือไม่ ซึ่งมีความสำคัญในการใช้แบ่งประเภทระหว่างย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และย่อยสลายได้โดยการฝังกลบ [8]

พลาสติกที่ย่อยสลายโดยการฝังกลบ (Compostability) ต้องมีหลักเกณฑ์ 3 ประการ ดังนี้

1. การย่อยสลายทางชีวภาพ คือ การที่พลาสติกสามารถสลายตัวเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ชีวมวลและสารประกอบอินทรีย์ ที่อัตราการสลายตัวเช่นเดียวกับเซลลูโลสหรือกระดาษ
2. การแยกส่วน (Disintegration) คือ การที่วัสดุสามารถแยกออกจากกันได้โดยการแยกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ จนสังเกตไม่เห็น
3. ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Ecotoxicity) คือ การย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกที่ต้องไม่เกิดวัสดุที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและเมื่อย่อยสลายแล้วต้องเป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของพืช

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่สามารถถูกย่อยสลายได้จากจุลินทรีย์ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย รา โดยไม่มีข้อกำหนดเวลาที่ต้องใช้ในการย่อยสลายและไม่มีสารพิษตกค้าง

2.1.3 มาตรฐานของพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายโดยการฝังกลบ [8]

องค์กรนานาชาติมีการกำหนดมาตรฐานและวิธีการทดสอบความสามารถในการฝังกลบ ดังนี้

- American Society for Testing and Materials (ASTM) : ASTM D6400
- European Standardization Committee (CEN) : EN13432, EN14995
- German Institute for Standardization (DIN)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูเิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญ่าตเินหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- International Standards Organization (ISO) : ISO17088

2.1.4 การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ [9]

1. การใช้งานทางการแพทย์

พลาสติกย่อยสลายได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุทางการแพทย์ เช่น ผิวนั่งเทียม ใหมละลาย อุปกรณ์ประเภทสกรู และแผ่นตามกระดูกที่ได้รับการผ่าตัด ซึ่งฝังอยู่ในร่างกายที่สามารถย่อยสลายได้เอง ทำให้ไม่ต้องผ่าตัดซ้ำเพื่อนำวัสดุที่ใช้รักษาเสร็จแล้วออกจากร่างกาย

2. ฟิล์มคลุมดินและวัสดุสำหรับการเกษตร

แผ่นฟิล์มช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืชและรักษาความชื้นในดิน การใช้ฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพทำให้ช่วยลดขั้นตอน เวลาในการเก็บ และการกำจัดฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน เพราะสามารถไถพรวนลงดินได้ นอกจากนี้ยังมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้ทำถุงสำหรับเพาะต้นกล้าอีกด้วย

3. ฟิล์มและถุงสำหรับใส่เศษอาหาร (Food waste films and bags)

ถุงสำหรับใส่ขยะเศษอาหารเหมาะสำหรับสถานที่ที่มีระบบการกำจัดขยะอินทรีย์ด้วยวิธีการฝังกลบ เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการฝังกลบพร้อมกับขยะอินทรีย์ ทำให้เกิดความสะอาด ไม่ต้องคัดแยกทิ้ง

4. บรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค (Consumer packaging materials)

การใช้บรรจุภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่ผลิตจากพลาสติกทั่วไปมักไม่นิยมนำกลับมารีไซเคิล เนื่องจากมีการปนเปื้อนสูง ดังนั้นการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาด้านการจัดการขยะลงได้

2.2 พอลิเมอร์ผสม [10-13]

พอลิเมอร์ผสม (Polymer blends) คือ การนำพอลิเมอร์สองชนิดมาผสมกันโดยวิธีทางกายภาพ เป็นการนำสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน ทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติหลากหลายมากขึ้น แต่พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ไม่สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interphase) ซึ่งเป็นข้อบกพร่อง (Defects) ของผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมด้อยกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาโครงสร้างของพอลิเมอร์แต่ละตัวที่นำมาผสมกันเพื่อให้ความเข้ากันได้มากขึ้น

ในการพิจารณาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์แต่ละตัวที่นำมาผสมนั้น สามารถพิจารณาจากค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy) ในการผสม ดังสมการที่ 2.1

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}} \quad (2.1)$$

เมื่อ ΔG คือ พลังงานอิสระของกิบส์ในการผสม (kJ/mol)

ΔH คือ ความแตกต่างของเอนทัลปีในการผสม (kJ/mol)

T คือ อุณหภูมิเคลวิน (K)

ΔS คือ ความแตกต่างของเอนโทรปีในการผสม (kJ/mol)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพลังงานอิสระของกิบส์ในการผสมขึ้นกับเอนทัลปีและเอนโทรปีในการผสม สำหรับสารที่มีโมเลกุลใหญ่อย่างพอลิเมอร์นั้นค่าเอนโทรปีใกล้เคียงศูนย์ ทำให้เอนโทรปีมีค่าน้อยมาก ดังนั้นความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมถูกกำหนดโดยค่าเอนทัลปีเพียงอย่างเดียว

นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาจากค่าความสามารถในการละลาย (Solubility parameter, δ) โดยถ้าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีค่าความสามารถในการละลายต่างกันมาก ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ยาก ดังนั้นในการเลือกคู่ของพอลิเมอร์ผสมควรมีค่าความสามารถในการละลายใกล้เคียงกัน ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความสามารถในการละลายของพอลิเมอร์และตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ [14]

Polymer	δ (cal/cm ³)	Solvent	δ (cal/cm ³)
Polyethylene (PE)	7.90	n-Hexane	7.24
Polybutadiene	8.40	Carbon tetrachloride	8.58
Polystyrene (PS)	9.13	Xylene	8.80
Polyvinyl chloride (PVC)	9.50	Benzene	9.50
Polyethylene terephthalate (PET)	10.1	Chloroform	9.24

(Burke, J. Solubility Parameter : Theory and Application. [Online]. Available : <http://www.cool.conservation-us.org/byauth/burke/solpar/solpar2.html>.)

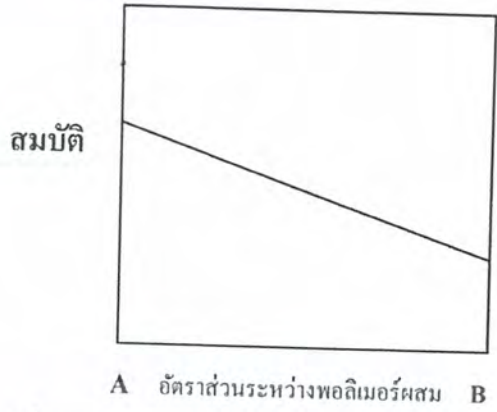
2.2.1 ประเภทของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

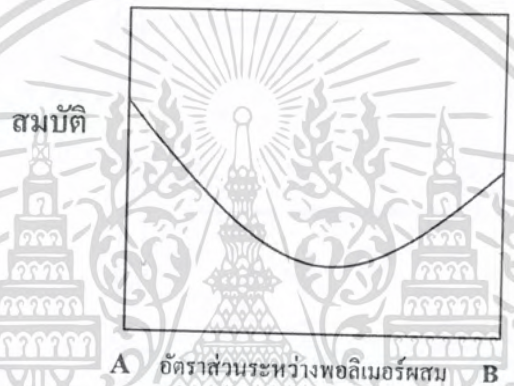
1. พอลิเมอร์ผสมที่ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscible blend) มีค่า ΔG เป็นลบ นั่นคือ $\Delta H - T\Delta S < 0$ โดยทั่วไปสมบัติที่ได้ขึ้นกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสองในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ได้กราฟสมบัติเชิงกลเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2.2

2. พอลิเมอร์ผสมที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) มีค่า ΔG เป็นบวก นั่นคือ $\Delta H - T\Delta S > 0$ ซึ่งมีพื้นฐานวิทยาแยกเป็น 2 วัฏภาค คือ วัฏภาคหลัก (Matrix phase) และวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) โดยระหว่างรอยต่อของวัฏภาค (Interphase) มีความเข้ากันได้เล็กน้อย ดังนั้นอาจทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมลดต่ำลงมากกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ จึงทำให้ได้กราฟสมบัติเชิงกลที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งลง ดังรูปที่ 2.3 แต่สามารถปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้นได้โดยการเติมสารช่วยผสม (Compatibilizers) ซึ่งสารดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ร่วมชนิดบล็อกและต่อกิ่ง (Block and graft copolymers) จึงสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ทั้งสองวัฏภาค และต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูงเพื่อทำให้เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) กับสายโซ่พอลิเมอร์แต่ละวัฏภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมเป็นเนื้อเดียวกัน [12]

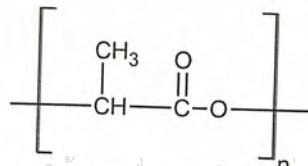


รูปที่ 2.3 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [12]

2.3 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA)

2.3.1 ลักษณะและสมบัติทั่วไปของ PLA

พอลิแลคติกแอซิดหรือพอลิแลคไทด์ (Polylactide) เป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างสมบูรณ์ (Biodegradable) เป็นเทอร์โมพลาสติกแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline thermoplastic) มีโครงสร้างเป็นอะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ (Aliphatic polyester) ดังรูปที่ 2.4 มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ประมาณ 55-60°C มีอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ประมาณ 145-160°C สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่เกิดขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ เช่น แป้งข้าวโพด หัวมันสำปะหลัง มันฝรั่ง และอ้อย ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1932 โดยนักวิจัยที่ชื่อ W.H. Carothers ของบริษัทดูปอนส์ (DuPont) ประเทศสหรัฐอเมริกา จากนั้นได้มีการศึกษา พัฒนาสมบัติและกระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง ในปี ค.ศ. 2010 PLA เป็นพลาสติกชีวภาพที่มีการใช้เป็นอันดับสองของโลก [2]



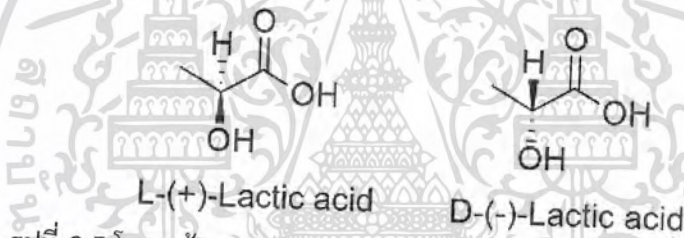
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของ PLA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PLA เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถขึ้นรูปได้ง่ายเช่นเดียวกับพวกพอลิโอเลฟินส์ (Polyolefins) ทั้งการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีด (Extrusion process) กระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding process) เป็นต้น อีกทั้งยังมีสมบัติเชิงกลที่ดี คือ มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดุลัส (Modulus) และความแข็ง (Stiffness) สูง จึงสามารถนำมาใช้งานได้หลากหลาย แต่อย่างไรก็ตาม PLA ยังมีสมบัติที่เป็นข้อจำกัดการใช้งานอยู่บางประการ เช่น มีความเปราะ (Brittleness) สูงและมีเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) ที่ต่ำ ดังนั้นในกระบวนการผลิตจึงมีการปรับปรุงสมบัติของ PLA โดยการเติมสารเสริมแรง (Reinforcement) และพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) และสมบัติการยืด (Elongation) ให้ดีขึ้น [15]

2.3.2 ประเภทของ PLA

PLA มีโครงสร้างโมเลกุล 2 แบบคือ Dextrorotatory; D(-) และ Levorotatory; L(+) ดังรูปที่ 2.5 หรือแบบ Racemic DL ขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต โดยสมบัติทางกายภาพของ PLA เป็นผลมาจากตำแหน่งไอโซเมอร์ของ L(+) และ D(-) ในมอนอเมอร์ ซึ่งมี 3 รูปแบบ ที่มีชื่อเรียกแตกต่างกัน ได้แก่ Poly-L-lactic acid (PLLA), Poly-D-lactic acid (PDLA) และ Poly-DL-lactic acid (PDLLA)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ D-(-)-Lactic acid และ L-(+)-Lactic acid [16]

2.3.3 กระบวนการสังเคราะห์ PLA

PLA เกิดจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของกรดแลคติก (Lactic acid, LA) ซึ่งกรดแลคติกมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) และหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl group) อยู่ในโครงสร้างจึงทำให้มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา กรดแลคติกสามารถละลายน้ำและละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ การสังเคราะห์กรดแลคติกมีอยู่ 2 วิธี คือ

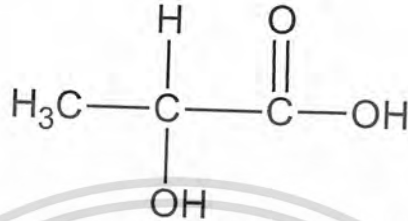
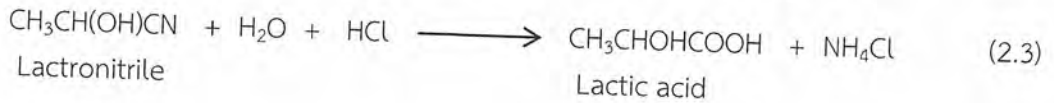
2.3.3.1 กระบวนการสังเคราะห์ Lactic acid ทางเคมี

กระบวนการสังเคราะห์ Lactic acid ทางเคมีใช้ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของแลคโตรไนไทรล์โดยอาศัยกรดแก่ เช่น ไฮโดรคลอริกเข้มข้นหรือกรดซัลฟิวริก กระบวนการผลิตเริ่มต้นจากการนำไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Hydrogen cyanide, HCN) มาเติมลงในอะซีทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้แลคโตรไนไทรล์ (Lactronitrile) เป็นผลิตภัณฑ์ดังสมการที่ 2.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นนำแลคโทรไนไทรล์ที่ได้ไปทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยใช้กรดเข้มข้นได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดแลคติกและเกลือแอมโมเนียม ดังสมการที่ 2.3 โครงสร้างของกรดแลคติกดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของกรดแลคติก

วิธีนี้สามารถผลิตกรดแลคติกโดยใช้เวลาอันสั้น แต่ผลผลิตที่ได้มีการผสมกันของทั้ง L(+) และ D(-) Lactic acid โดยในการผลิต PLA ต้องผลิตจาก L(+) หรือ D(-) ที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งสามารถทำได้โดยวิธีการสังเคราะห์ทางชีวภาพ

2.3.3.2 กระบวนการสังเคราะห์ Lactic acid ทางชีวภาพ

กรดแลคติกที่ผลิตโดยวิธีการทางชีวภาพเกิดจากการนำวัตถุดิบธรรมชาติ เช่น ข้าวโพด หัวบีท มันฝรั่ง อ้อย มาบดให้เป็นผงแป้งแล้วใช้เอนไซม์อะไมเลส (Amylase) ย่อยให้กลายเป็นน้ำตาลกลูโคส (Glucose) แล้วหมักน้ำตาลกลูโคสด้วยจุลินทรีย์ในสภาวะที่เหมาะสม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดแลคติก กลีเซอรอล (Glycerol) เอทานอล (Ethanol) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ชนิดของกรดแลคติกที่ได้ขึ้นอยู่กับจุลินทรีย์ที่เลือกใช้ กรดแลคติกที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นที่สามารถหมักวนเวียนมาใช้ใหม่ได้จึงลดปริมาณขยะของภาคอุตสาหกรรมและภาคการเกษตร อีกทั้งยังสามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50 °C จึงใช้พลังงานในการผลิตต่ำ โดยกระบวนการหมักสามารถทำได้ในระยะเวลา 3-5 วัน จึงใช้ระยะเวลานานแต่ได้ผลผลิตมากกว่าและบริสุทธิ์กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี

2.3.3.3 การสังเคราะห์ PLA โดยการพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization)

กระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นที่ใช้วิธีพอลิเมอไรเซชันแบบบัลค์ (Bulk polymerization) ทำให้เกิดการควบแน่นของวงแลคไทด์ (Lactide) แข่งกับ PLA ทำให้ได้ปริมาณของ PLA น้อย นอกจากนี้ PLA ที่ได้มายังเกิดการสลายตัวได้ง่ายอีกด้วย ส่วนกระบวนการควบแน่นที่ใช้วิธีพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย (Solution polymerization) สามารถเกิดการถ่ายโอนสายโซ่โดยตัวทำละลาย ทำให้ PLA ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างต่ำ กระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นจึงไม่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรม [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.4 การสังเคราะห์ PLA โดยการพอลิเมอไรเซชันแบบปฏิกิริยาการเปิดวง (Ring opening polymerization)

การพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงเป็นวิธีที่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรม เนื่องจาก PLA ที่ได้จากกระบวนการมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี การทำพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงส่วนใหญ่ใช้ทินทุคลอไรด์ (Tin (II) chloride, SnCl_2) หรือแอสแตนนัสคลอไรด์ (Stannous chloride) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [1]

2.3.4 การย่อยสลายของ PLA

การย่อยสลายของ PLA เกิดจากการที่สายโซ่ถูกทำให้สั้นลงโดยทางชีวภาพ PLA ย่อยในสภาวะฝังกลบ (Compost) ที่อุณหภูมิ 60°C การย่อยสลายแบ่งออกเป็น 2 ระยะ คือ เกิดการย่อยสลายโดยเอนไซม์ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ที่พันธะเอสเทอร์ของ PLA ทำให้สายโซ่ถูกตัดสั้นลง จนกลายเป็น LA มอนอเมอร์ ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำ ในขั้นตอนนี้พลาสติกมีการแตกหักเป็นชิ้นเล็ก ๆ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง จึงถูกย่อยสลายต่อโดยจุลินทรีย์กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) หรือก๊าซมีเทน (CH_4) โดยปฏิกิริยาทั้งหมดที่กล่าวมานี้ใช้เวลาประมาณ 4 เดือนถึง 2 ปี ขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอก เช่น สภาวะแวดล้อม และปัจจัยภายในของ PLA เอง เช่น น้ำหนักโมเลกุล และองค์ประกอบเป็นผลึก [1]

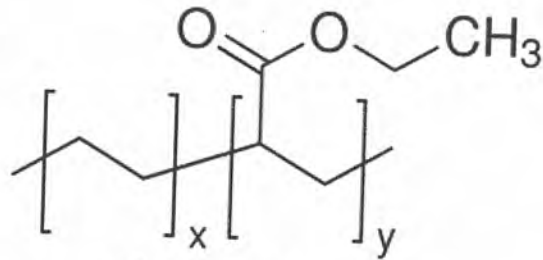
2.3.5 การนำไปใช้งาน

PLA เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลที่ดี จึงสามารถนำไปประยุกต์ทำเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายอย่าง ขึ้นอยู่กับการควบคุมสมบัติเชิงกลโดยการเลือกน้ำหนักโมเลกุลและสูตรในการผสมที่เหมาะสม เช่น ขวดบรรจุน้ำผลไม้ (Fruit juice bottles), อุปกรณ์ทางอาหาร (Food cutlery), แผ่นฟิล์มที่มีการจัดเรียงตัว 2 ทิศทาง (Bi-axially oriented film), เส้นใยชนิดไม่ถักทอ (Non-Woven), ฟิล์มสำหรับบรรจุภัณฑ์ (Packaging films) และอื่น ๆ [18]

2.4 เอทิลีนเอทิลอะคริเลต (Ethylene ethyl acrylate, EEA)

EEA เป็นโคพอลิเมอร์ที่ได้จากการนำพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว มาทำปฏิกิริยากับพอลิเอทิลอะคริเลต (Polyethyl acrylate, EA) ได้โคพอลิเมอร์ที่มีขั้วมากขึ้น ดังรูปที่ 2.7 ส่งผลให้มีสมบัติการยึดติด (Adhesion property) ดีขึ้น มีความยืดหยุ่นสูงและให้ความเหนียวที่อุณหภูมิต่ำ สามารถผสมเข้ากับพอลิโอเลฟินส์ (Polyolefins) อื่น ๆ ได้อย่างดีเยี่ยม EEA สามารถใช้เป็นกาวเพื่อยึดติดพอลิโอเลฟินส์กับวัสดุที่มีขั้วอื่น ๆ เช่น โลหะ เซลลูโลส (Cellulose) พอลิเอสเทอร์ (Polyester) พอลิไวนิลิดีนคลอไรด์ (Polyvinylidene chloride) เซลลูโลส (Cellulose) พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride) พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) พอลิสไตรีน (Polystyrene) ถ้วยน้ำ และฟอยล์ (Foil) [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ EEA [20]

2.4.1 การนำไปใช้งาน

- ใช้สำหรับการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ
- ใช้เป็นการระหว่างชั้นของพอลิไวนิลคลอไรด์กับพอลิโอฟีนส์

2.5 สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) [21]

สารคู่ควบไซเลนหรือไซเลน ประกอบด้วย Si มีโครงสร้างเป็นสองหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน มักใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงยึดเกาะ ทำให้สามารถเสริมแรงได้

2.5.1 สมบัติทางเคมี

ไซเลนสามารถยึดเกาะกับโมเลกุลต่าง ๆ โดยทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของตัวเองกับน้ำหรือความชื้น เกิดเป็นหมู่ไซลานอล (Silanols group) หรือสามารถยึดติดกับผิวของสารอินทรีย์โดยการจับของหมู่ไซลานอลกับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของโมเลกุลนั้น ๆ ไซเลนยังสามารถทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นการยึดเกาะหลายชั้นหรือเป็นสายโซ่ตาข่ายที่เกี่ยวข้องกัน (Interpenetrating network, IPN)

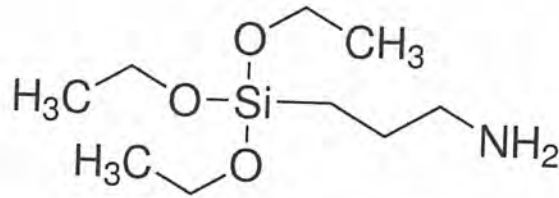
2.5.2 การนำไปใช้งาน

อุตสาหกรรมและทางการแพทย์ใช้ไซเลนสำหรับเป็นสารคู่ควบเพื่อยึดเส้นใยแก้ว (Glass Fiber) เข้ากับพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Polymer matrix) หรือทำให้วัสดุประกอบมีการยึดเกาะที่มีความเสถียรมากขึ้น

2.5.3 3-Aminopropyl triethoxysilane หรือ APTES

APTES เป็นสารคู่ควบไซเลนที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.8 ที่ส่วนปลายของโครงสร้างมีหมู่อะมิโน (Amino group) และไวนิล (Vinyl) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Active group) จึงสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่น เช่น อีพอกซี (Epoxy), ฟีนอลิก (Phenolic) และพอลิเอสเตอร์ (Polyester) ได้ ส่วนปลายอีกด้านคือ Alkoxy ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลได้ กลุ่มสารอินทรีย์ (Organic groups) ของสารคู่ควบไซเลนที่มีการจำเพาะเจาะจงต่อการเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์สังเคราะห์ ทำให้สามารถใช้ในการผลิตพลาสติกเสริมใยแก้วเพื่อปรับปรุงความแข็งแรงเชิงกล และความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่เปียกชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของ APTES

APTES ถูกนำไปใช้งานหลากหลาย เช่น ใช้ในการทำแก้วและแก้วเซรามิก ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวของซิลิกอนและกราฟีน (Graphenes) APTES ใช้ในการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของ Cellulose nanofibrils (CNF) ผ่านปฏิกิริยา Silylation ของหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของ CNF [4]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 Meng X. *et al.* (2017) ได้ศึกษาการเพิ่มความเหนียวของ PLA โดยการเติมออร์แกนอซิลอกซีไฮเลน (Organoalkoxysilane) ด้วยปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation) และปฏิกิริยาการต่อกิ่ง (Grafting) โดยนำเม็ดพลาสติก PLA ละลายในไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) เติมไซเลนที่ต่างชนิดกันและปริมาณที่ต่างกันเพื่อนำมาเปรียบเทียบ โดยไซเลนที่ใช้มี 3 ชนิด คือ 3-Aminopropyl triethoxysilane (APTES), 3-Triethoxysilyl propyl- isocyanate (ICPTES) และ Trimethoxymethylsilane (MTMS) ปั่นกวนข้ามคืนที่อุณหภูมิห้อง และนำมาเทหล่อแบบ (Casting) บนแผ่นพอลิเทตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene, PTFE) แล้วนำไปอบ จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการกดอัด (Compression) และนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ผลการทดสอบพบว่า การเติม APTES 0.5% และ ICPTES 1.0% ทำให้ความอ่อนตัวเมื่อได้รับแรงดึง (Tensile ductility) และความเหนียว (Toughness) เพิ่มขึ้น เนื่องจาก APTES และ ICPTES มีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งการควบแน่นของสารคู่ควบเองและการต่อกิ่งกับ PLA ส่วน MTMS ไม่สามารถปรับปรุงความเหนียวของ PLA ได้ เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่าง MTMS เท่านั้น

2.6.2 Wang Y. *et al.* (2019) ศึกษาการปรับปรุงความเหนียวของ PLA โดยการเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีรูปร่างเป็นเกลียว (Helical carbon nanotube, HCNTs) และผ่านการปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันโดยทำการต่อกิ่ง (Grafting) APTES ลงไปที่ผิวของ HCNTs แล้วนำไปเข้าเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) ตัดให้เป็นเม็ดแล้วนำไปฉีด (Injection) เพื่อขึ้นรูปเป็นดัมเบลล์ เมื่อทดสอบพบว่าพอลิเมอร์ที่ใส่ HCNTs ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนักมีความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เพิ่มขึ้น 30% และพอลิเมอร์ที่ใส่ HCNTs ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักมีการยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) เพิ่มขึ้น 205% เมื่อเทียบกับ PLA ซึ่งผลที่ได้เกิดจากการจัดเรียงตัวของ HCNTs ที่เหนียวทำให้ PLA จัดเรียงตัวในแนวทิศทางการดึงยึด การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่าง APTES และ PLA และการเกี่ยวพันทางกายภาพของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้ความอ่อนตัวเมื่อได้รับแรงดึง (Tensile ductility) ของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น

2.6.3 Gravalos, K. G. *et al.* (1995) ศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) กับ EEA ที่อัตราส่วน 95/5, 85/15, 75/25, 50/50 และ 25/75 โดยน้ำหนัก โดยทำการผสมแบบสารละลาย (Solution mixing) ปั่นกวนภายใต้ไม่วอร์มใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรยากาศเฉื่อย (Inert atmosphere) หลังจากนั้นใช้เครื่องกดอัด (Compression machine) เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วน PET/EEA เป็น 85/15 มีสมบัติเชิงกลดีที่สุดและจากผลของการศึกษาด้วย SEM พบว่าเป็นอัตราส่วนที่มีความเข้ากันได้มากที่สุด วัฏภาคของ EEA เป็นวัฏภาคกระจายที่มีขนาดเล็กกระจายทั่วในวัฏภาคของ PET ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยา Transesterification ระหว่างหมู่เอสเตอร์ของ EEA กับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) และหมู่คาร์บอกซิล (COOH) ของ PET ทำให้ PET และ EEA มีความเข้ากันได้

2.6.4 Lu W. *et al.* (2018) ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA แป้งไม้ (Wood flour, WF) และพอลิเมทิลเมทาอะคริเลต (Polymethylmethacrylate, PMMA) ทำการผสมแบบหลอมเหลว (Melt mixing) โดยใช้เครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปเข้าเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหอนคู่ (Twin screw extruder) หลังจากนั้นนำไปฉีด (Injection) เพื่อขึ้นรูปเป็นคัมเบลล์ เมื่อทดสอบพบว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/WF/PMMA มีความแข็งแรงดึง (Tensile strength) โมดูลัสการโค้งงอ (Flexural modulus) และโมดูลัสของยัง (Young's modulus) เพิ่มขึ้น 10.02%, 37.21% และ 32.80% ตามลำดับ เมื่อนำไปตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC พบว่าไม่ปรากฏอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ของ PLA (60.9°C) และ PMMA (118.8°C) แต่ปรากฏ T_g ใหม่ของพอลิเมอร์ผสมเกิดขึ้น แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ของ PLA และ PMMA

2.6.5 Chen H. *et al.* (2018) ได้ศึกษาการเพิ่มความเหนียวของ PLA ด้วยกระบวนการผสมกับ Polycaprolactone-based polyurethane (PCLU) ซึ่ง PCLU เกิดจาก Polycaprolactone-triol (PCL-polyols) ผสมกับ Isophorone diisocyanate (IPDI) โดยนำเม็ดพลาสติก PLA และ PCL-polyols ที่อัตราส่วน 95/5, 90/10, 85/15, และ 80/20 โดยน้ำหนัก โดยทำการผสมกันในเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ประมาณ 5 นาที แล้วเติม IPDI ลงไปผสม 10 นาทีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding process) แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าอัตราส่วนระหว่าง PLA/PCL-polyols เป็น 85/15 มีค่าการยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) และค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เพิ่มขึ้น เนื่องจาก PCLU มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอใน PLA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) Ingeo™ Biopolymer เกรด 3052D จากบริษัท เนเจอร์เวิร์คส์ จำกัด
2. เอทิลีนเอทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (Ethylene ethyl acrylate copolymer, EEA) AMPLIEY™ เกรด EA101 ของบริษัท ดาว เคมิคอล จำกัด
3. 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyl triethoxysilane, APTES) 99% ของบริษัท อีตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ PLA

สมบัติ	PLA (3052D)	หน่วย
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	1.24	-
ดรรชนีการไหล (210°C/2.16kg)	14	g/10 min
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature)	55-60	°C
อุณหภูมิการหลอมผลึก (Melting temperature)	145-160	°C
อุณหภูมิเสียรูปทางความร้อน (Heat distortion temperature)	55	°C
ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile yield strength)	62	MPa
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break)	3.5	%
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)	16	J/m
ความแข็งแรงโค้งงอ (Flexural strength)	108	MPa
มอดุลัสโค้งงอ (Flexural modulus)	3600	MPa

(ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต)

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ EEA

สมบัติ	EEA (EA101)	หน่วย
หมู่แทนที่/ปริมาณในโคพอลิเมอร์	EA /18.5	%wt
ดรรชนีการไหล (190°C /2.16kg)	6.0	g/10 min
ความหนาแน่น (Density)	0.931	g/cm ³
อุณหภูมิการหลอมผลึก (Melting temperature)	97.8	°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ควรค่าแก่การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่สามารถแก้ไขเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ EEA (ต่อ)

สมบัติ	EEA (EA101)	หน่วย
อุณหภูมิที่จุดเปราะ (Brittleness temperature)	-76.1	°C
ความแข็งแรงกระแทก (Impact strength)	672	kJ/m^2

(ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต)

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ APTES

สมบัติ	APTES	หน่วย
ลักษณะ	ของเหลว	-
สี	ใสไม่มีสี	-
ความหนาแน่น	0.946	g/cm^3
จุดเดือด (Boiling point)	217	°C

(ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer, รุ่น MX500-D75L90; Chareon Tut Co., Ltd.)
2. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder, รุ่น Bosco A600; Bosco Engineering Co., Ltd.)
3. เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding machine, รุ่น TTI-200/80; บริษัท
ประทานกิจถาวร จำกัด)
4. เครื่องทดสอบอัตราการไหล (Melt flow indexer, รุ่น CEAST 6841; Instron Co.,
Ltd)
5. เครื่องบดชิ้นงาน (Ceast, รุ่น 7686; Yasuda Seiki Seisakusho Co., Ltd)
6. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM, รุ่น LR-5K; Lloyd
Instruments Ltd.)
7. เครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Impact tester, รุ่น QC-639S; Cometech Testing
Machines Co., Ltd.)
8. ตู้อบลมร้อน (Oven, รุ่น 7200 Tuttlingen/Germany; WTC binder Co., Ltd.)
9. เครื่องปั๊มลม (Air compressor, รุ่น BEBICON 400; Hitachi Co., Ltd.)
10. บริษัทเครื่องแก้ว
11. ค้อน
12. ถาดอลูมิเนียม
13. เวอร์เนีย
14. คีม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การเตรียมชิ้นงาน

3.3.1 การเตรียมชิ้นงาน PLA/EEA

การเตรียมชิ้นงาน PLA/EEA เพื่อศึกษาผลของปริมาณ EEA (%โดยน้ำหนัก) โดยทำการอบ PLA และ EEA ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นชั่ง PLA และ EEA ให้ได้สัดส่วนตามตารางที่ 3.4 ทำการผสมกันด้วยเครื่องผสมแบบปิด โดยตั้งสภาวะของเครื่องดังนี้

ปริมาณสารรวม	400 g
อุณหภูมิ	155°C
ความเร็วรอบ	100 rpm
เวลาในการผสม	10 min

นำ PLA/EEA ที่ผสมกัน ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำมาบดให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยใช้เครื่องบดพลาสติก เพื่อเตรียมสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปต่อไป

3.3.2 การเตรียมชิ้นงาน PLA/EEA/APTES

การเตรียมชิ้นงาน PLA/EEA/APTES โดยทำการอบ PLA และ EEA ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นชั่ง PLA และ EEA ให้ได้สัดส่วนตามตารางที่ 3.5 ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด โดยตั้งสภาวะของเครื่องเช่นเดียวกับการผสมดังข้อ 3.3.1 เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที จึงเติม APTES ในปริมาณตามตารางที่ 3.5 แล้วผสมต่ออีก 3 นาที จากนั้นนำมาบดให้เป็นชิ้นเล็กละเอียด เพื่อเตรียมสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปต่อไป

ตารางที่ 3.4 สูตรพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA

สูตร	ปริมาณสาร (%โดยน้ำหนัก)	
	PLA	EEA
P100	100	-
P90E10	90	10
P85E15	85	15
P80E20	80	20
P75E25	75	25

หมายเหตุ P แทนพอลิแลคติกแอซิด (PLA)

E แทนเอทิลีนเอทิลอะคริเลต (EEA)

ตารางที่ 3.5 สูตรพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES

สูตร	ปริมาณสาร (%โดยน้ำหนัก)		ปริมาตร APTES (mL)
	PLA	EEA	
P80E20A0.5	80	20	0.42
P80E20A1.0	80	20	0.85
P80E20A1.5	80	20	1.27
P80E20A2.0	80	20	1.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับสำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
 ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำเอกสารนี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หมายเหตุ P แทน พอลิแลคติกแอซิด (PLA)
 E แทน เอทิลีนเอทิลอะคริเลต (EEA)
 A แทน 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (APTES)

3.4 การฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน

นำ PLA/EEA และ PLA/EEA/APTES ที่เตรียมจาก 3.3.1 และ 3.3.2 ตามลำดับ ที่ผ่านการบดมาขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก โดยใช้สภาวะดังนี้

- ความดัน (Pressure)

ชั้นที่ 1	10 bar
ชั้นที่ 2	10 bar
ชั้นที่ 3	10 bar
ชั้นที่ 4	10 bar
- อุณหภูมิของกระบอกใส่สกรู (Barrel temperature)

บริเวณท้าย	160°C
บริเวณกลาง	170°C
บริเวณหัวฉีด	180°C
- อุณหภูมิน้ำในการหล่อเย็น (Cooling temperature) 15-20°C
- เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time) 30 s

3.5 การทดสอบอัตราการหลอมไหลของ PLA/EEA และ PLA/EEA/APTES

การหาค่าอัตราการหลอมไหลด้วยเครื่องทดสอบอัตราการหลอมไหล (Melt flow indexer) ตามมาตรฐาน ASTM D1238 [25] ซึ่งกำหนดสภาวะในการทดสอบดังนี้

อุณหภูมิ (Temperature)	210°C
น้ำหนักกด (Total load)	2.16 kg

ค่าอัตราการหลอมไหล สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{อัตราการหลอมไหล (กรัม/10นาที)} = \frac{600}{t} \times W \quad (3.1)$$

- เมื่อ t คือ เวลาที่ใช้ตัดพลาสติกที่หลอมไหล (s)
 W คือ ค่าน้ำหนักเฉลี่ยของพลาสติกหลอมไหล (g)

3.6 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ PLA/EEA และ PLA/EEA/APTES

ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของชิ้นงาน โดยใช้เครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทร-โฟโตมิเตอร์ (Fourier-transform infrared spectrophotometer, FTIR) แบบ ATR-FTIR ในช่วงเลขคลื่น 700 cm⁻¹ ถึง 4000 cm⁻¹

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การศึกษาสัณฐานวิทยา

3.7.1 ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA

นำชิ้นงานฉีดขึ้นรูปของ PLA/EEA ไปแช่ในโตรเจนเหลวเป็นเวลา 10 นาที หักชิ้นงานในขณะที่ยังเย็น จากนั้นนำมาอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เคลือบด้วยทองคำ แล้วส่องพื้นผิวภาคตัดขวางของชิ้นงานด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1000 และ 5000 เท่า

3.7.2 ศึกษาสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของ APTES ในพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES

นำชิ้นงานฉีดขึ้นรูปของ PLA/EEA/APTES ไปแช่ในโตรเจนเหลวเป็นเวลา 10 นาที หักชิ้นงานในขณะที่ยังเย็น จากนั้นนำมาอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เคลือบด้วยทองคำ แล้วส่องพื้นผิวภาคตัดขวางของชิ้นงานด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1000 และ 5000 เท่า และศึกษาการกระจายตัวของ APTES ด้วยเทคนิค SEM-EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

3.8 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

ทำการตรวจสอบอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และปริมาณผลึกของ PLA ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) นำพลังงานความร้อนในการหลอมผลึก (Heat of fusion, ΔH_f) ที่ได้มาคำนวณหาค่าร้อยละความเป็นผลึกตามมาตรฐาน ASTM E794 [26] สามารถทำได้จากสมการดังนี้

$$\Delta H_f \text{ (J/g)} = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟ (mJ)}}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (mg)}} \quad (3.2)$$

$$\text{ร้อยละความเป็นผลึก} = \frac{\Delta H_f \times 100}{\Delta H_f^\circ} \times \frac{100}{\% \text{ โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่มีผลึก}} \quad (3.3)$$

เมื่อ ΔH_f คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึก

ΔH_f° คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PLA ที่มีความเป็นผลึก 100% มีค่า 93.7 J/g [27] และ EEA (ใช้ค่าของ PE) ที่มีค่าเท่ากับ 293 J/g [28]

3.9 การทดสอบสมบัติรับแรงดึง

ทำการทดสอบการรับแรงดึงเพื่อหาความเค้นสูงสุด (Stress at maximum) ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ตามมาตรฐาน ASTM D638 [29] โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ซึ่งกำหนดสภาวะในการทดสอบดังนี้

โหลดเซลล์ (Load cell)	5 kN
ความเร็วในการดึง (Test speed)	10 mm/min

ระยะในการจับชิ้นงาน (Gauge length) 30 mm ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความเค้นสูงสุด ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสของยัง สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Stress at maximum} = \frac{F_{\text{at max}}}{A} \quad (3.4)$$

$$\% \text{ Elongation at break} = \left(\frac{L_{\text{at break}} - L_0}{L_0} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

$$\text{Young's modulus} = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} \quad (3.6)$$

- เมื่อ $F_{\text{at max}}$ คือ แรงดึงยึดชิ้นงาน ณ จุดสูงสุด (N)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดตอนเริ่มต้นของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)
 $L_{\text{at break}}$ คือ ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังดึงชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด (mm)
 L_0 คือ ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานก่อนดึงชิ้นงานตัวอย่าง (Gauge length) เท่ากับ 30 mm

หมายเหตุ ค่ามอดุลัสของยังคำนวณจากความชันเริ่มต้นที่ร้อยละการยืด 3 ถึง 5

3.10 การทดสอบความแข็งแรงกระแทก

การหาค่าความแข็งแรงกระแทกด้วยเครื่องวัดความแข็งแรงกระแทก (Impact tester) โดยทดสอบแบบไอซอด (Izod) ตามมาตรฐาน ASTM D256 [30] ใช้ชิ้นงานที่มีรอยบาก (Notch) ลึก 2.54 mm ด้วยเครื่องบากชิ้นงาน ค่าความแข็งแรงกระแทกหาได้จากสมการดังนี้

$$\text{ความแข็งแรงกระแทก (IS)} = \frac{W}{A} \quad (3.7)$$

- เมื่อ IS คือ ความแข็งแรงกระแทก (kJ/m^2)
 W คือ ค่าพลังงานการกระแทก (kJ)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (m^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

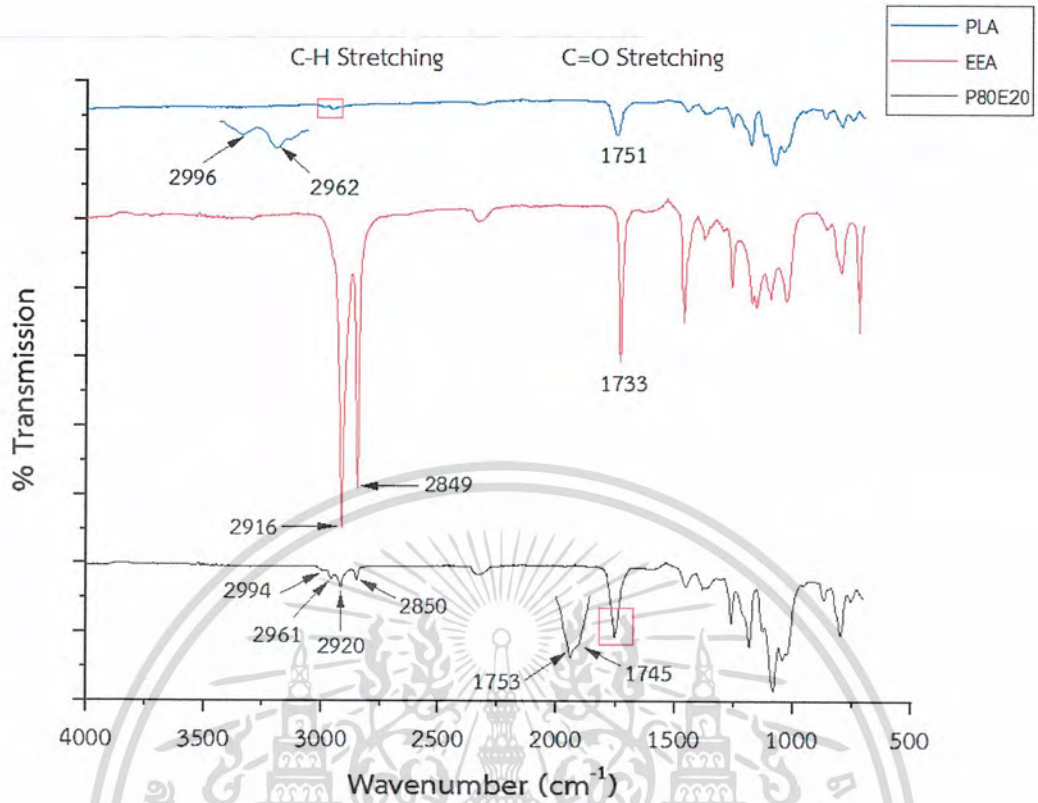
งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมพอลิเมอร์ผสมของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพอลิเอทิลีนเอทิลอะคริเลต (EEA) โดยใช้ APTES เป็นสารคู่ควบ เพื่อให้ PLA มีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น โดยทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของ PLA/EEA ที่ร้อยละ 90/10, 85/15, 80/20 และ 75/25 โดยน้ำหนัก และนำสูตรที่มีอัตราส่วน PLA/EEA ร้อยละ 80/20 โดยน้ำหนัก ไปศึกษาผลของปริมาณ APTES ที่ร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักของ PLA ชิ้นงานถูกตรวจสอบอัตราการหลอมไหล ลักษณะโครงสร้างทางเคมี สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกล

4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนของ PLA/EEA

4.1.1 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมี

รูปที่ 4.1 แสดงผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของ PLA, EEA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA โดยใช้เทคนิค ATR-FTIR พบสเปกตรัมของหมู่ C=O Stretching ของ PLA ที่เลขคลื่น 1751 cm^{-1} และ C=O Stretching ของ EEA ที่เลขคลื่น 1733 cm^{-1} เมื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสม พบพีค C=O Stretching ที่เลขคลื่น 1753 และ 1745 cm^{-1} ซึ่งเป็นเลขคลื่นของ PLA และ EEA ที่เปลี่ยนไป เนื่องจากอาจเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ C=O Stretching ของ PLA และ EEA อีกทั้งยังพบสเปกตรัมที่ 2994 , 2961 , 2920 และ 2850 cm^{-1} ของหมู่ C-H Stretching ใน PLA และ EEA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

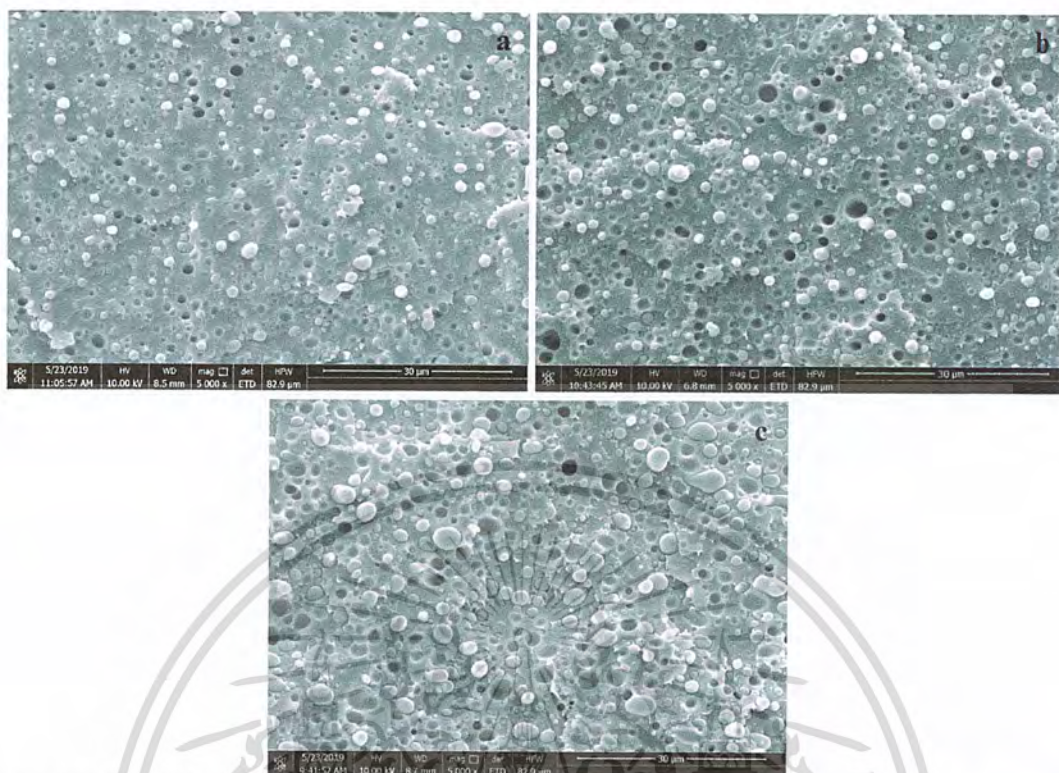


รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PLA, EEA และพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA

4.1.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา

เมื่อนำชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA มาศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่าที่ กำลังขยาย 1000 เท่า (ภาคผนวก ข.1) ไม่พบความแตกต่างของพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ ในขณะเดียวกันที่ กำลังขยาย 5000 เท่า (รูปที่ 4.2) พบว่าวิภาคของ EEA มีลักษณะเป็นทรงกลม กระจายตัวอยู่ในวิภาคของ PLA ซึ่งเป็นวิภาคหลัก แสดงให้เห็นว่า PLA และ EEA เป็นพอลิเมอร์ ผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ EEA ทำให้ขนาดวิภาค ของ EEA ใหญ่ขึ้น ซึ่งเป็นผลที่พบได้โดยทั่วไปของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากัน [31] และจากรูปมี ช่องว่างในวิภาคของ PLA จำนวนมาก เนื่องจาก PLA และ EEA มีแรงยึดติด (Adhesion) ระหว่างวิภาคต่ำ จึงทำให้วิภาคของ EEA หลุดออกจากวิภาค PLA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA ที่อัตราส่วน (a) P90E10, (b) P85E15 และ (c) P80E20

4.1.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

เมื่อนำชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA มาตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 25 ถึง 200°C (ภาคผนวก ค) เมื่อพิจารณาสมบัติทางความร้อนของ PLA จากตารางที่ 4.1 พบว่า ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วครั้งที่ 1 และ 2 (T_{g1} และ T_{g2}) แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็นครั้งที่ 1 (T_{cc1}) ของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA มีค่าไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับสูตร P100 ค่าร้อยละความเป็นผลึกครั้งที่ 1 (χ_{c1}) ของสูตร P100 และพอลิเมอร์ผสมอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันที่ร้อยละ 20-27 แต่เมื่อสังเกตพีคของอุณหภูมิในการหลอมเหลวผลึกครั้งที่ 1 (T_{m1}) พบว่าพีค T_{m1} แยกออกเป็น 2 พีค ดังรูปที่ 4.3 แสดงถึงโครงสร้างผลึกของ PLA ที่มีการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบ คือ α' -form (149°C) และ α -form (155°C) [32] โดยโครงสร้างผลึกแบบ α มีความเสถียรมากกว่าดูได้จากตำแหน่งของพีค T_{m1} ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าพีคของผลึกแบบ α' [33] เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2 พบว่าอุณหภูมิในการเกิดผลึกเย็นครั้งที่ 2 (T_{cc2}) มีค่าสูงขึ้นเนื่องจาก EEA ในพอลิเมอร์ผสมทำให้สายโซ่ของ PLA เคลื่อนที่ให้เกิดผลึกยากขึ้นและส่งผลให้ร้อยละความเป็นผลึกของ PLA ครั้งที่ 2 (χ_{c2}) มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอุณหภูมิในการหลอมเหลวผลึกครั้งที่ 2 (T_{m2}) ของพอลิเมอร์ผสม พบว่าปรากฏพีคของ T_{m2} เพียง 1 พีค ในขณะที่สูตร P100 ปรากฏพีคของ T_{m2} 2 พีค (รูปที่ 4.4) แสดงให้เห็นว่า EEA ส่งผลต่อความเสถียรในการเกิดผลึกของ PLA เมื่อพิจารณาสมบัติทางความร้อนของ EEA จากตารางเอกสารอ้างอิงค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 4.2 พบว่า ไม่ปรากฏค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวผลึกครั้งที่ 1 (T_{m1}) ของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจาก EEA เป็นวัฏภาคกระจาย ปริมาณที่ใสมีปริมาณน้อย และการหล่อเย็น (Cooling time) ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป (30 วินาที) อาจเร็วกว่าการเกิดผลึกของ EEA จึงทำให้สายโซ่ของ EEA ไม่สามารถเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกในชิ้นงานได้ เมื่อทำการหล่อเย็นด้วยเครื่อง DSC พบว่า EEA ในทุกสูตรจัดเรียงตัวเป็นผลึกที่อุณหภูมิเดียวกันที่ 81°C (T_{c1} และ T_{c2}) ยกเว้นสูตร P90E10 ที่มีปริมาณ EEA ในปริมาณน้อย ร้อยละความเป็นผลึกครั้งที่ 2 (χ_{c2}) ที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันในทุกสูตร และผลึกถูกหลอมที่อุณหภูมิใกล้เคียงกันที่ $99-100^{\circ}\text{C}$ แสดงให้เห็นว่า PLA ไม่มีผลต่อปริมาณ ขนาด และอุณหภูมิในการเกิดผลึกของ EEA

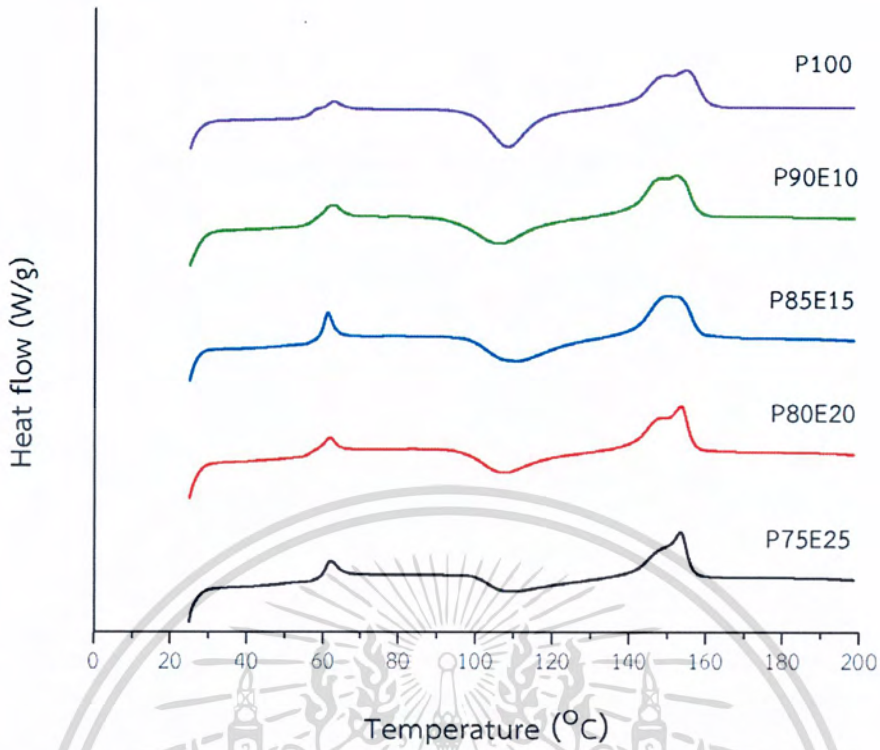
ตารางที่ 4.1 T_g , T_{cc} , T_m และร้อยละความเป็นผลึกของ PLA ในพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA

สูตร	T_{g1} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{cc1} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{m1} ($^{\circ}\text{C}$)	χ_{c1} (%)	T_{g2} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{cc2} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{m2} ($^{\circ}\text{C}$)	χ_{c2} (%)
P100	55	108	149, 155	25	52	109	146, 154	26
P90E10	53	106	148, 153	20	52	120	150	21
P85E15	54	110	150	23	52	126	150	20
P80E20	53	107	148, 154	22	52	124	150	18
P75E25	54	108	148, 154	27	52	127	151	10

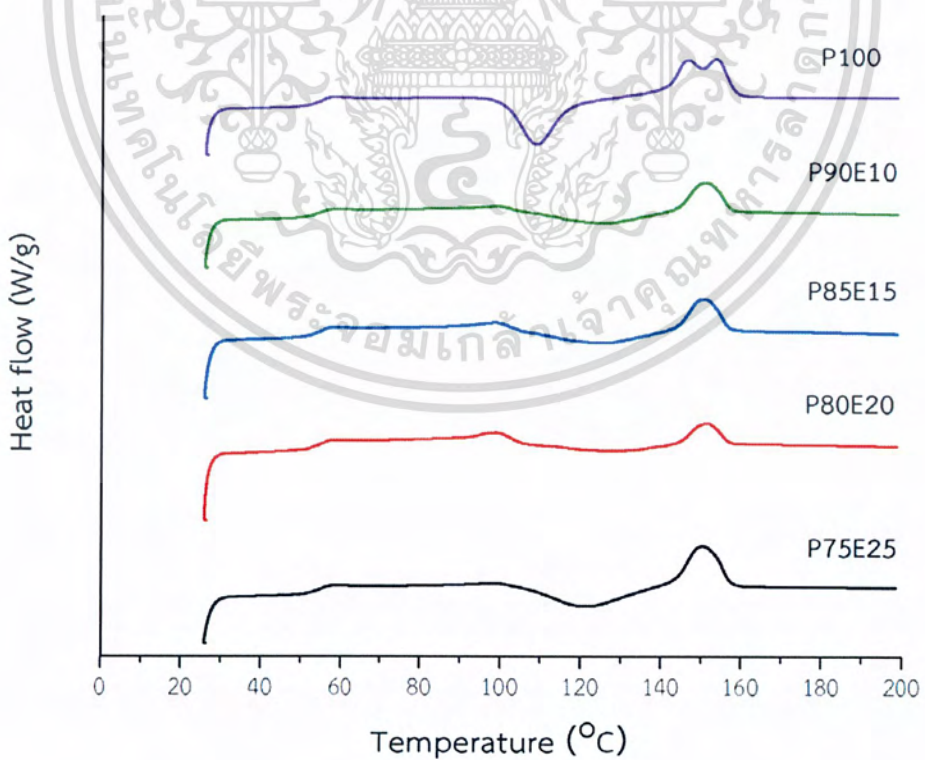
ตารางที่ 4.2 T_c , T_m และร้อยละความเป็นผลึกของของ EEA ในพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA

สูตร	T_{c1} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{m1} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{c2} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{m2} ($^{\circ}\text{C}$)	χ_{c2} (%)
E100	81	102	81	100	4
P90E10	-	-	-	99	6
P85E15	81	-	81	100	4
P80E20	81	-	81	99	2
P75E25	81	-	81	99	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของสูตร P100 และพอลิเมอร์ผสม

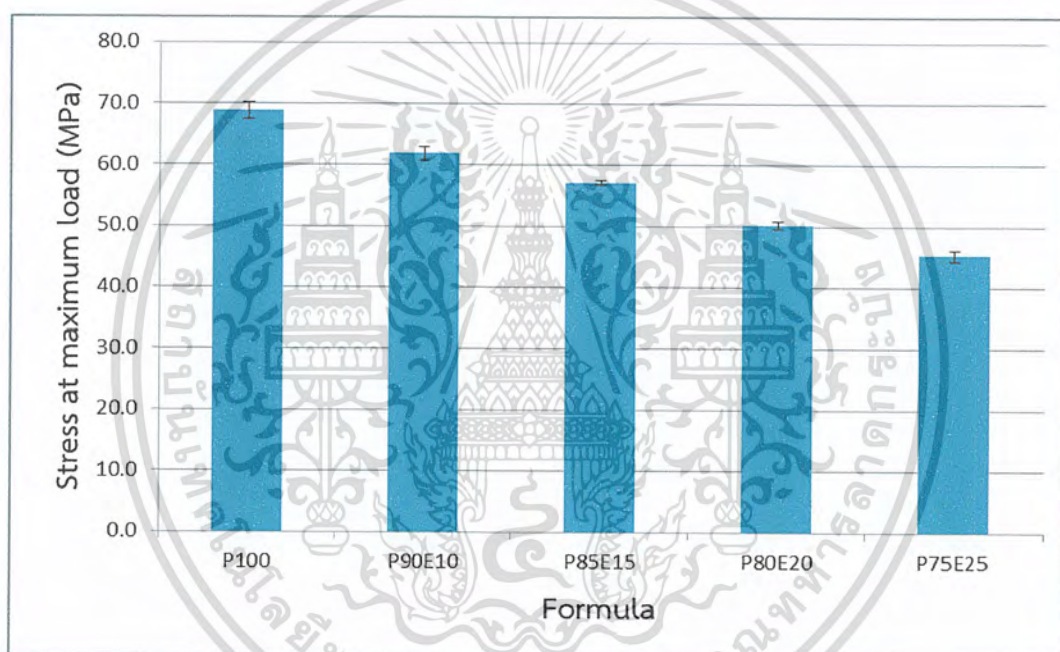


รูปที่ 4.4 การให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของสูตร P100 และพอลิเมอร์ผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการค้าของสถาบันฯ เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

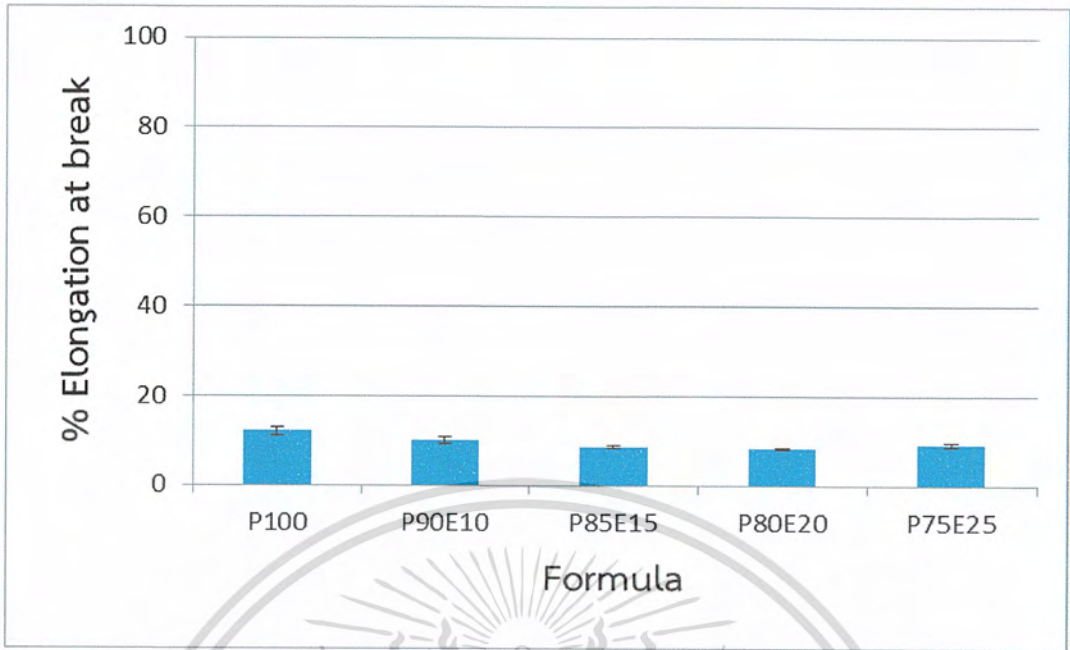
4.1.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

รูปที่ 4.5-4.8 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ EEA ซึ่งเป็นส่วนที่นิ่ม (Softness) และให้ความยืดหยุ่น (Flexibility) ทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.8 เนื่องจากสายโซ่ของพอลิเมอร์ผสมสามารถรับแรงกระแทกได้มากขึ้น ในขณะที่เดียวกัน การเพิ่มปริมาณของ EEA ทำให้ให้ปริมาณของ PLA ซึ่งเป็นส่วนที่ให้ความแข็งมีปริมาณลดลง และปริมาณผลึกของ PLA ที่ได้จากการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนมีปริมาณลดลง ส่งผลให้ค่าความเค้นสูงสุดและค่ามอดุลัสของยังมีแนวโน้มลดลง (รูปที่ 4.5 และ 4.7) แต่อย่างไรก็ตาม ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งอยู่ในช่วง 8-12% ดังรูปที่ 4.6 เป็นผลจากความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ผสมซึ่งสอดคล้องกับผลของสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.2) ที่พบช่องว่างของ EEA ในวัฏภาคของ PLA จำนวนมาก แสดงให้เห็นถึงแรงยึดติดระหว่างวัฏภาคของ PLA และ EEA ที่ต่ำ

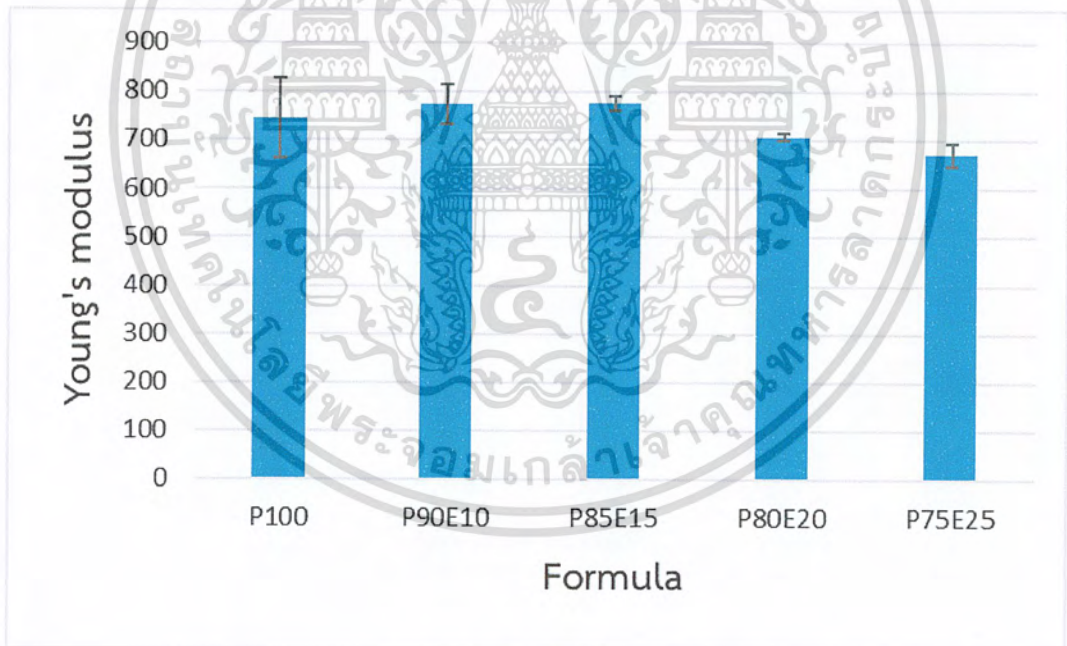


รูปที่ 4.5 ค่าความเค้นสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

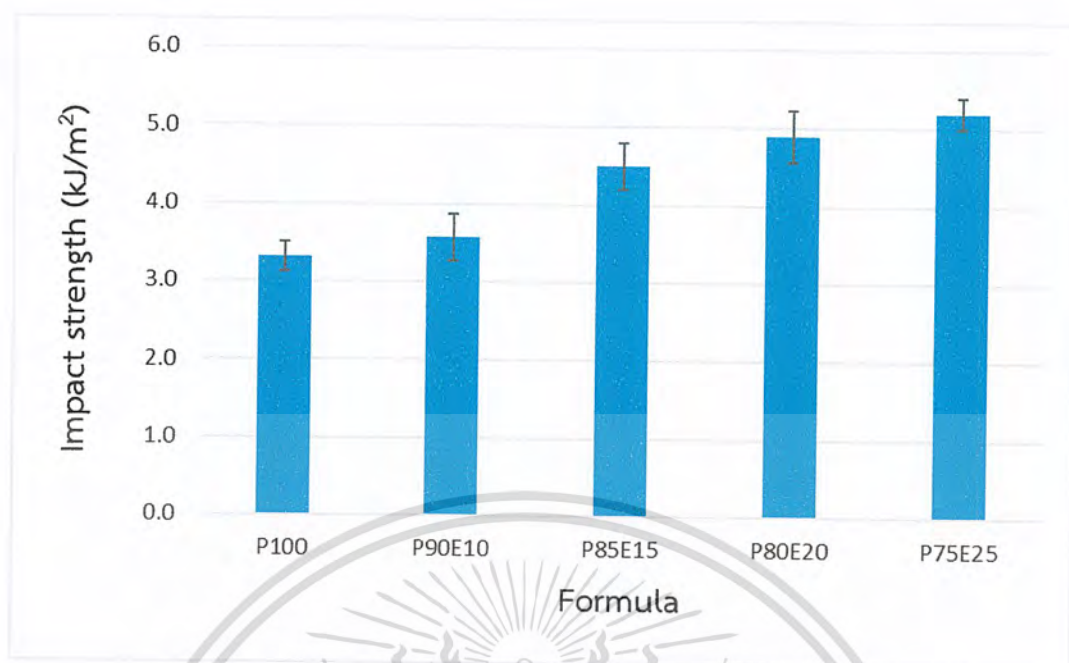


รูปที่ 4.6 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA



รูปที่ 4.7 ค่ามอดุลัสของยังของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA

4.2 การศึกษาผลของปริมาณ APTES

จากผลการศึกษาพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า EEA สามารถเพิ่มความแข็งแรงกระแทกให้กับพอลิเมอร์ผสมได้ แต่พอลิเมอร์ผสมยังมีความเปราะ เนื่องจากค่าร้อยละการยึดฉนวน จุดขาดไม่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเลือกพอลิเมอร์ผสมสูตร P80E20 ที่ปริมาณ EEA ที่เหมาะสม มีค่าความแข็งแรงกระแทกสูงและสามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ง่ายกว่าพอลิเมอร์ผสมสูตร P75E25 มาศึกษาปริมาณของ APTES ที่ร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักของ PLA

4.2.1 การศึกษาอัตราการหลอมไหล

การศึกษ้อัตราการหลอมไหลของพอลิเมอร์ด้วยเครื่อง Melt flow indexer จากตารางที่ 4.3 พบว่าพอลิเมอร์ผสมสูตร P80E20 มีค่าอัตราการหลอมไหล 21 กรัม/10นาที แต่เมื่อใส่ APTES ทำให้อัตราการหลอมไหลเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมสูตร P80E20 เนื่องจากการใส่ APTES ทำให้ PLA เกิดปฏิกิริยาการตัดสายโซ่ ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ผสมสั้นลง ส่งผลให้เมื่อเติม APTES มากขึ้น อัตราการหลอมไหลจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

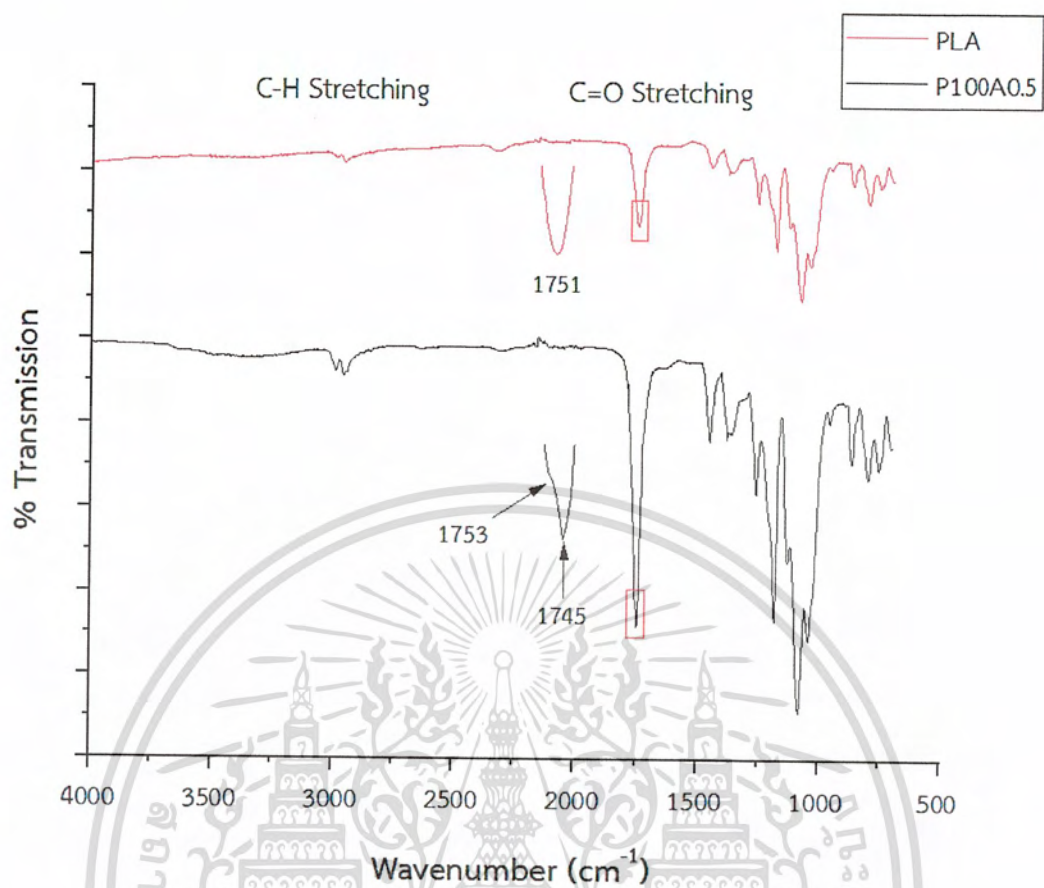
ตารางที่ 4.3 อัตราการหลอมไหลของ PLA, PLA/EEA และ PLA/EEA/APTES

สูตร	อัตราการหลอมไหล (210°C/2.16kg) (กรัม/10นาที)
P80E20	21
P80E20A0.5	36
P80E20A1.0	43
P80E20A1.5	49
P80E20A2.0	73

4.2.2 การศึกษาลักษณะโครงสร้างทางเคมี

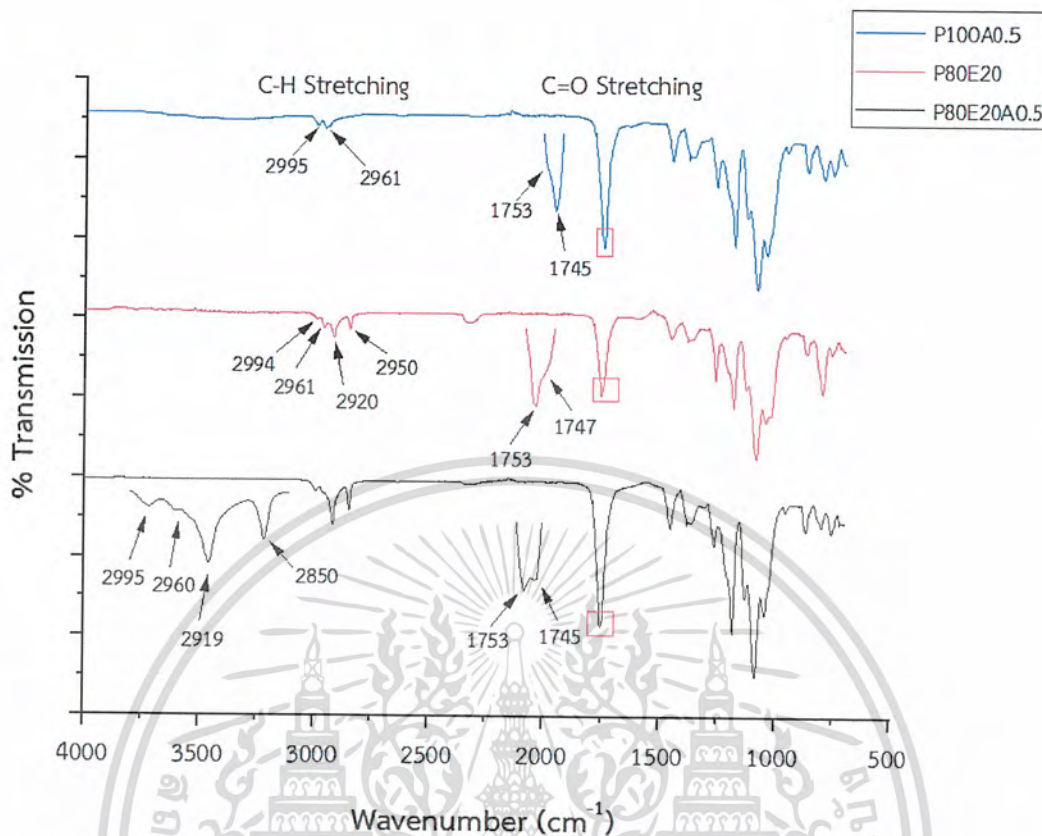
การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิค ATR-FTIR พบว่าจากรูป 4.9 หมู่ C=O Stretching ของ PLA ปรากฏที่เลขคลื่น 1751 cm^{-1} แต่เมื่อผสมกับ APTES พบว่าที่ปลายสเปกตรัมของหมู่ C=O Stretching มี 2 พีค ที่เลขคลื่น 1753 และ 1745 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าเลขคลื่นหมู่ C=O ของ PLA ซ้อนทับกับ APTES โดยที่เลขคลื่น 1745 cm^{-1} มีความเข้ม (Intensity) มากกว่าสเปกตรัมที่เลขคลื่น 1753 cm^{-1} ในขณะเดียวกันจากรูปที่ 4.10 สเปกตรัมของหมู่ C=O Stretching ของพอลิเมอร์ผสมสูตร P80E20 ที่เลขคลื่น 1753 cm^{-1} มีความเข้มมากกว่าสเปกตรัมที่เลขคลื่น 1745 cm^{-1} และเมื่อตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมสูตร P80E20A0.5 พบว่าสเปกตรัมของหมู่ C=O Stretching ที่เลขคลื่น 1753 และ 1745 cm^{-1} มีความเข้มใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามไม่พบสเปกตรัมของ N-H Stretching ที่เลขคลื่น $3360\text{-}3240\text{ cm}^{-1}$ และ N-H Bending ของหมู่อะมิโนใน APTES ที่เลขคลื่น 1630 cm^{-1} [34] เนื่องจากมีการใส่ปริมาณ APTES เพียงร้อยละ 0.5 ถึง 2.0 โดยน้ำหนักของ PLA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PLA และพอลิเมอร์ผสม P100A0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

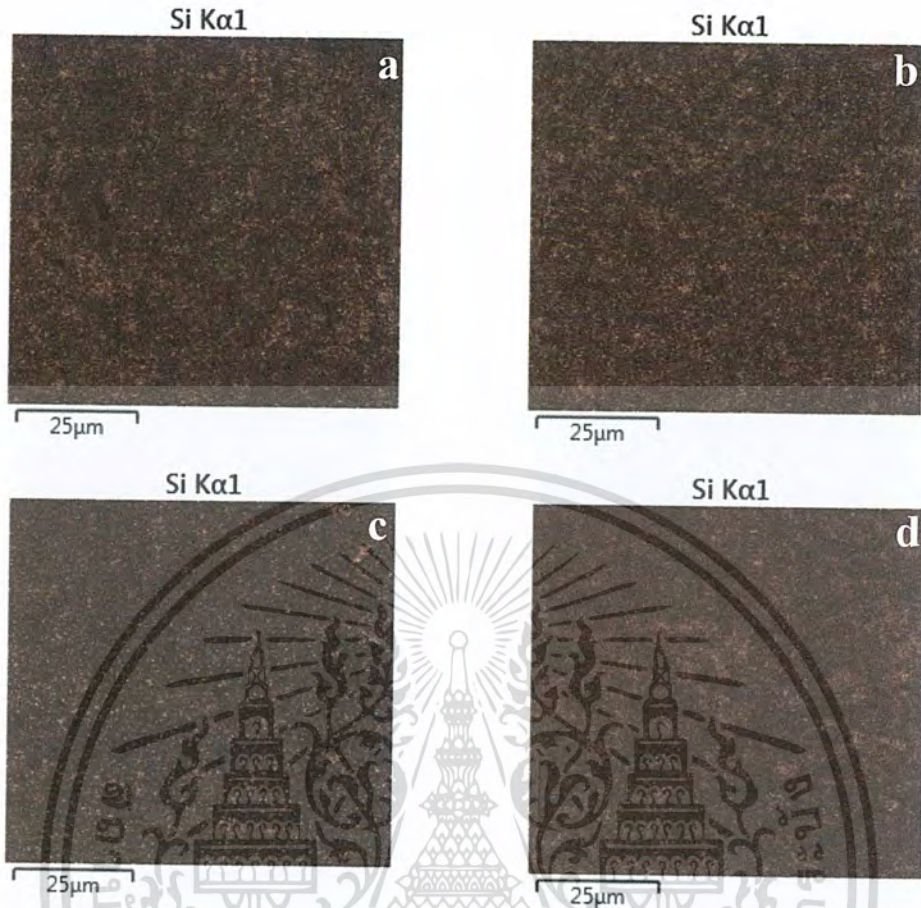


รูปที่ 4.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม P100A0.5, P80E20 และ P80E20A0.5

4.2.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาและการกระจายตัวของ APTES ในพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES

ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1000 และ 5000 เท่า พบว่าไม่เห็นความแตกต่าง ดังรูปในภาคผนวก ข.2 และ ข.3 ตามลำดับ จากนั้นจึงนำพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES มาศึกษาการกระจายตัวของ APTES ด้วยเทคนิค SEM-EDS ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ดังรูปที่ 4.11 พบว่าจุดสีส้มแสดงถึงธาตุซิลิกอน (Si) ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบของ APTES และพื้นผิวสีดำคือวัฏภาคของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA จากรูปสังเกตเห็นได้ว่า APTES กระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากมีทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของ Si ในพอลิเมอร์ผสม (a) P80E20A0.5, (b) P80E20A1.0, (c) P80E20A1.5 และ (d) P80E20A2.0

4.2.4 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

เมื่อนำชิ้นงานพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES มาตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 25 ถึง 250 °C พิจารณาสมบัติทางความร้อนของ PLA จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วครั้งที่ 1 (T_{g1}) และอุณหภูมิการเกิดผลึกเย็นครั้งที่ 1 (T_{cc1}) มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับสูตร P80E20 ร้อยละความเป็นผลึกครั้งที่ 1 (χ_{c1}) ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 19-24 เมื่อพิจารณาพีคของอุณหภูมิในการหลอมเหลวผลึกครั้งที่ 1 (T_{m1}) ดังรูปที่ 4.12 พบว่าพีค T_{m1} ของพอลิเมอร์ผสมที่เติม APTES มีลักษณะเป็น 2 พีค เช่นเดียวกับพอลิเมอร์ผสม P80E20 แสดงให้เห็นว่า PLA ในพอลิเมอร์ผสมที่เติม APTES เกิดผลึกแบบ α และ α' เช่นเดียวกับที่พบในพอลิเมอร์ผสมสูตร P80E20 โดยเมื่อเพิ่มปริมาณ APTES ผลึกของ PLA มีแนวโน้มในการเกิดผลึกแบบ α มากขึ้น แต่ T_{m1} มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณ APTES ทำให้ PLA เกิดผลึกที่มีความเสถียรมากขึ้นแต่ไม่ส่งผลต่อขนาดของผลึก เมื่อให้ความร้อนครั้งที่ 2 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วครั้งที่ 2 (T_{g2}) ของพอลิเมอร์ผสมที่เติม APTES มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมสูตร P80E20 เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่บางส่วนระหว่าง PLA กับ APTES [4] ทำให้สายโซ่ส่วนไม่วากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาใช้

ที่เป็นอสัณฐานเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ในขณะเดียวกัน การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง PLA และ APTES ยังทำให้สายโซ่ของ PLA สั้นลงเห็นได้จากผลของอัตราการหลอมไหล อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็นครั้งที่ 2 (T_{cc2}) จึงมีค่าลดลง และส่งผลให้ร้อยละความเป็นผลึกครั้งที่ 2 (χ_{c2}) ของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณาอุณหภูมิในการหลอมเหลวผลึกครั้งที่ 2 (T_{m2}) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันในทุกสูตรแสดงให้เห็นว่าผลึกมีขนาดใกล้เคียงกัน และพีค T_{m2} มีลักษณะเป็น 1 พีค (รูปที่ 4.13) เป็นผลมาจากการหล่อเย็นของเครื่อง DSC ช้ากว่าการหล่อเย็นในกระบวนการฉีดขึ้นรูป (30 วินาที) ทำให้สายโซ่ของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมสามารถจัดเรียงตัวเป็นผลึกที่มีความสมบูรณ์มากขึ้น เมื่อพิจารณาสมบัติทางความร้อนของ EEA ในพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES จากตารางที่ 4.5 พบว่า ค่าอุณหภูมิในการเกิดผลึกครั้งที่ 1 (T_{c1}) อุณหภูมิในการหลอมเหลวผลึกครั้งที่ 1 และ 2 (T_{m1} และ T_{m2}) และร้อยละความเป็นผลึกมีค่าไม่แตกต่างกันกับพอลิเมอร์ผสมสูตร P80E20 แสดงให้เห็นว่าการใส่ APTES ไม่มีผลต่ออุณหภูมิในการเกิดผลึก ขนาดของผลึกและปริมาณผลึกของ EEA

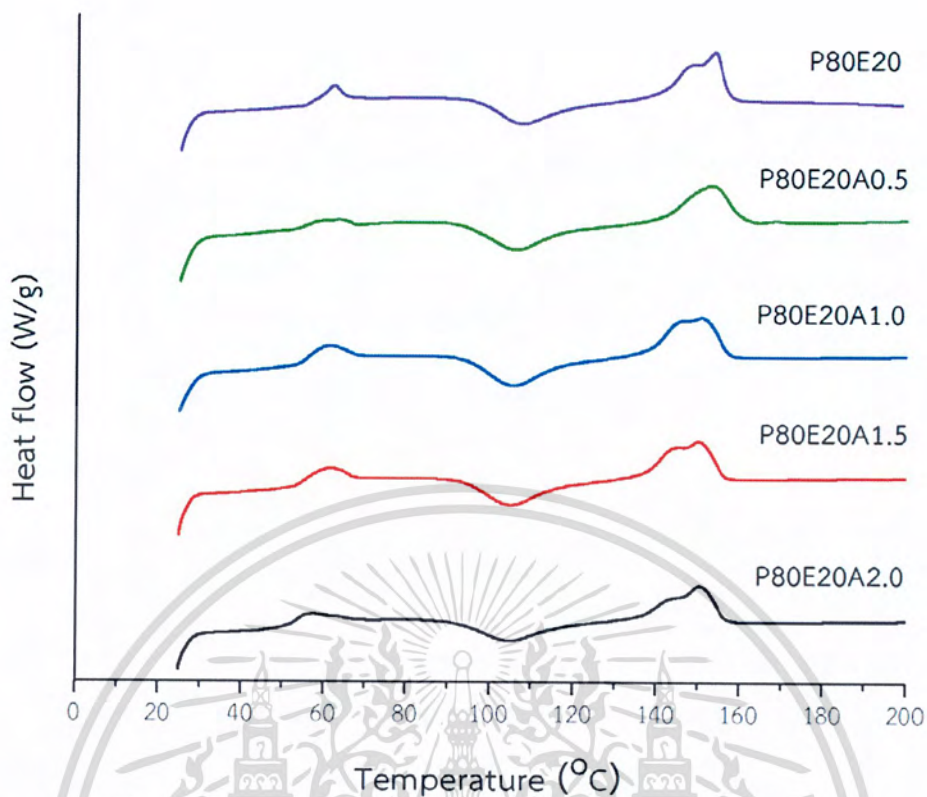
ตารางที่ 4.4 T_g , T_{cc} , T_m และร้อยละความเป็นผลึกของ PLA ในพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES

สูตร	T_{g1} (°C)	T_{cc1} (°C)	T_{m1} (°C)	χ_{c1} (%)	T_{g2} (°C)	T_{cc2} (°C)	T_{m2} (°C)	χ_{c2} (%)
P80E20	53	107	148, 154	23	52	150	150	20
P80E20A0.5	53	106	153	20	59	130	153	10
P80E20A1.0	54	105	147, 150	22	57	129	151	7
P80E20A1.5	54	105	146, 150	19	56	128	150	6
P80E20A2.0	52	105	146, 150	24	56	128	149	4

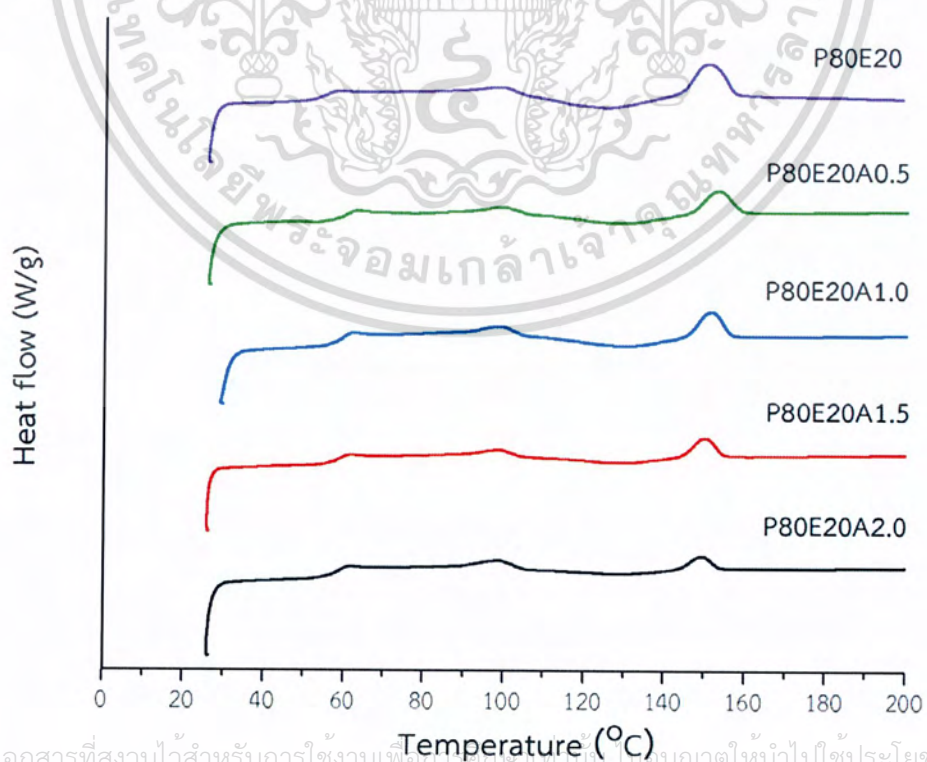
ตารางที่ 4.5 T_c , T_m และร้อยละความเป็นผลึกของ EEA ในพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES

สูตร	T_{c1} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	χ_{c2} (%)
P80E20	81	-	100	4
P80E20A0.5	81	-	100	5
P80E20A1.0	82	-	99	5
P80E20A1.5	82	-	99	4
P80E20A2.0	80	-	99	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 การให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของพอลิเมอร์ผสม P80E20 และ P80E20APTES

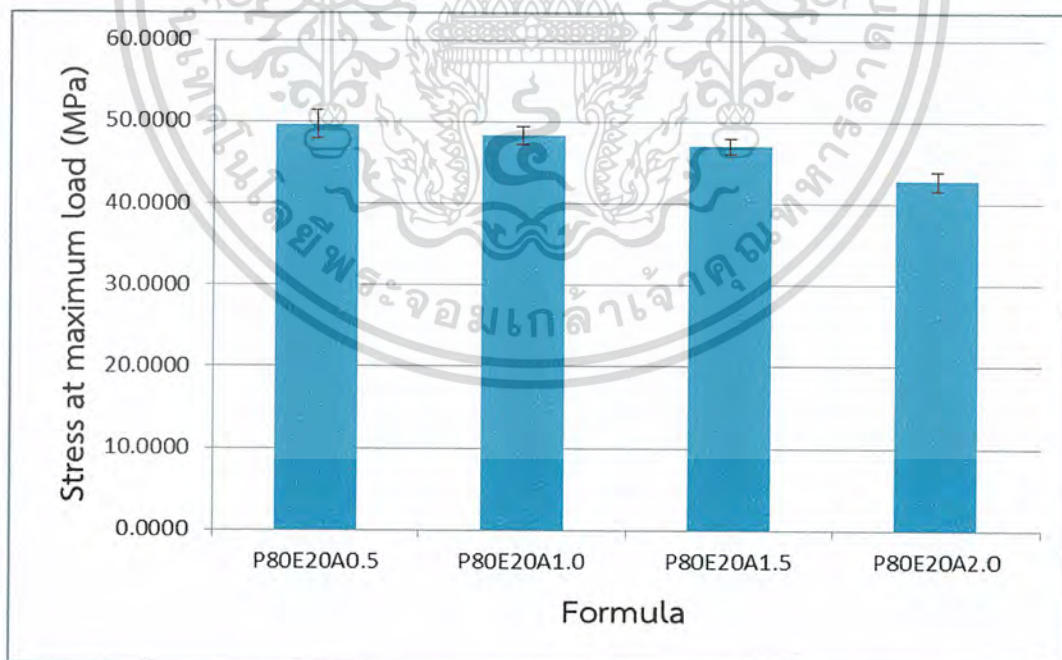


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะลงในเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.13 การให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์ผสม P80E20 และ P80E20APTES

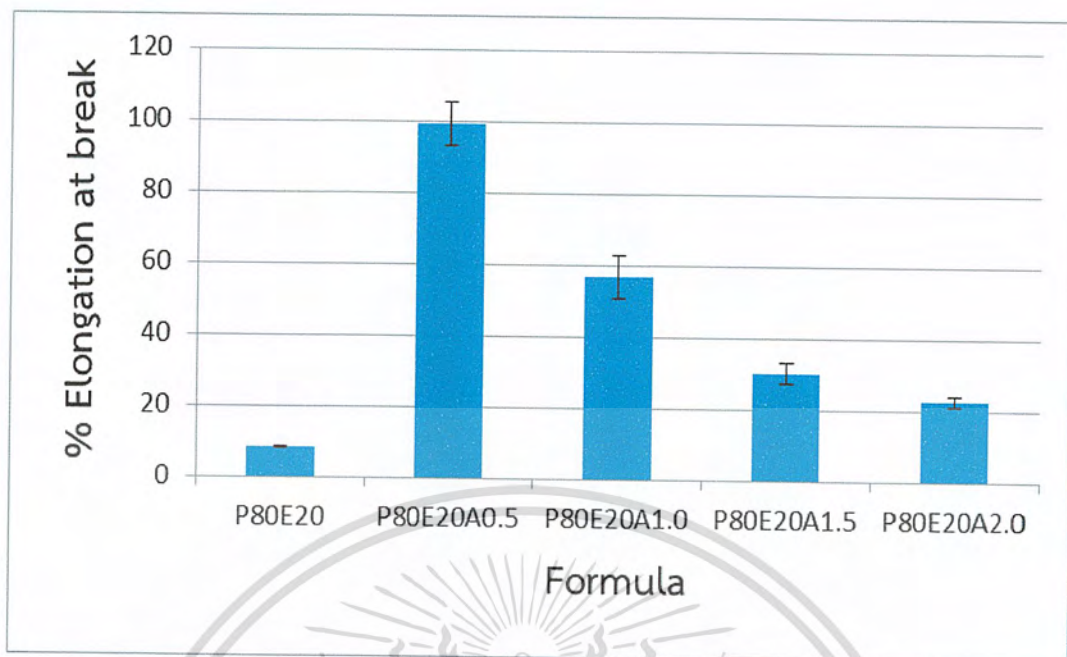
4.2.5 การศึกษาสมบัติเชิงกล

รูปที่ 4.14-4.17 แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES เมื่อเพิ่มปริมาณ APTES ตั้งแต่ร้อยละ 0.5-2.0 โดยน้ำหนักของ PLA พบว่า ค่าความเค้นสูงสุดและค่ามอดูลัสของยังมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมสูตร P80E20 (รูปที่ 4.14 และ 4.16 ตามลำดับ) เนื่องจาก PLA เกิดปฏิกิริยาการตัดสายโซ่โดย APTES ทำให้สายโซ่ของ PLA ซึ่งเป็นวิภาคหลักสั้นลงเห็นได้จากผลของอัตราการหลอมไหล เมื่อพิจารณาความแข็งแรงกระแทกพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ (รูปที่ 4.17) เนื่องจาก EEA ซึ่งเป็นส่วนที่ให้ความยืดหยุ่นมีปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักเท่ากันทุกสูตร แต่ค่าร้อยละการยึด ผน จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมสูตร P80E20A0.5 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 4.15) เป็นผลมาจากการที่ APTES สามารถเกิดปฏิกิริยากับ PLA และ APTES สามารถเกิดปฏิกิริยาควบแน่นกันเอง (Self condensation) ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ผสมยึดได้มากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณของ APTES ตั้งแต่ร้อยละ 1.0 ขึ้นไปพบว่าเกิดการแข่งขันกันของปฏิกิริยาระหว่าง PLA กับ APTES และการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นกันเองของ APTES ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ผสมยึดได้น้อยลง ค่าร้อยละการยึด ผน จุดขาดจึงมีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ผสมที่เติม APTES ที่มีค่าร้อยละการยึด ผน จุดขาดน้อยที่สุดยังมีค่าร้อยละการยึด ผน จุดขาดสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมสูตร P80E20 และเมื่อพิจารณากราฟระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ผสมดังรูปที่ 4.18 พบว่ากราฟของพอลิเมอร์ผสมที่เติม APTES ทุกสูตรมีพื้นที่ใต้กราฟมากกว่าพอลิเมอร์ผสมสูตร P80E20 อย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าการเติม APTES ให้ความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้น

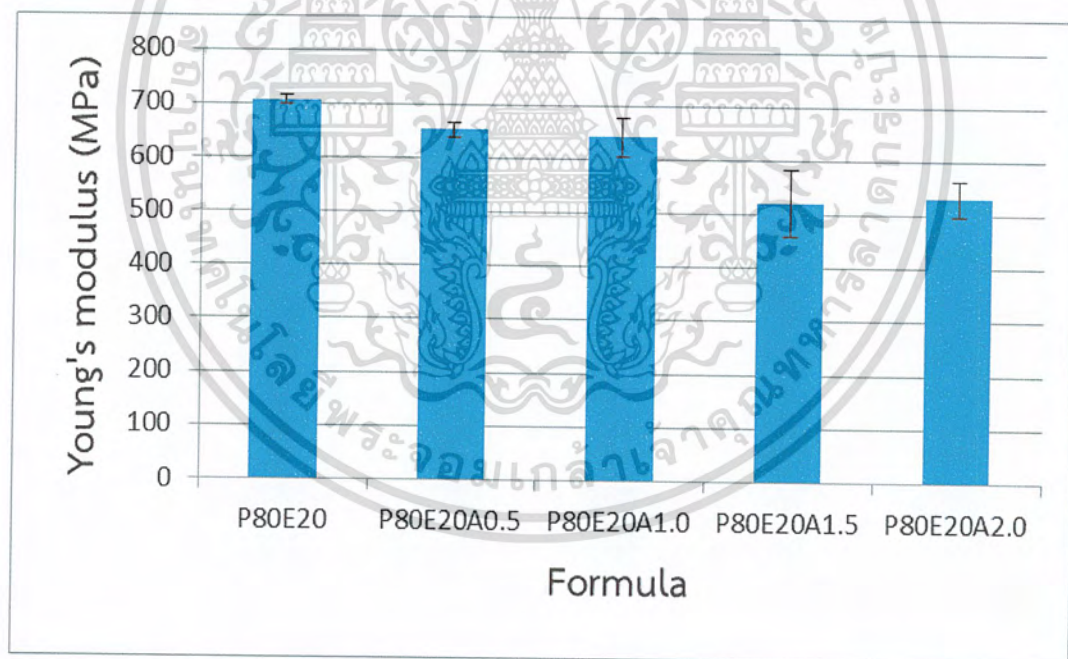


รูปที่ 4.14 ค่าความเค้นสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

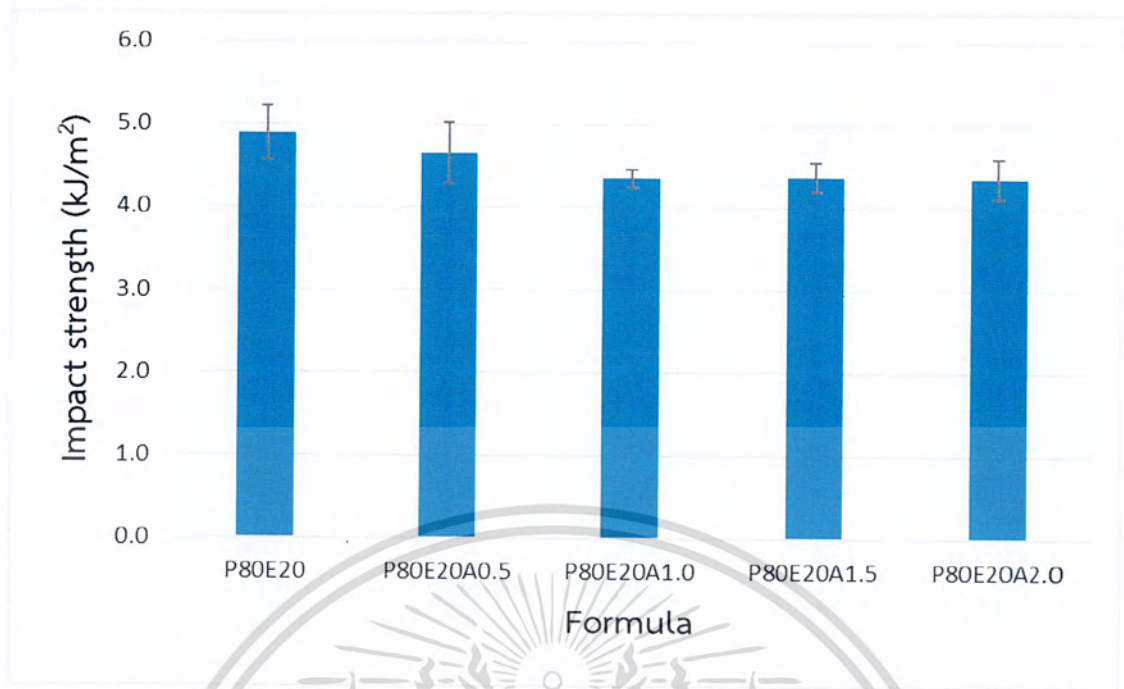


รูปที่ 4.15 ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES

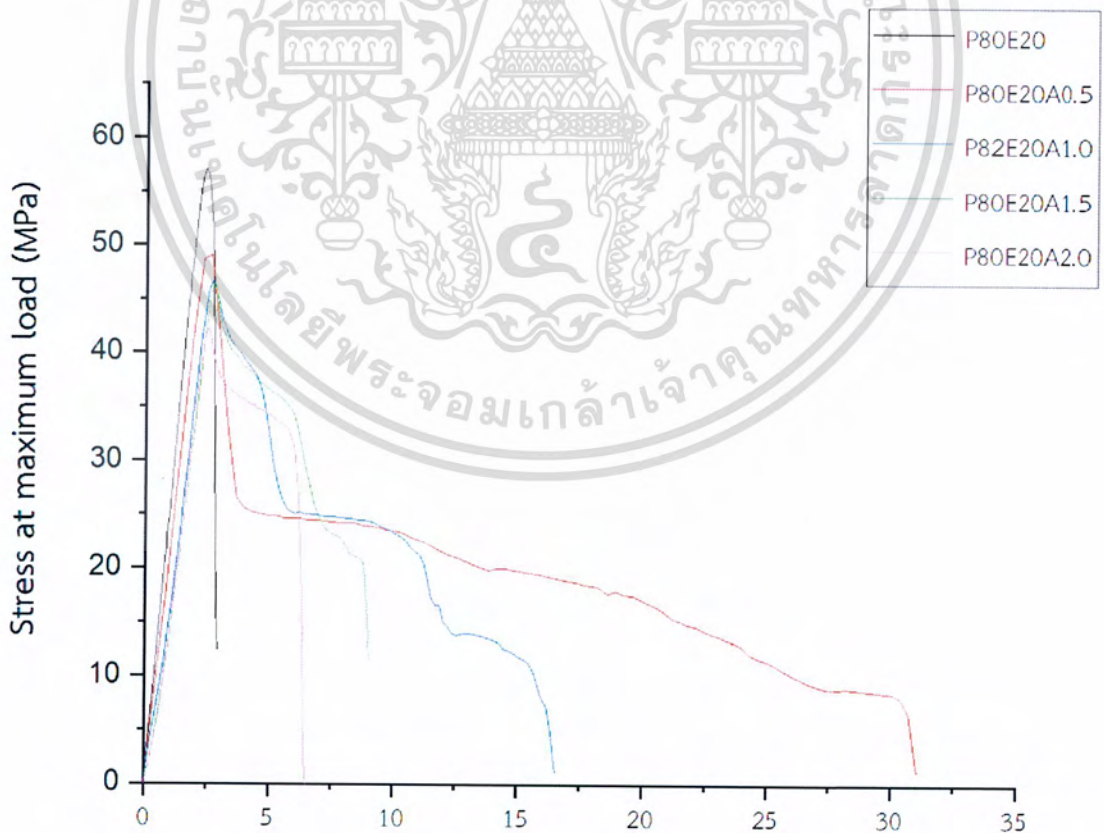


รูปที่ 4.16 ค่ามอดุลัสของยังของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน **Elongation (mm)** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและการยืดตัวของพอลิเมอร์ผสม

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการปรับปรุงสมบัติของ PLA โดยทำการผสม PLA กับ EEA และใช้ APTES เป็นสารคู่ควบ เพื่อปรับปรุงความแข็งแรงกระแทกและเพิ่มความเหนียว โดยศึกษาผลของอัตราส่วนของ PLA/EEA และนำพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA ที่มีอัตราส่วนร้อยละ 80/20 โดยน้ำหนัก ไปศึกษาผลของปริมาณ APTES ที่มีผลต่ออัตราการหลอมไหล ลักษณะโครงสร้างทางเคมี สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกล จากการทดสอบสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA ที่อัตราส่วนร้อยละ 90/10, 85/15, 80/20 และ 75/25 โดยน้ำหนัก พบว่า EEA กระจายตัวเป็นทรงกลมอยู่ในวัฏภาคหลักของ PLA เมื่ออัตราส่วนของ EEA เพิ่มขึ้น ทำให้วัฏภาคกระจายมีขนาดใหญ่ขึ้น และการมีช่องว่างของ EEA ในวัฏภาคของ PLA แสดงให้เห็นว่า PLA และ EEA มีแรงยึดติดระหว่างวัฏภาคต่ำ ทำให้พอลิเมอร์ผสม PLA/EEA เป็นพอลิเมอร์ผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) ของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมแตกต่างกับ PLA อย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่ร้อยละความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง เนื่องจากวัฏภาคของ EEA ทำให้สายโซ่ของ PLA เคลื่อนที่เกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ยากขึ้น ส่งผลให้ค่าความเค้นสูงสุดและค่าร้อยละการยืด ผน จุดขาดมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่เดียวกันเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ EEA ซึ่งเป็นส่วนที่นิ่มและให้ความยืดหยุ่นสูง ทำให้ค่ามอดูลัสของยังมีแนวโน้มลดลง และยังส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้น เนื่องจากสายโซ่ของพอลิเมอร์ผสมสามารถรับแรงกระแทกได้มากขึ้น

จากนั้นเลือกพอลิเมอร์ผสมสูตร P80E20 มาศึกษาผลของปริมาณ APTES ที่ร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักของ PLA พบว่า APTES มีส่วนที่มีขี้และไม่ขี้ จึงทำให้ APTES สามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์ผสม อุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก (T_m) ของ PLA ในพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES มีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญแสดงให้เห็นว่าการใส่ APTES ไม่มีผลต่อขนาดผลึกของ PLA แต่มีผลต่อปริมาณผลึกของ PLA ที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง PLA และ APTES ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์ผสมสั้นลง ดังผลของอัตราการหลอมไหลที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ APTES เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ค่าร้อยละความเป็นผลึก ค่าความเค้นสูงสุด และค่ามอดูลัสของยังมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมสูตร P80E20 ในขณะเดียวกัน APTES สามารถเกิดปฏิกิริยาควบแน่นกันเอง ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และค่าร้อยละการยืด ผน จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงกระแทกไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก EEA ซึ่งเป็นส่วนที่ให้ความยืดหยุ่น มีอัตราส่วนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักเท่ากันทุกสูตร สรุปได้ว่าการเติม EEA และ APTES ทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกและค่าร้อยละการยืด ผน จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า PLA และ EEA เป็นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จึงอาจใส่สารช่วยผสม (Compatibilizer) เพื่อช่วยทำให้พอลิเมอร์ทั้งสองมีความเข้ากันมากยิ่งขึ้น
2. การเติม EEA ทำให้สมบัติรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA ดีขึ้น แต่ EEA เป็นพอลิเมอร์ที่ใช้เวลานานในการย่อยสลาย จึงอาจเลือกพอลิเมอร์อื่นที่มีสมบัตินุ่ม ยืดหยุ่น และย่อยสลายได้ เช่น พอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone, PCL) เป็นต้น มาใช้ในการวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐพงศ์, วรพงษ์, ศิริินภา. 2551. “การศึกษาพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ที่เตรียมได้จากพอลิแลคติกแอซิดผสมแป้งคั่วคั่วแปรชนิดพรีเจลและไฮโดรโฟบิก.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์-บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] Ceresana. 2019. *Bioplastics – study: market, analysis, trends – Ceresana*. [Online]. Available : <https://bit.ly/2tGAPld>.
- [3] McNeil, C. I. and Mohammed, H. M. 1995. “A comparison of the thermal degradation behavior of ethylene-ethyl acrylate copolymer, low density polyethylene and poly(ethyl acrylate).” *Polymer degradation & stability*. 48(1995) : 175-187.
- [4] Meng, X. Nguyen, N.A. Tekinalp, H. Lara-Curzio, E. and Ozcan, S. 2017. “Supertough PLA-silane nanohybrids by in situ condensation and grafting.” *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 6(1) : 1289-1298.
- [5] Gravalos, K. G. Kallitsis, J.K. and Kalfoglou, N.K. 1995. “In situ compatibilization of poly(ethylene terephthalate)/poly(ethylene-co-ethyl acrylate) blends.” *Polymer*. 36(7) : 1393-1399.
- [6] วิลาส รัตนานุกูล. 2554. พลาสติกชีวภาพ. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://bit.ly/2VW6NRI>.
- [7] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2562. ประเภทของพลาสติก. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://bit.ly/2EtAX3p>.
- [8] World Centric. 2019. *Compostable Plastics*. [Online]. Available : <https://bit.ly/2M5dgVs>.
- [9] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2562. การใช้งานผลิตภัณฑ์ย่อยสลายได้. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://bit.ly/2bdI5Bq>.
- [10] จารีนุช โรจน์เสถียร. 2554. “ศึกษาการผสมระหว่างสไตรีน อะครีโลไนไตรล์โคพอลิเมอร์ออฟเกรดและยางธรรมชาติ.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [11] อาทิตยา โยธารักษ์. 2549. “ผลของสภาวะที่ใช้ในกระบวนการอัดรีดที่มีต่อโครงสร้างเปลี่ยนแปลงของพอลิไวนิลคลอไรด์ในพอลิเมอร์ผสมแบบหลอม.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [12] รุจิเรข วิวัฒนานุกูล. 2556. “การพัฒนาฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LLDPE/SEBS ที่มีอัตราการซึมผ่านก๊าซเอทิลีนที่สูง โดยการเติมพลาสติกไซเซอร์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [13] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. สารปรับแต่งพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ : บุ๊คเน็ต
- [14] Burke, J. *Solubility parameter : Theory and application*. [Online]. Available : <http://www.cool.conservancy-us.org/byauth/burke/solpar/solpar2.html>.

- [15] Masud, S. H. Lawrence, T. D. Amar K. M. and Marisa. 2006. "Chopped glass and recycled newspaper as reinforcement fibers in injection molded poly(lactic acid) composite: A comparative study." *Composite science and technology*. 66(11-12) : 1813-1824.
- [16] Softschool. 2019. Lactic acid formula. [Online]. Available : <https://bit.ly/2E5AiF3>.
- [17] Narayanan, N. Roychoudhury, P K. and Srivastava, A. 2004. "L (+) lactic acid fermentation and its product polymerization." *Electronic Journal of Biotechnology*. 7(2) : 167-179
- [18] งานส่งเสริมภาพลักษณ์องค์กร สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2551. แผนที่นำทางแห่งชาติการพัฒนารัฐอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ. กรุงเทพฯ : สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [19] Dow Chemical Company. 2019. Technical information amplify™ EA 101 Functional Polymer. [Online]. Available : <https://bit.ly/2tNlRzT>.
- [20] Sigma-Aldrich. 2019. Poly(ethylene-co-ethyl acrylate). [Online]. Available : <https://bit.ly/2M9V7WH>.
- [21] อธิพิศ แจ้งชัด. ม.ป.ป. สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agents). [สไลด์]. กรุงเทพฯ.
- [22] Wang, Y. Mei, Y. Wang, Q. Wei, W. Hung, F. Li, Y. Li, J. and Zou, Z. 2019. "Improved fracture toughness and ductility of PLA composites by incorporating a small amount of surface-modified helical carbon nanotubes." *Composites part B*. 162(2019) : 54-61.
- [23] Lu, W. Shuai, Z. and Yanhua, Z. 2018. "Parallel advances in improving mechanical properties and accelerating degradation to polylactic acid." *International journal of biological macromolecules*. 125(2019) : 1093-1102.
- [24] Chen, H. Yu, X. Zhou, W. Peng, S. and Zhao, X. 2018. "Highly toughened polylactide (PLA) by reactive blending with novel polycaprolactone-based polyurethane (PCLU) blends." *Polymer Testing*. 70(1) : 275-280.
- [25] American standard foe testing and materials. 2018. ASTM D1238-13 Standard test method for melt flow rates of thermoplastics by extrusion plastometer. n.p.
- [26] American standard foe testing and materials. 2018. ASTM E794-06(2018) Standard test method for melting and crystallization temperatures by thermal analysis. n.p.
- [27] Fujisawa, S. Saito, T. Kimura, S. Iwata, T. and Isogai, A. "Surface engineering of ultrafine cellulose nanofibrils toward polymer nanocomposite materials." *Biomacromolecules*. 14(5) : 1541-1546.
- [28] Billmeyer F.W. *Textbook of polymer science*. 1984. New York : Wiley & sons.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [29] American standard for testing and materials. 2018. ASTM D638-14 standard test method for tensile properties of plastics. n.p.
- [30] American standard for testing and materials. 2018. ASTM D256 – 10 standard test methods for determining the izod pendulum impact resistance of plastics. n.p.
- [31] Mariano, P. 2003. “Reactive compatibilization of blends of PET and PP modified by GMA grafting.” *Macromolecular Symposia*. 198(1) : 161-172.
- [32] วรศักดิ์ และ นีรนุช. 2558. “โครงสร้างผลึกและกระบวนการก่อผลึกของพอลิแลคไทด์.” *วารสารวิทยาศาสตร์ มศว*. 32(1) : 261-272.
- [33] นิสากร วัชระ. 2562. “การปรับปรุงสมบัติของพอลิแลคติกแอซิดด้วยซิลิกาและเอทิลีนเอทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์.” *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*.
- [34] Karanveer, S.A. Bohm, S. Khanna, A. and Bohm, H L. M. 2015. “Graphene based anticorrosive coatings for Cr (VI) replacement.” *Nanoscale*. (7) : 1-3.



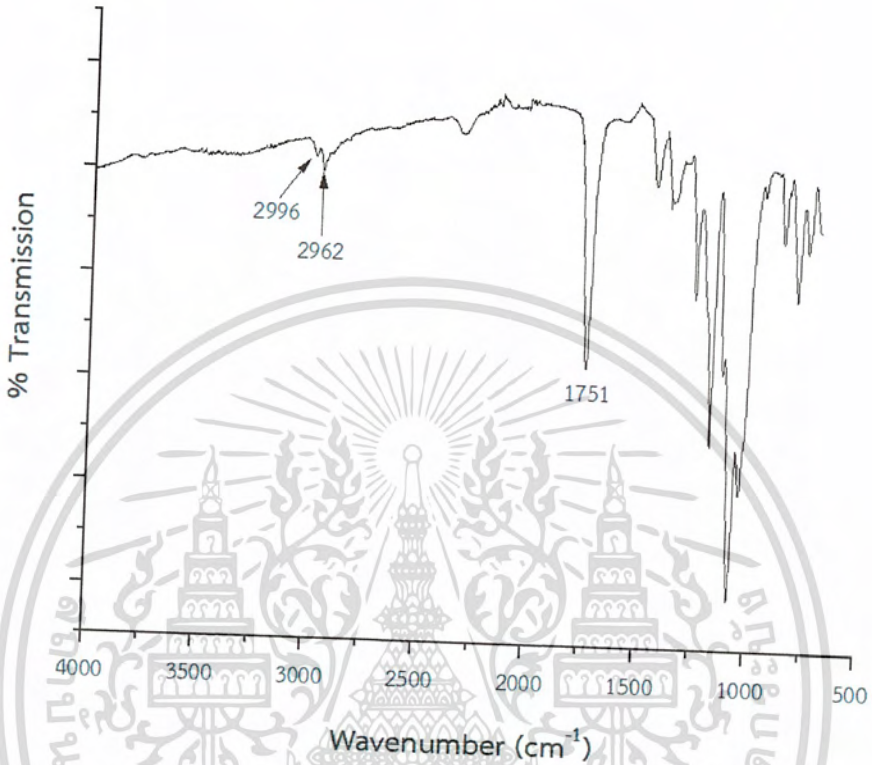
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

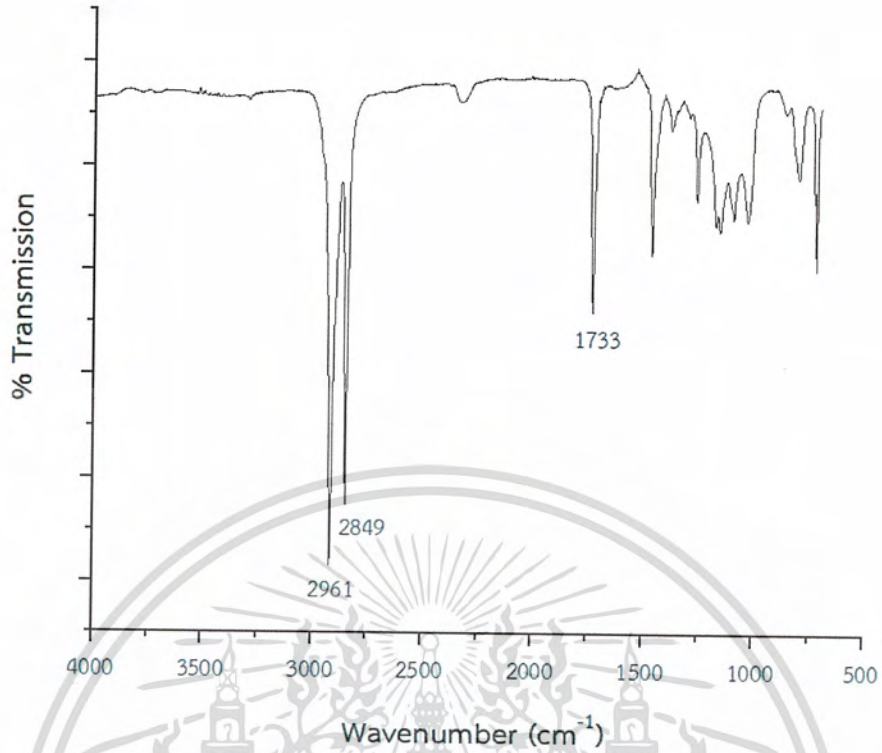
ภาคผนวก ก

ผลการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ATR-FTIR

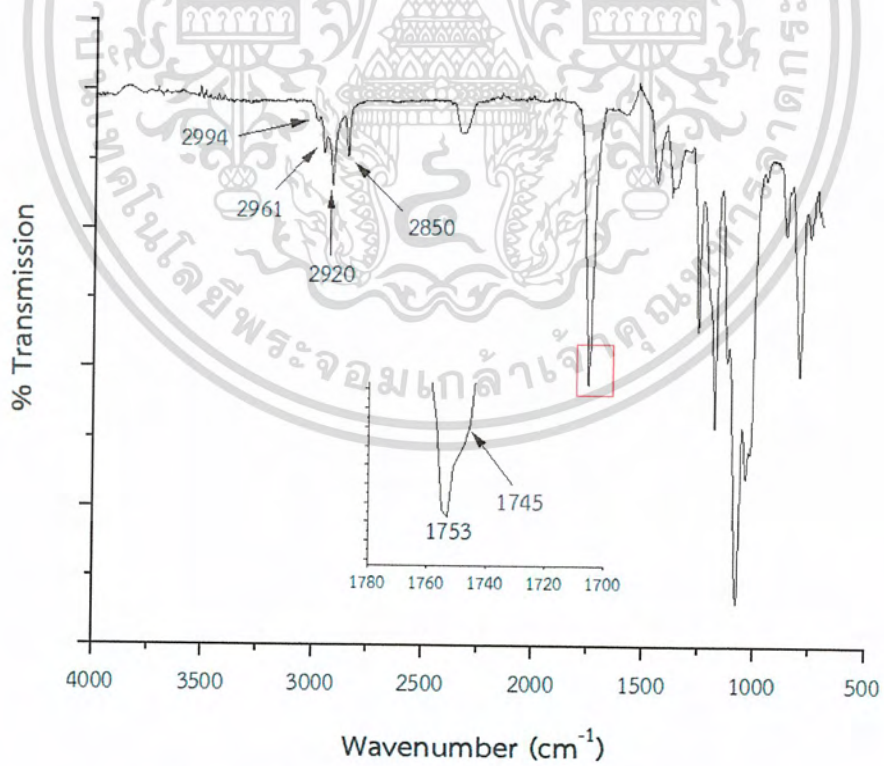


รูปที่ ก.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของ PLA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

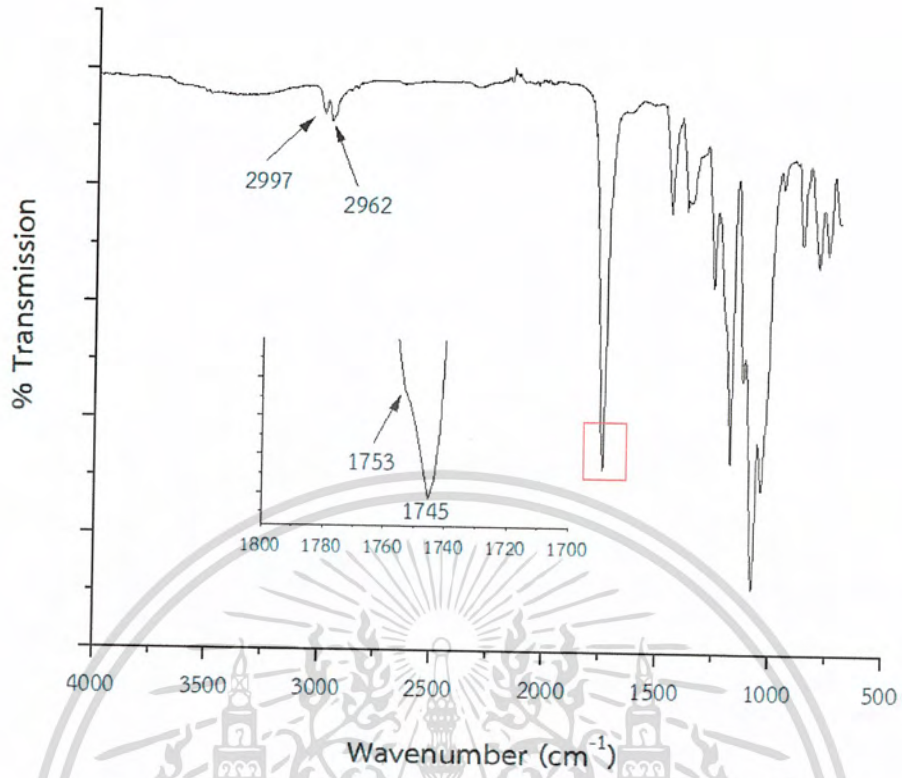


รูปที่ ก.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของ EEA

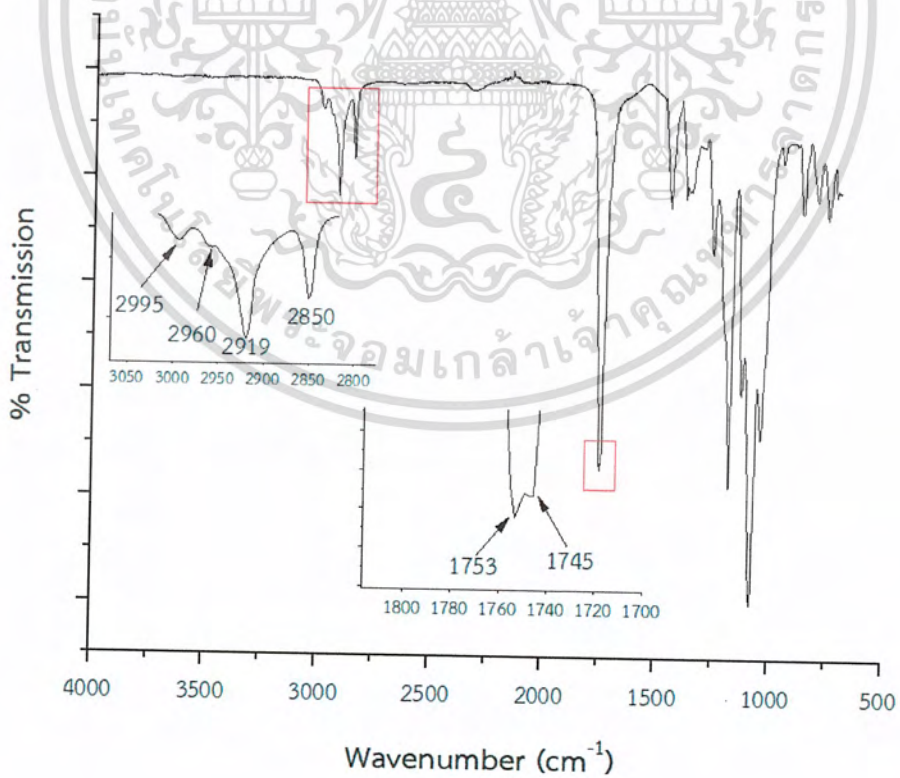


รูปที่ ก.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม P80E20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

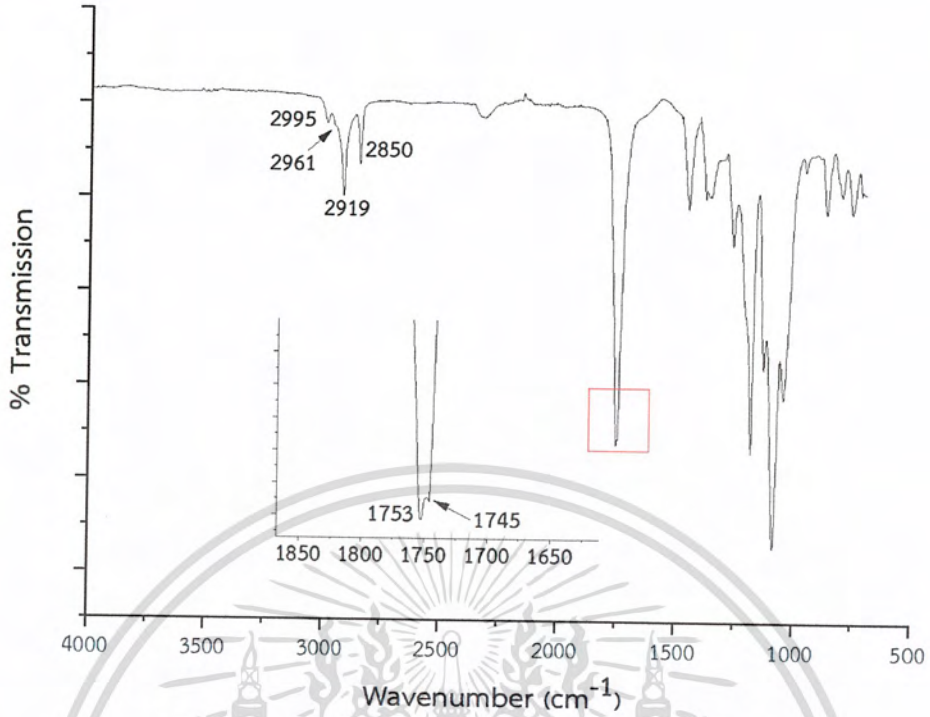


รูปที่ ก.4 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม P100A0.5

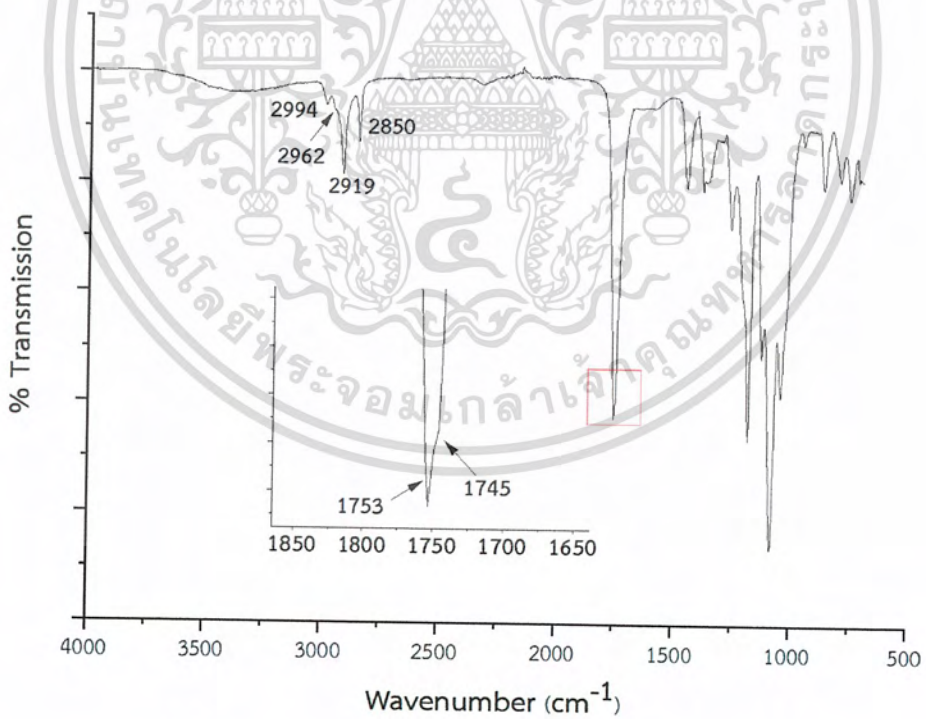


รูปที่ ก.5 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม P80E20A0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับเป็นสัญญาซื้อขายหรือการรับประกันใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

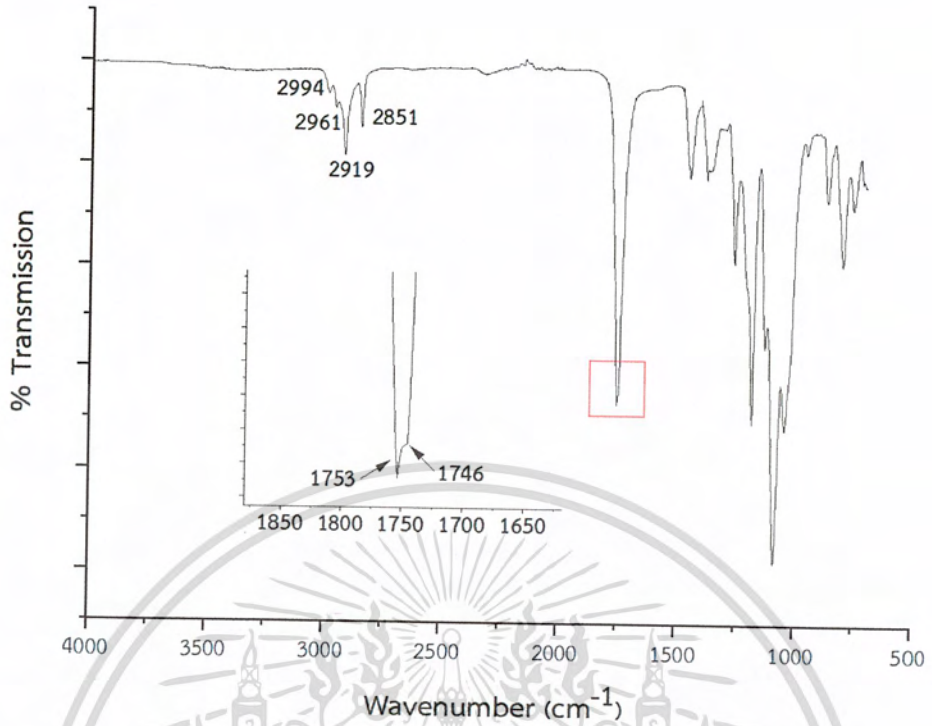


รูปที่ ก.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม P80E20A1.0



รูปที่ ก.7 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม P80E20A1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

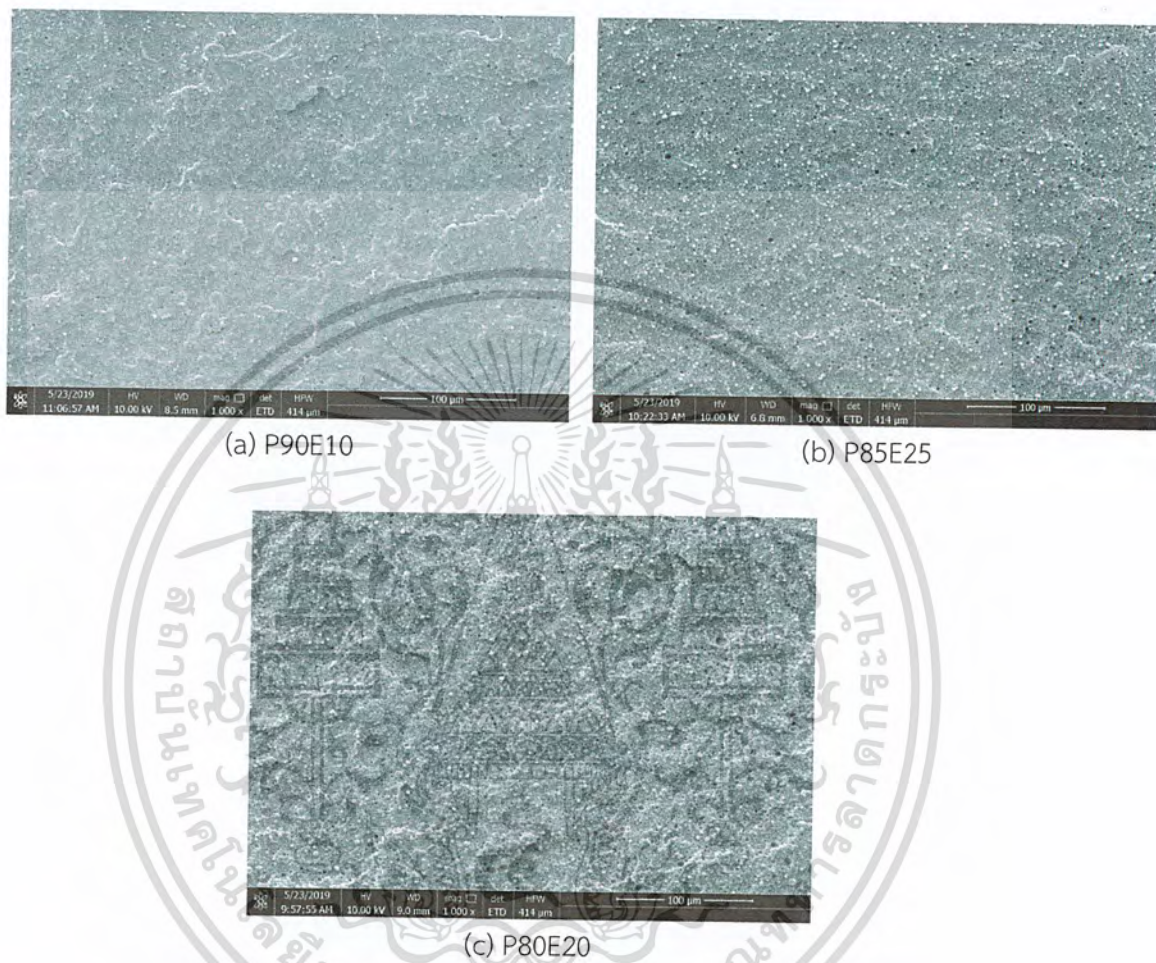


รูปที่ ก.8 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม P80E20A2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

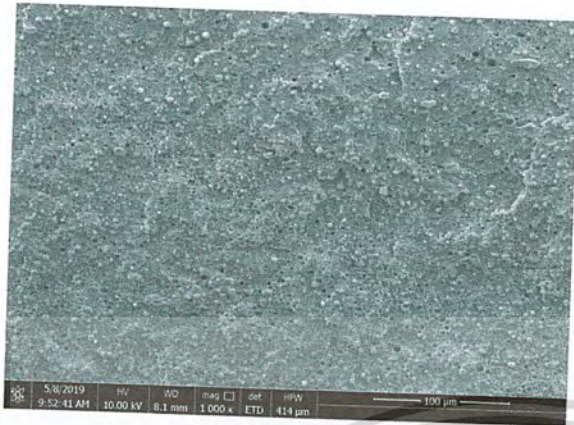
การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA ด้วย SEM



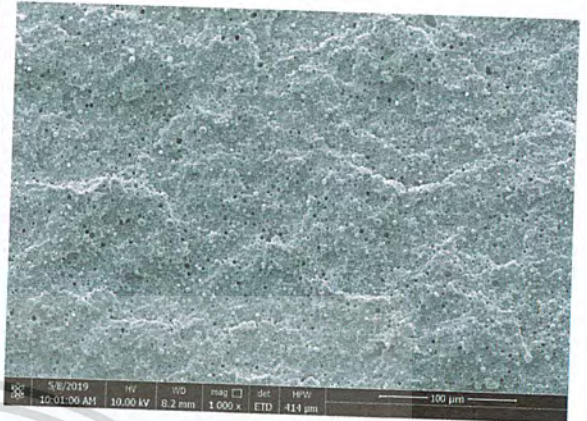
รูปที่ ข.1 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES



(a) P80E20A0.5



(b) P80E20A1.0



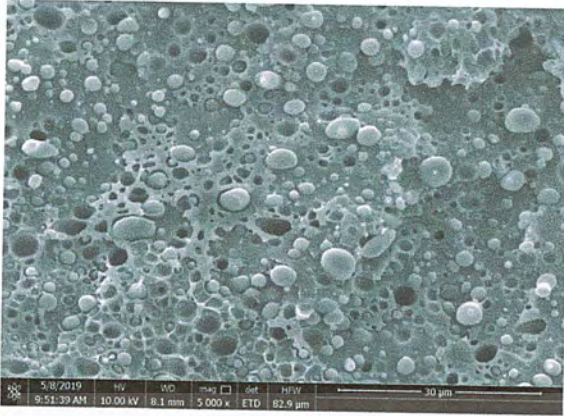
(c) P80E20A1.5



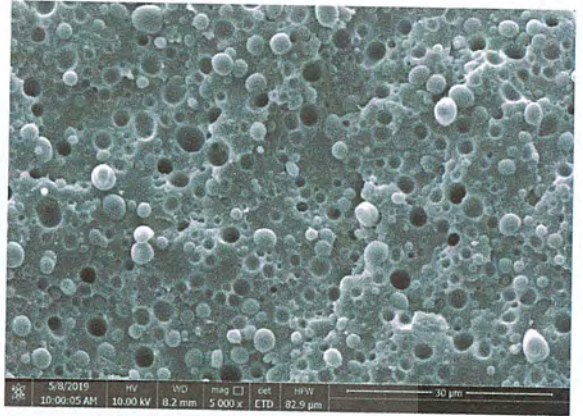
(d) P80E20A2.0

รูปที่ ข.2 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

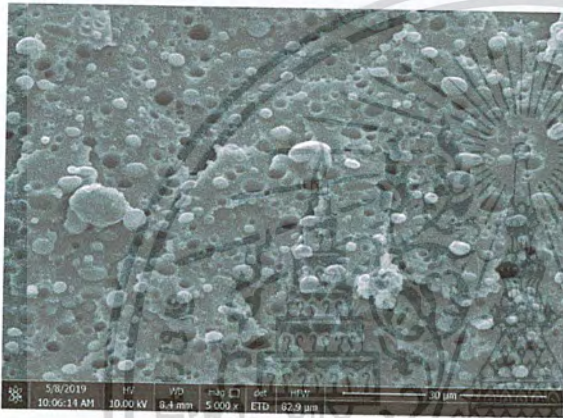
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



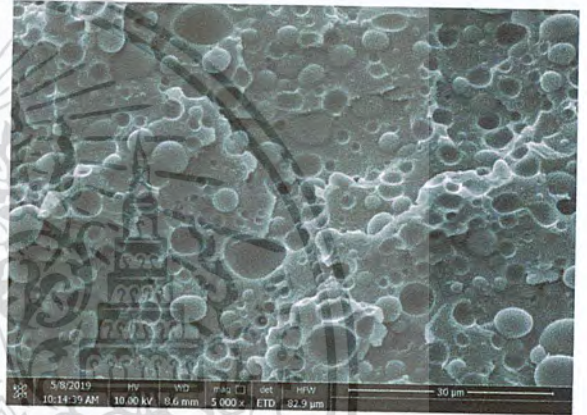
(a) P80E20A0.5



(b) P80E20A1.0



(c) P80E20A1.5



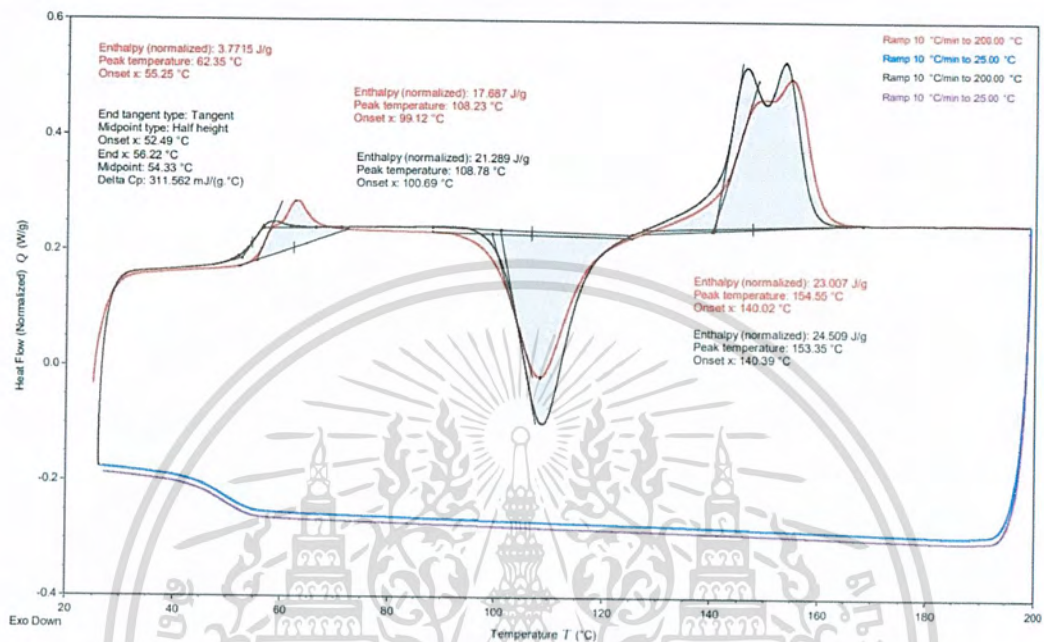
(d) P80E20A2.0

รูปที่ ข.3 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA/APTES ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

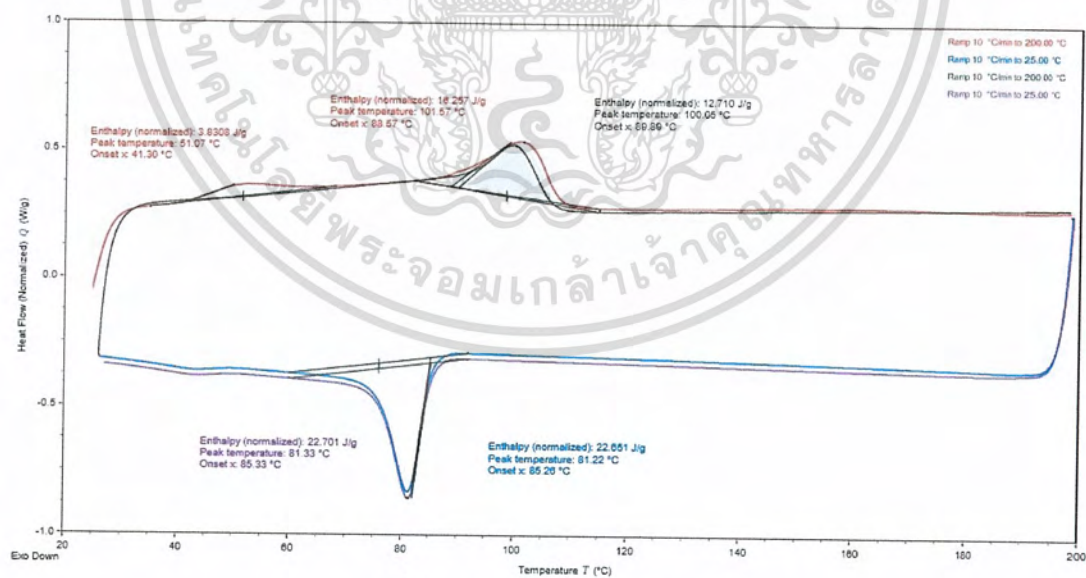
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

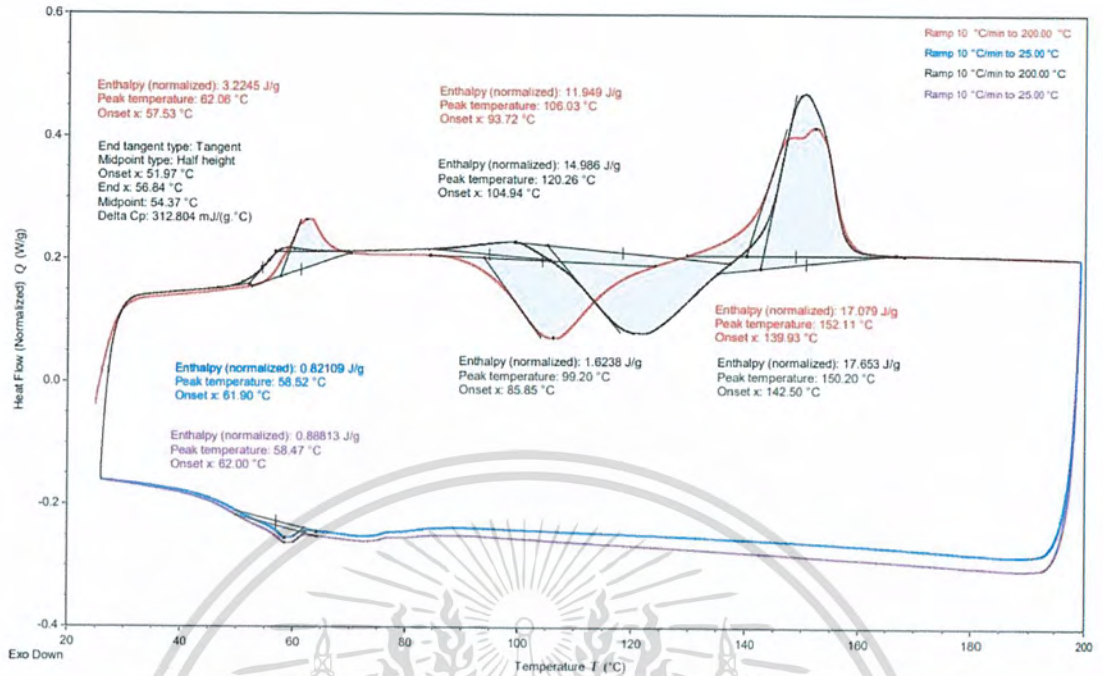


รูปที่ ค.1 เทอร์โมแกรมของ PLA

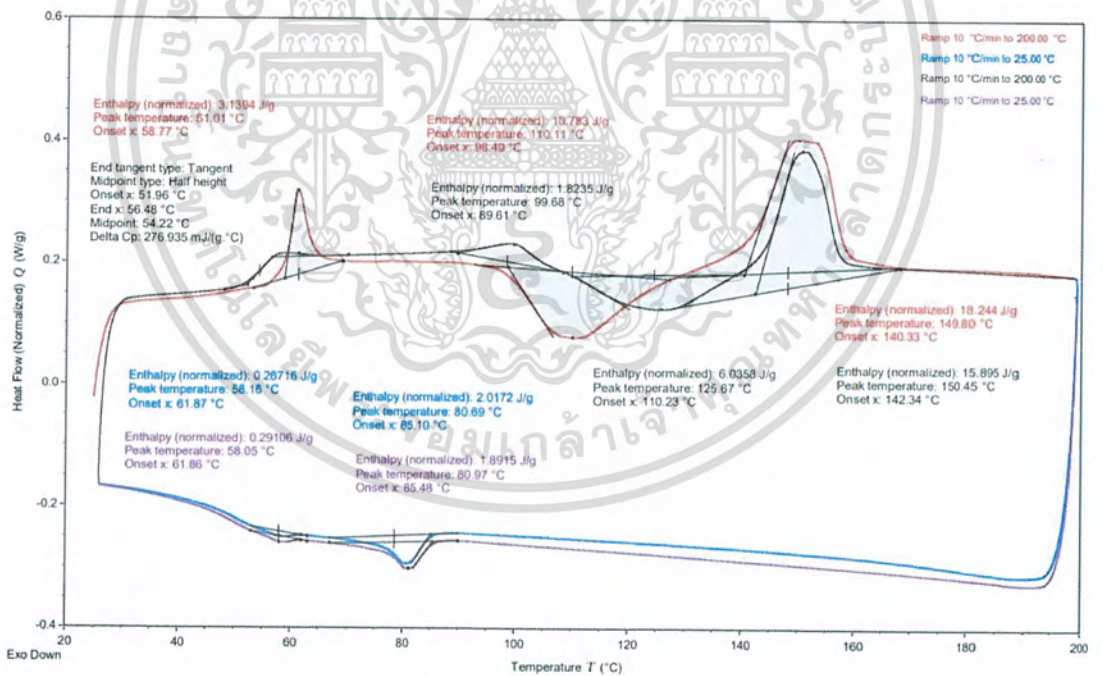


รูปที่ ค.2 เทอร์โมแกรมของ EEA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

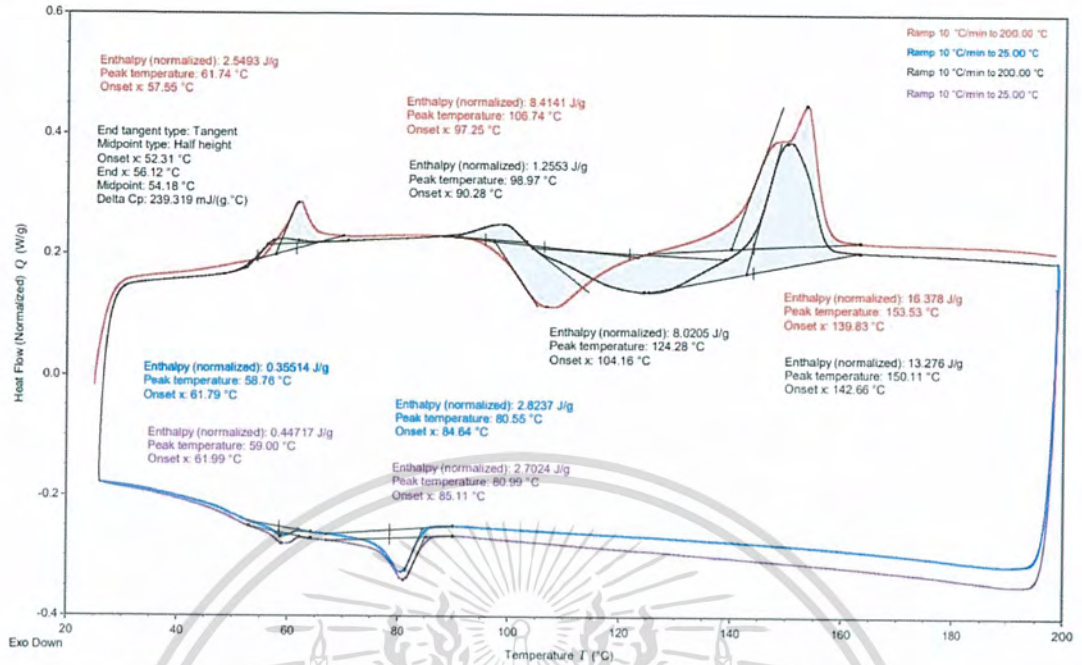


รูปที่ ค.3 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม P90E10

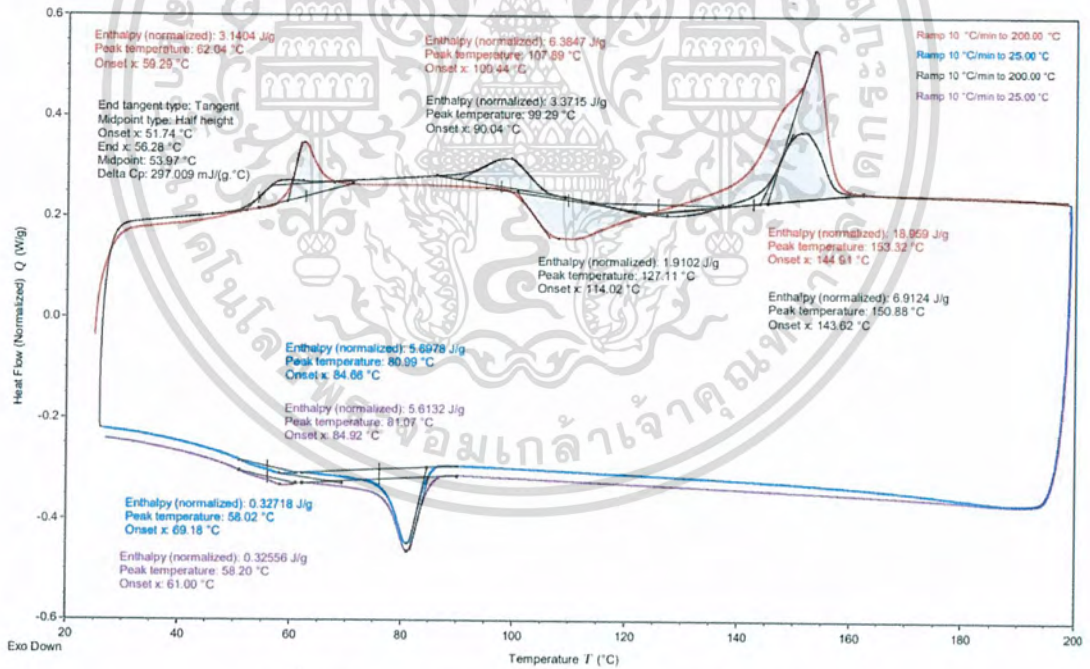


รูปที่ ค.4 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม P85E15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

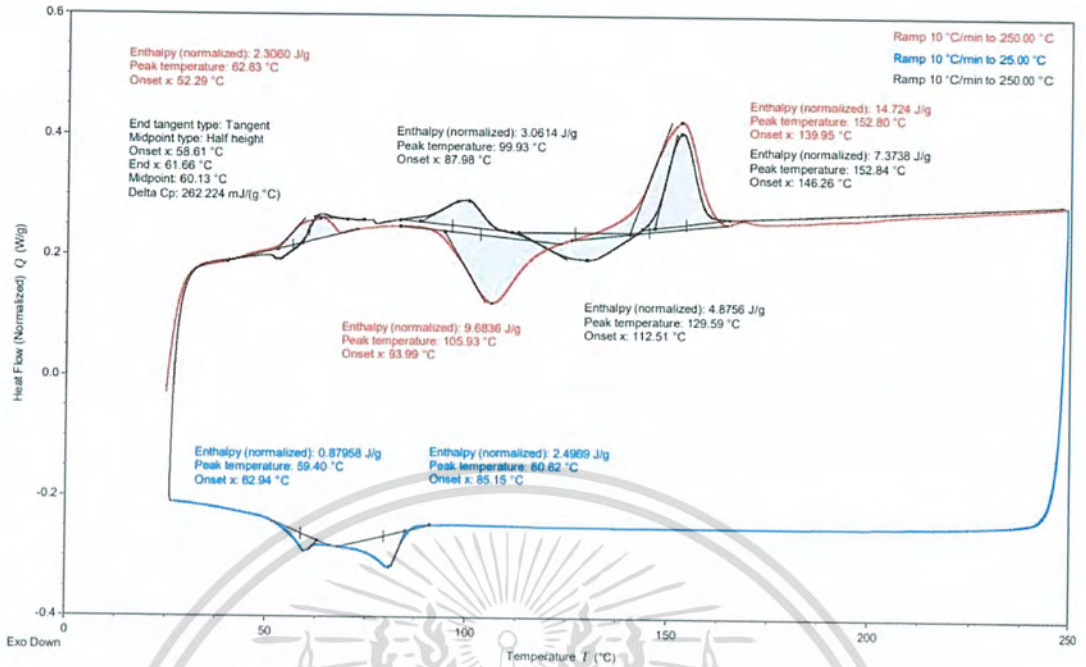


รูปที่ ค.5 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม P80E20

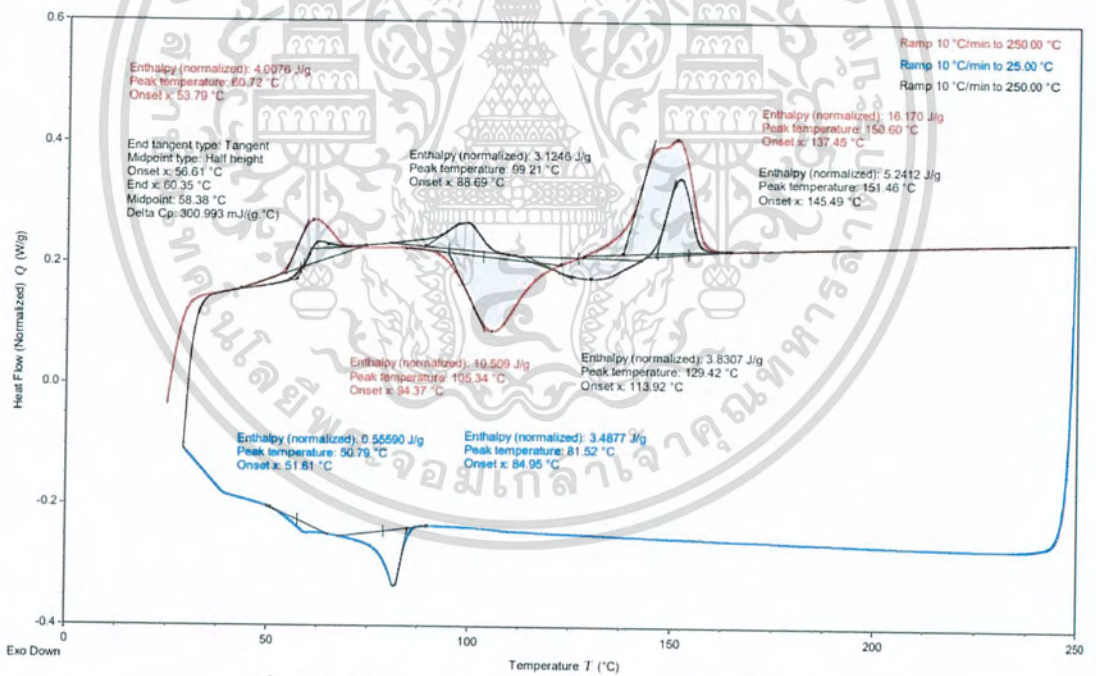


รูปที่ ค.6 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม P75E25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

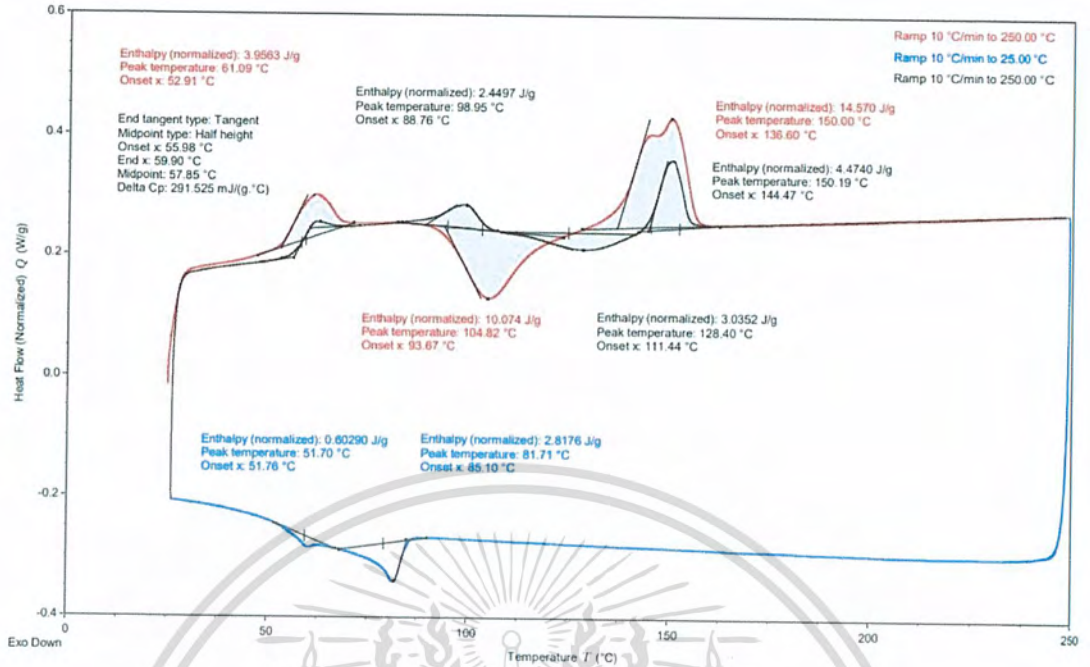


รูปที่ ค.7 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม P80E20A0.5

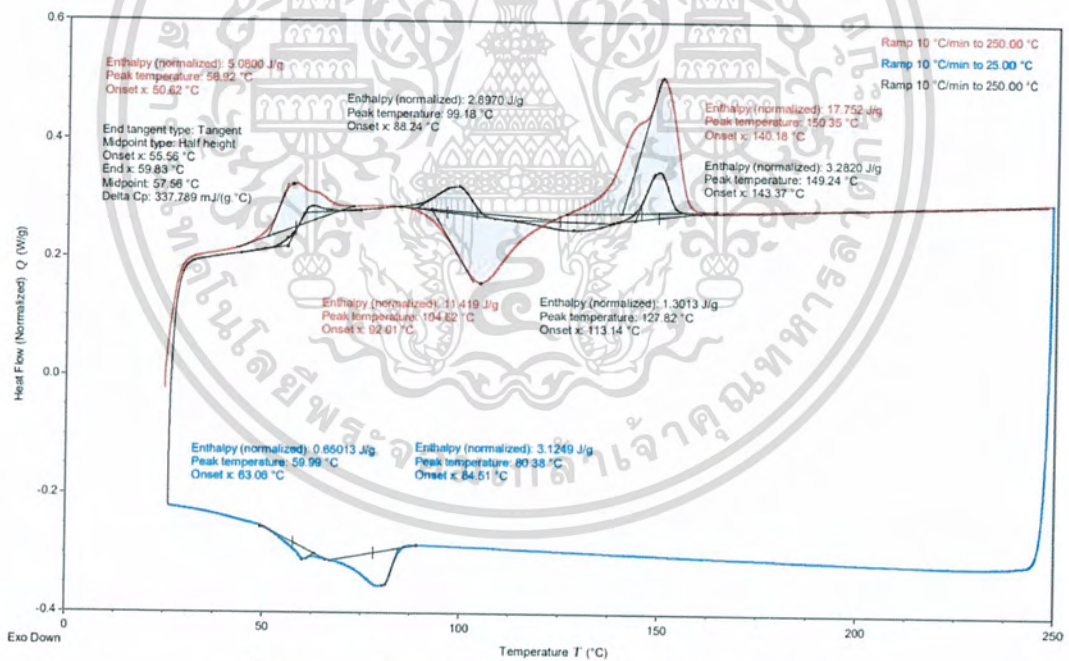


รูปที่ ค.8 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม P80E20A1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.9 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม P80E20A1.5



รูปที่ ค.10 เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม P80E20A2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/EEA ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ชิ้นงาน	ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (MPa)	ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความแข็งแรง กระแทก (kJ/m ²)
PLA	68.8±1.4	12.1±0.8	745.1±81.4	3.3±0.2
P90E10	61.9±1.2	10.2±0.8	773.6±41.0	3.6±0.3
E85E15	57.1±0.4	8.7±0.3	777.3±15.0	4.5±0.3
E80E20	50.2±0.6	8.3±0.2	707.4±7.9	4.9±0.3
P75E25	45.3±0.9	9.2±0.5	671.2±22.9	5.2±0.2

ตารางที่ ง.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม P80/E20/APTES ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ชิ้นงาน	ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (MPa)	ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)	มอดุลัสของยัง (MPa)	ความแข็งแรง กระแทก (kJ/m ²)
P80E20A0.5	49.7±1.7	99.0±6.0	653.6±13.9	4.7±0.4
P80E20A1.0	48.3±1.1	59.7±6.0	642.1±36.2	4.4±0.1
P80E20A1.5	47.0±0.9	30.2±2.9	520.4±62.6	4.4±0.2
P80E20A2.0	42.8±1.2	22.6±1.5	531.1±33.9	4.4±0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้