

รหัสโครงการ SUT7-710-57-18-06



รายงานการวิจัย

การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงขี้เลื่อยและ
พอลิแลคติกแอซิด
(Preparation and properties of sawdust/poly(lactic acid)
composites)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและ
พอลิแลคติกแอซิด
(Preparation and properties of sawdust/poly(lactic acid)
composites)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. กษมา จารุกำจร

สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2557

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงซีลีอและพอลิแลคติกแอซิด ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2557 โดยงานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยความร่วมมือและการสนับสนุนจากหลายบุคคล ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย คือ นางสาวจิราพร โนใหม่ นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ โรงเลื่อยไม้แปรรูปปิยรัตน์ จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์ผงซีลีอสำหรับใช้เป็นสารเสริมแรงในงานวิจัยนี้

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผู้สนใจอ่านงานวิจัยฉบับนี้จะได้รับประโยชน์ตามสมควร

รองศาสตราจารย์ ดร. กษมา จารุกำจร
(หัวหน้าโครงการวิจัย)



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้ ใช้ผงซีลี้อยู่เป็นสารเสริมแรงในพอลิแลคติกแอซิด เตรียมผงซีลี้อยู่ให้อยู่ในรูปของผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรรูปและผ่านการตัดแปรรูปด้วยการทำอัลคาไลน์เซชัน สำหรับผงซีลี้อยู่ที่ผ่านการตัดแปรรูปด้วยการทำอัลคาไลน์เซชัน ผงซีลี้อยู่ที่ตัดแปรรูปด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 80/20 70/30 และ 60/40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เตรียมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่และชิ้นงานทดสอบเตรียมด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป ตรวจสอบสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิท

เมื่อปริมาณผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรรูปด้วยการทำอัลคาไลน์เซชันเพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิทมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าความต้านแรงดึง ค่าความต้านแรงดัดโค้ง ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก และค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดลดลง ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิทลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรรูปด้วยการทำอัลคาไลน์เซชันเพิ่มขึ้น การตัดแปรรูปพื้นผิวของผงซีลี้อยู่ด้วยการทำอัลคาไลน์เซชันส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางกลและความเสถียรต่อความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิท นอกจากนี้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าการตัดแปรรูปผงซีลี้อยู่ด้วยการทำอัลคาไลน์เซชันปรับปรุงการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างผงซีลี้อยู่และพอลิแลคติกแอซิด และการแตกตัวของผงซีลี้อยู่ในพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์

พอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตถูกใช้เพื่อปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิท เมื่อปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพิ่มขึ้น ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดและค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิทเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความต้านแรงดึง ค่ามอดูลัสแรงดึง ค่าความต้านแรงดัดโค้ง และค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งลดลง ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิทเพิ่มขึ้นตามปริมาณของพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่เพิ่มขึ้น ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะของการแตกหักแบบเหนียวในพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิทที่มีการปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต

พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ใช้เป็นสารช่วยให้เข้ากัน และปริมาณของพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ คือ 3 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์คอมโพสิทที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์มีสมบัติทางกลและความเสถียรต่อความร้อนที่สูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้

ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีเนียมที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต คือ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยืนยันได้ว่าพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ปรับปรุงความเข้ากันได้ขององค์ประกอบในพอลิเมอร์คอมโพสิต



Abstract

In this study, sawdust was used as a reinforcing filler in poly(lactic acid) (PLA). Sawdust was prepared as untreated sawdust (UT) and alkali treated sawdust (AT). For AT, sawdust was treated with 2% w/v sodium hydroxide (NaOH) solution for 30 min. Then, the composites of PLA/sawdust at various ratios of 80/20, 70/30, and 60/40 w/w were prepared using a twin screw extruder and test specimens were molded using an injection molding machine. Mechanical, thermal, and morphological properties of the composites were investigated.

With increasing UT content, tensile modulus and flexural modulus of PLA composites increased whereas tensile strength, flexural strength, impact strength, and elongation at break decreased. Thermal stability of PLA composites was continuously decreased when UT content was increased. Alkali treatment improved mechanical properties and thermal stability of PLA composites. Moreover, SEM micrographs showed that alkali treatment improved sawdust-PLA interfacial adhesion and dispersion of sawdust in PLA matrix.

Poly(butylene adipate-*co*-terephthalate) (PBAT) was used to improve toughness of PLA composites. With increasing PBAT content, elongation at break and impact strength of PLA composites were increased whereas tensile strength, tensile modulus, flexural strength, and flexural modulus were decreased. Thermal stability of PLA composites was improved with increasing PBAT content. SEM micrographs exhibited some features of ductile fracture in the PLA composites toughened with PBAT.

Poly(lactic acid) grafted with maleic anhydride (PLA-*g*-MA) was used as a compatibilizer and its contents were 3, 5, and 10 wt%. The compatibilized composites had higher mechanical properties and thermal stability than that of the uncompatibilized composite. The optimum content of PLA-*g*-MA for sawdust/PLA/PBAT composite was 5 wt%. SEM micrographs confirmed that PLA-*g*-MA improved the compatibility between constituents of the composites.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การปรับปรุงการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลส และพอลิเมอร์เมทริกซ์	5
2.1.1 การตัดแปรพื้นผิวสารตัวเติม	5
2.1.1.1 การตัดแปรทางเคมี.....	5
2.1.1.1.1 การทำอัลคาไลเซชัน.....	5
2.1.1.1.2 การทำไซลาไนเซชัน	9
2.1.1.2 การตัดแปรทางกายภาพ.....	11
2.1.1.2.1 การตัดแปรด้วยความร้อน	11
2.1.1.2.2 การตัดแปรโดยใช้โคโรนา	12
2.1.2 การตัดแปรเมทริกซ์.....	13
2.1.3 การใส่สารช่วยให้เข้ากัน	14
2.2 การปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิต	14
2.2.1 การปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยการ ทำพลาสติไซเซชัน	15
2.2.2 การปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยการเติม พอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง.....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วัสดุและการทดลอง	19
3.1 วัสดุ.....	19
3.2 การทดลอง.....	19
3.2.1 การเตรียมผงซีลี้อย	19
3.2.2 การเตรียมสารช่วยให้เข้ากัน.....	19
3.2.3 การเตรียมพอลิเมอร์คอม โพลีท.....	19
3.2.4 การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอม โพลีท.....	20
3.2.4.1 สมบัติทางกล	20
3.2.4.2 สมบัติทางความร้อน.....	20
3.2.4.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา	21
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลอง	22
4.1 ผลของการทำอัลคาไลเซชันและปริมาณผงซีลี้อยต่อสมบัติของพอลิเมอร์ คอม โพลีทระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อย.....	22
4.1.1 สมบัติทางกล	22
4.1.1.1 สมบัติความต้านแรงดึง	22
4.1.1.2 สมบัติความต้านแรงดัดโค้ง.....	25
4.1.1.3 สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก.....	27
4.1.2 สมบัติทางความร้อน	30
4.1.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา.....	33
4.2 ผลของปริมาณพอลิบีวธิลินอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่อสมบัติของพอลิเมอร์ คอม โพลีทระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อย.....	37
4.2.1 สมบัติทางกล	37
4.2.1.1 สมบัติความต้านแรงดึง	37
4.2.1.2 สมบัติความต้านแรงดัดโค้ง.....	40
4.2.1.3 สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก.....	42
4.2.2 สมบัติทางความร้อน	45
4.2.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา.....	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลของปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ต่อสมบัติของ พอลิเมอรัคคอมโพสิทระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีเนียมที่ปรับปรุง ความเหนียวด้วยพอลิอีทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต	51
4.3.1 สมบัติทางกล	51
4.3.1.1 สมบัติความต้านแรงดึง	51
4.3.1.2 สมบัติความต้านแรงดัดโค้ง	54
4.3.1.3 สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก	57
4.3.2 สมบัติทางความร้อน	60
4.3.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา	62
บทที่ 5 บทสรุป	65
บรรณานุกรม	67
ประวัตินักวิจัย	73

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 สมบัติทางกลของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอม โพลีโพลีระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ	29
4.2 อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอม โพลีโพลีระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ	33
4.3 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอม โพลีโพลีระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ	44
4.4 อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต และพอลิเมอร์คอม โพลีโพลีระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ	46
4.5 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอม โพลีโพลีระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ	59
4.6 อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิเมอร์คอม โพลีโพลีระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ	62

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.1 ค่าความต้านแรงดึงของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลตราไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ.....	24
4.2 ค่ามอดูลัสแรงดึงของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลตราไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ.....	24
4.3 ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลตราไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ.....	25
4.4 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลตราไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ.....	26
4.5 ค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลตราไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ.....	27
4.6 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลตราไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ.....	28
4.7 กราฟ TGA ของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลตราไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ.....	32
4.8 กราฟ DTA ของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลตราไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ.....	32
4.9 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิต (กำลังขยาย 100 เท่า) (a) PLA/UT20 (b) PLA/UT30 (c) PLA/UT40 (d) PLA/AT20 (e) PLA/AT30 และ (f) PLA/AT40	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิต (กำลังขยาย 300 เท่า) (a) PLA/UT20 (b) PLA/UT30 (c) PLA/UT40 (d) PLA/AT20 (e) PLA/AT30 และ (f) PLA/AT40	36
4.11 ค่าความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีอ์ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ	39
4.12 ค่ามอดุลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีอ์ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ	39
4.13 ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีอ์ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ	40
4.14 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีอ์ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ	41
4.15 ค่ามอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีอ์ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ	42
4.16 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีอ์ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ	43
4.17 กราฟ TGA ของพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีอ์ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ	46
4.18 กราฟ DTA ของพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีอ์ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิต (กำลังขยาย 1500 เท่า) (a) PLA/AT30 (b) PLA/AT30/PBAT10 (c) PLA/AT30/PBAT20 และ (d) PLA/AT30/PBAT30	49
4.20 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิต (กำลังขยาย 200 เท่า) (a) PLA/AT30 (b) PLA/AT30/PBAT10 (c) PLA/AT30/PBAT20 และ (d) PLA/AT30/PBAT30.....	50
4.21 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิต (กำลังขยาย 1500 เท่า) (a) PLA/AT30 (b) PLA/AT30/PBAT10 (c) PLA/AT30/PBAT20 และ (d) PLA/AT30/PBAT30.....	51
4.22 ค่าความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและ ผงซีลีอ์ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตที่ ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ	53
4.23 ค่ามอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีอ์ ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณ พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ	54
4.24 ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิด และผงซีลีอ์ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ	54
4.25 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและ ผงซีลีอ์ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ	56
4.26 ค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและ ผงซีลีอ์ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ	56
4.27 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอ ซิดและผงซีลีอ์ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ	58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เถ้าที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ	61
4.29 กราฟ DTA ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เถ้าที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ	61
4.30 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิต (กำลังขยาย 1500 เท่า) (a) PLA/AT30/PBAT20 (b) PLA/AT30/PBAT20/PLA-g-MA3 (c) PLA/AT30/PBAT20/PLA-g-MA5 และ (d) PLA/AT30/PBAT20/PLA-g-MA10.....	63
4.31 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิต PLA/AT30/PBAT20/PLA-g-MA5 (a) กำลังขยาย 200 เท่า และ (b) กำลังขยาย 1500 เท่า.....	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid, PLA) เป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polymer) ที่ได้รับความนิยมอย่างมากจากภาคอุตสาหกรรม โดยจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเตอร์ที่มีสายโซ่ตรง (aliphatic polyester) สังเคราะห์ได้จากกรดแลคติก (lactic acid) ที่สามารถผลิตได้จากการหมักแป้งหรือน้ำตาลจากข้าวโพด มันสำปะหลัง ข้าวสาลี หรืออ้อย ซึ่งเป็นทรัพยากรที่สามารถสร้างขึ้นทดแทนใหม่ได้อย่างต่อเนื่องตามธรรมชาติ พอลิแลคติกแอซิดสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการผลิตที่ใช้ทั่วไปในภาคอุตสาหกรรมปัจจุบัน โดยให้คุณสมบัติเทียบเคียงกับผลิตภัณฑ์ในท้องตลาด อีกทั้งสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพภายในระยะเวลาอันสั้นเมื่อสิ้นสุดการใช้งานเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากวัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคนิคใหม่ที่สามารถผลิตพอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในเชิงพาณิชย์ขึ้นได้ จึงส่งผลให้มีการใช้งานของพอลิเมอร์ชนิดนี้ขยายออกไปในอุตสาหกรรมต่างๆ มากขึ้น [กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2010] โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรมยานยนต์ซึ่งเน้นผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังมีคุณภาพที่ดีและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ เพื่อเพิ่มโอกาสในการแข่งขันในภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาเพื่อหาแนวทางการลดต้นทุนการผลิตควบคู่ไปกับการปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์จากพอลิแลคติกแอซิดกันอย่างต่อเนื่อง โดยแนวทางที่กำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น คือการทำวัสดุคอมโพสิตเนื่องจากให้ความแข็งแรงเฉพาะ (specific strength) ที่สูง ในปัจจุบันนิยมใช้สารตัวเติมเซลลูโลส (lignocellulosic filler) เช่น ผงขี้เลื่อยซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจากอุตสาหกรรมไม้แปรรูป มีราคาถูก หาได้ง่าย ความหนาแน่นต่ำ ไม่เป็นอันตรายต่อเครื่องจักรและสุขภาพของคนงาน และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [Bettini, Bonse, Melo และ Muñoz, 2010] มาใช้ทดแทนเส้นใยสังเคราะห์เพื่อเป็นสารเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต ซึ่งหากการวิจัยและพัฒนาในการนำผงขี้เลื่อยมาใช้ผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตกับพอลิแลคติกแอซิดประสบผลสำเร็จในเชิงพาณิชย์ จะเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับของเหลือจากอุตสาหกรรม ควบคู่ไปกับการลดต้นทุนการผลิตแก่ภาคอุตสาหกรรม อีกทั้งยังเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมโดยการลดปริมาณขยะจากพลาสติก และได้องค์ความรู้ใหม่ที่สอดคล้องกับแนวทางพัฒนาประเทศที่ยั่งยืนอีกด้วย

ข้อจำกัดที่สำคัญในการใช้สารตัวเติมเซลลูโลสมาเป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ คือ ความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและเมทริกซ์ (matrix) ที่ต่ำ ทำให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่ดี [Saheb และ Jog, 1999] ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงการยึดติดที่อินเทอร์เฟซระหว่างเมทริกซ์และสารตัวเติมเซลลูโลสซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใส่สารช่วยให้เข้ากันได้

(adding compatibilizer) การตัดแปรเมทริกซ์ (matrix modification) และการตัดแปรพื้นผิวของสารตัวเติม (filler surface treatment) เป็นต้น โดยการตัดแปรสารตัวเติมเซลลูโลสด้วยการทำอัลคาไลเซชัน (alkalization) เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีขั้นตอนการทำที่ง่าย มีราคาถูกกว่าการตัดแปรชนิดอื่นๆ สามารถทำความสะอาดพื้นผิวของสารตัวเติมเซลลูโลส และตัดแปรพื้นผิวของสารตัวเติมเซลลูโลสให้มีการยึดติดกับเมทริกซ์ดีขึ้นได้ ดังนั้นการทำอัลคาไลเซชัน จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในเชิงอุตสาหกรรมที่สามารถปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้นได้ โดยมีขั้นตอนที่ง่ายและใช้การลงทุนที่ต่ำ [Sawpan, Pickering และ Fernyhough, 2011]

อย่างไรก็ตามการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตให้มีความแข็งตึง (stiffness) และความแข็งแรง (strength) ที่ดีขึ้นนั้น ย่อมทำให้สูญเสียสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญที่ต้องพิจารณาสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในบางประเภทโดยเฉพาะการนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนรถยนต์ ที่จำเป็นต้องมีความสมดุลระหว่างความแข็งตึง ความแข็งแรง และความต้านทานต่อแรงกระแทก ดังนั้นจึงได้มีการศึกษากันอย่างต่อเนื่องเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงสมบัติด้านความต้านทานต่อแรงกระแทกเพื่อลดความเปราะของพอลิเมอร์คอมโพสิต เช่น การทำพลาสติกไซเซชัน (plasticization) และการทำพอลิเมอร์ผสม (polymer blending) โดยใช้พอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงมาเป็นสารเพิ่มความเหนียวให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิต ปัจจุบันพอลิเมอร์ที่กำลังได้รับความนิยมในการนำมาปรับปรุงความเหนียวให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิต คือ พอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงซึ่งสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ยังสามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์หลังหมดอายุการใช้งาน เช่น พอลิคาโปลาแลคโตน (polycaprolactone, PCL) [Goriparthi, Suman และ Nalluri, 2012] พอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต (polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) [Lee, 2009] และพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoates, PHAs) [Qiang, Yu และ Gao, 2012] เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญก็คือความไม่เข้ากันระหว่างพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียวกับองค์ประกอบของพอลิเมอร์คอมโพสิต ดังนั้นพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ (poly(lactic acid) grafted with maleic anhydride, PLA-g-MA) ถูกใช้เป็นสารช่วยให้เข้ากันเพื่อปรับปรุงให้เกิดการยึดติดระหว่างอินเทอร์เฟซที่ดี และได้วัสดุที่มีสมบัติทางกลที่ดี

ในโครงการวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ โดยศึกษาผลของปริมาณของผงซีลี้อยู่และผลของการตัดแปรผงซีลี้อยู่ด้วยการทำอัลคาไลเซชันต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต นอกจากนี้ยังศึกษาผลของการปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต และผลของการใช้พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างองค์ประกอบในพอลิเมอร์คอมโพสิต เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุคอมโพสิตสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นชิ้นส่วนรถยนต์ที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของปริมาณผงขี้เถ้าต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เถ้า
2. เพื่อศึกษาผลของการดัดแปรผงขี้เถ้าต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เถ้า
3. เพื่อศึกษาผลของการใช้พอลิบิวทีลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เถ้า
4. เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เถ้าที่มีการปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทีลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เถ้าที่ปริมาณผงขี้เถ้าต่างๆ
2. ศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เถ้าที่มีและไม่มี การดัดแปรพื้นผิวของผงขี้เถ้าด้วยการทำอัลคาไลเซชัน
3. ศึกษาผลของปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เถ้า
4. ศึกษาผลของปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เถ้าที่มีการปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทีลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้พอลิเมอร์คอมโพสิตชนิดใหม่ที่มีแนวโน้มในการพัฒนาไปสู่การใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม
2. เป็นการส่งเสริมการพึ่งพาตนเองโดยใช้วัสดุที่สามารถหาได้ภายในประเทศมาผลิตเป็นพอลิเมอร์คอมโพสิต

3. เป็นการเพิ่มประโยชน์ในการใช้งานและเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรม
4. เป็นการสร้างและพัฒนาแก่นักวิจัยรุ่นใหม่ให้สามารถริเริ่มและพัฒนางานวิจัยเพื่อให้นำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในภาคอุตสาหกรรม
5. ได้เอกสารทางวิชาการที่ตีพิมพ์ในระดับประเทศหรือระดับนานาชาติ



บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันภาคการศึกษาและภาคอุตสาหกรรมได้ให้ความสำคัญกับการนำสารตัวเติมเซลลูโลส (lignocellulosic filler) ซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย ราคาถูก ความหนาแน่นต่ำ สามารถย่อยสลายได้ อีกทั้งไม่เป็นอันตรายต่อเครื่องจักรและสุขภาพของคอนกรีต มาใช้เพื่อเป็นสารเสริมแรงในพอลิแลคติกแอซิดมากขึ้น แต่ปัญหาที่สำคัญในการเสริมแรงพอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) ด้วยสารตัวเติมเซลลูโลส คือ การยึดติดที่อินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและเมทริกซ์ต่ำ ส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีสมบัติทางกลที่ต่ำ การปรับปรุงการยึดติดระหว่างอินเทอร์เฟซสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การดัดแปรพื้นผิวสารตัวเติม (filler surface treatment) การดัดแปรเมทริกซ์ (matrix modification) และการใส่สารช่วยให้เข้ากัน (addition of compatibilizer) เป็นต้น นอกจากนี้การปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพื่อให้มีความสมดุลระหว่างความแข็งตึง (stiffness) ความแข็งแรง (strength) และความเหนียว (toughness) ถือเป็นแนวทางในการพัฒนาพอลิเมอร์คอมโพสิตเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่กว้างขึ้น โดยการปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทำพลาสติกไซเซชัน (plasticization) และการเติมพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง (addition of flexible polymers) เพื่อเป็นสารเพิ่มความเหนียวให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิต

2.1 การปรับปรุงการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์เมทริกซ์

การปรับปรุงการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์เมทริกซ์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การดัดแปรพื้นผิวสารตัวเติม การดัดแปรเมทริกซ์ และการใส่สารช่วยให้เข้ากัน

2.1.1 การดัดแปรพื้นผิวสารตัวเติม

การดัดแปรพื้นผิวสารตัวเติม คือการปรับเปลี่ยนสภาพพื้นผิวของสารตัวเติมเพื่อให้มีการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ดีขึ้น โดยการดัดแปรพื้นผิวสารตัวเติมสามารถแบ่งออกได้เป็นการดัดแปรทางเคมี (chemical treatment) และการดัดแปรทางกายภาพ (physical treatment)

2.1.1.1 การดัดแปรทางเคมี

2.1.1.1.1 การทำอัลคาไลเซชัน (alkalization)

การดัดแปรสารตัวเติมเซลลูโลสด้วยการทำอัลคาไลเซชัน เป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างมากในช่วงที่ผ่านมา เนื่องจากมีขั้นตอนการทำที่ง่าย มีราคาถูกกว่าการดัดแปร

ชนิดอื่นๆ โดยวิธีนี้สามารถลดปริมาณลิกนิน (lignin) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และสิ่งสกปรกที่ปกคลุมพื้นผิวของสารตัวเติมเซลลูโลสได้ ส่งผลให้พื้นผิวของสารตัวเติมเซลลูโลสมีความสะอาดและมีความขรุขระมากขึ้น ทำให้สามารถยึดติดกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ด้วยกลไกการเชื่อมต่อกันทางกล (mechanical interlocking) ได้ดีขึ้น Liu, Mohanty, Drzal, Askel และ Misra (2004) ศึกษาผลของการทำอัลคาไลเซชันต่อโครงสร้างของเส้นใย ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อนของเส้นใยหญ้าพื้นเมือง (native grass fibers) โดยนำเส้นใยมาทำการตัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 2 4 8 และ 16 ชั่วโมง จากการทดสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (infrared spectroscopy) พบว่าหลังจากการทำอัลคาไลเซชันพีคของเฮมิเซลลูโลสที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2918 และ 1737 cm^{-1} และพีคของลิกนินที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1515 และ 1254 cm^{-1} ลดลง เนื่องจากการทำอัลคาไลเซชันสามารถกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้ โดยปริมาณเฮมิเซลลูโลสและลิกนินลดลง เมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการทำอัลคาไลเซชันเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลเซชันมีการแยกตัว (separation) เนื่องมาจากการที่ลิกนินบางส่วนและเฮมิเซลลูโลสถูกกำจัดออกไป ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จากผลการทดสอบทางความร้อนยังพบอีกว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลเซชันสามารถทนต่อความร้อนได้ดีกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการทำอัลคาไลเซชัน และเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการทำอัลคาไลเซชันเพิ่มขึ้น พบว่าเส้นใยมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (thermal decomposition temperature) เพิ่มขึ้น

Lopattananon, Panawarankul, Sahakaro และ Ellis (2006) ศึกษาผลของการทำอัลคาไลเซชันต่อโครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยใบสับปะรด (pineapple leaf fiber) โดยเส้นใยใบสับปะรดจะถูกตัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน คือ 1 3 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส จากการทดสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีพบว่าพีคของลิกนินที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1436 cm^{-1} และพีคของเฮมิเซลลูโลสที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1254 cm^{-1} ลดลง เนื่องมาจากการทำอัลคาไลเซชันสามารถกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกจากเส้นใยได้ ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron micrograph) แสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลเซชันมีการแยกตัวของเส้นใย เนื่องมาจากการที่ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสถูกกำจัดออกไปจากเส้นใย และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น พบว่าลิกนินและเฮมิเซลลูโลสจะถูกกำจัดออกไปจากเส้นใยในปริมาณที่มากขึ้น

Bwire, Christian และ Joseph (2007) ศึกษาผลของการทำอัลคาไลเซชันต่อองค์ประกอบทางเคมีของพงแกลบข้าว (rice husk) โดยพงแกลบข้าวถูกตัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน คือ 2 4 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 24

ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของผงแกลบข้าวพบว่าปริมาณลิกนินและเฮมิเซลลูโลสของผงแกลบข้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อถูกตัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร แสดงให้เห็นว่าทั้งลิกนินและเฮมิเซลลูโลสสามารถกำจัดออกได้ด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่สูงมากนัก

Edeerozey, Akil, Azhar และ Ariffin (2007) ศึกษาผลของการทำอัลคาไลเซชันต่อโครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยปอกระเจา (kenaf fiber) โดยเส้นใยถูกตัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 3 6 และ 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ยังศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำอัลคาไลเซชันโดยเส้นใยปอกระเจาถูกตัดแปรที่อุณหภูมิต่างกัน คือ อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส (ที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลเซชันที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีพื้นผิวของเส้นใยที่สะอาดมากที่สุด และค่าความต้านแรงดึง (tensile strength) ของเส้นใยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหลังผ่านการทำอัลคาไลเซชัน โดยสภาวะการทำอัลคาไลเซชันที่เหมาะสมที่สุดคือที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความต้านแรงดึงของเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลเซชันที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าเส้นใยที่ถูกเตรียมที่อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการทำความสะอาดพื้นผิวเส้นใยที่มีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิสูง

Hu และ Lim (2007) ได้ศึกษาผลของการทำอัลคาไลเซชันและปริมาณของเส้นใยต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยกัญชง (hemp fiber) กับพอลิแลคติกแอซิด เส้นใยกัญชงถูกตัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยการเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิตถูกเตรียมขึ้นจากเส้นใยกัญชงทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านตัดแปรด้วยวิธีการทำอัลคาไลเซชัน ที่ปริมาณของเส้นใย 30 35 40 45 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ลักษณะทางสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลเซชันมีการแยกตัวและมีขนาดเล็กลง เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสและลิกนินบางส่วนถูกกำจัดออกไประหว่างการทำอัลคาไลเซชัน นอกจากนี้ยังพบว่าสมบัติความต้านแรงดึง (tensile properties) และสมบัติความต้านแรงดัดโค้ง (flexural properties) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลเซชันมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยที่ไม่ผ่านการทำอัลคาไลเซชัน โดยสมบัติทางกลที่ดีที่สุดได้จากพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยกัญชงซึ่งผ่านการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

แสดงให้เห็นว่าการทำอัลคาไลเซชันช่วยให้การกระจายตัวของเส้นใยกันยูซงในพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ดีขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มแรงยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟสระหว่างเส้นใยกันยูซงและพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ได้ดีขึ้นด้วย

Tran, Ogihara, Nguyen และ Kobayashi (2011) ศึกษาผลของการทำอัลคาไลเซชันของเส้นใยมะพร้าว (coir fiber) ต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยมะพร้าวกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate, PBS) โดยเส้นใยมะพร้าวถูกตัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 24 48 72 และ 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ลักษณะทางสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่าการทำอัลคาไลเซชันสามารถเพิ่มความขรุขระของพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวได้ โดยพื้นผิวของเส้นใยมีความขรุขระมากที่สุดเมื่อผ่านการทำอัลคาไลเซชันเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ดังนั้นเส้นใยมะพร้าวที่ถูกตัดแปรด้วยสภาวะการทำอัลคาไลเซชันนี้ถูกนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงในพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเพื่อศึกษาผลของการทำอัลคาไลเซชันต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยมะพร้าวกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยปริมาณเส้นใยมะพร้าวที่ใช้คือ 10 15 20 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันมีค่าสมบัติความต้านแรงดึงและสมบัติความต้านแรงดัดโค้งดีกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันในทุกสัดส่วนการผสม เนื่องมาจากการทำอัลคาไลเซชันทำให้พื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวมีความขรุขระมากขึ้น ซึ่งช่วยให้แรงยึดติดระหว่างเส้นใยมะพร้าวและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผ่านกลไกแบบการเชื่อมต่อกันทางกลดีขึ้น จึงส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตสูงขึ้น

Qian, Mao, Sheng, Lu, Luo และ Hou (2013) ศึกษาผลของการทำอัลคาไลเซชันของผงไม้ไผ่ (bamboo particles) ต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้ไผ่กับพอลิแลคติกแอซิด ผงไม้ไผ่ถูกตัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ (molar) ในเวลาที่ต่างกันคือ 0.25 0.5 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 24 ชั่วโมง จากนั้นพอลิเมอร์คอมโพสิตถูกเตรียมจากผงไม้ไผ่ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงไม้ไผ่ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลจากการทดสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีพบว่าหลังจากการทำอัลคาไลเซชันเป็นเวลา 3 ชั่วโมง พิกที่ตำแหน่งเลขคลื่น $3428\ 2919$ และ $1736\ \text{cm}^{-1}$ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เป็นผลเนื่องมาจากเฮมิเซลลูโลสและลิกนินถูกกำจัดออกจากผงไม้ไผ่ระหว่างการทำอัลคาไลเซชัน ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของผงไม้ไผ่ที่แสดงให้เห็นว่าปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อตัดแปรผงไม้ไผ่ด้วยวิธีการทำอัลคาไลเซชันเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาในการทำอัลคาไลเซชันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สิ่งสกปรกที่อยู่บนพื้นผิวของผงไม้ไผ่ถูกกำจัดออกไป

มากขึ้น อีกทั้งความขรุขระของพื้นผิวของผงไม้ไผ่ยังเพิ่มขึ้นอีกด้วย โดยบริเวณพื้นผิวที่เฉพาะเจาะจง (specific surface area) ของผงไม้ไผ่มีค่าสูงสุดเมื่อผ่านการทำอัลคาไลเซชันเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้การยึดติดกันระหว่างผงไม้ไผ่กับพอลิแลคติกแอซิดผ่านกลไกแบบการเชื่อมต่อกันทางกลดีขึ้น จึงส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยผงไม้ไผ่ที่ผ่านการทำอัลคาไลเซชันมีค่าสูงขึ้น

2.1.1.1.2 การทำไซลาไนเซชัน (silanization)

การทำไซลาไนเซชันหรือการใช้ตัวเชื่อมประสานไซเลน (silane coupling agent) เป็นการปรับปรุงความเข้ากันได้ที่บริเวณอินเทอร์เฟซด้วยการให้ไซเลนเป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยด้านหนึ่งของตัวเชื่อมประสานไซเลนเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์เมทริกซ์ และอีกด้านหนึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้กับสารตัวเติมเซลลูโลส จึงช่วยให้แรงยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์เมทริกซ์ดีขึ้น Pilla, Gong, O'Neill, Rowell และ Krzysik (2008) ศึกษาผลของการทำไซลาไนเซชันของผงไม้สน (pine wood flour) ต่อสมบัติทางกลและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้สนกับพอลิแลคติกแอซิด โดยผงไม้สนถูกตัดแปรด้วย 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไซเลนชนิดแกมมา-เมทาคริลอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (γ -methacryloxypropyltrimethoxysilane) จากนั้นพอลิเมอร์คอมโพสิตถูกเตรียมจากผงไม้สนทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านตัดแปรด้วยวิธีการทำไซลาไนเซชันที่ปริมาณผงไม้ 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษาพบว่าค่ามอดูลัสแรงดึง (tensile modulus) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงไม้สนที่ไม่ผ่านตัดแปรด้วยการทำไซลาไนเซชันเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลง แต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยผงไม้สนที่ผ่านการทำไซลาไนเซชันมีสมบัติความต้านแรงดึงดีขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่แสดงให้เห็นกระจายตัวของผงไม้สนที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำไซลาไนเซชันที่ดีในพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ และการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ดี จึงส่งผลทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติความต้านแรงดึงที่ดีขึ้น

Jandas, Mohanty, Nayak และ Srivastava (2011) ศึกษาผลของการทำไซลาไนเซชันของเส้นใยกล้วย (banana fiber) ต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยกล้วยกับพอลิแลคติกแอซิด โดยเส้นใยกล้วยถูกตัดแปรด้วย 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของไซเลนชนิด 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-aminopropyltriethoxysilane, APS) หรือ บิส-(3-ไตรเอทอกซีซิลโพรพิล)เตตราซัลเฟน (bis-(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfane, Si69) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และพอลิเมอร์คอมโพสิตถูกเตรียมจากเส้นใยกล้วยทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านตัดแปรด้วยวิธีการทำไซลาไนเซชันที่ปริมาณเส้นใย 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบด้วยเทคนิคอินฟา

เรดสเปกโตรสโคปีพบว่าเส้นใยที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำไซลาไนเซชันแสดงพีคใหม่ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 784 และ 713 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของพันธะ Si-C และ Si-O-Si ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงของพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1105 และ 1161 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของพันธะ Si-O-Si และ Si-O-C ตามลำดับ ซึ่งพันธะ Si-O-Si แสดงให้เห็นว่าเกิดโพลีไซลอกเซน (polysiloxanes) ที่บริเวณผิวหน้าของเส้นใย และพันธะ Si-O-C ยืนยันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารเชื่อมประสาน ไซเลนกับตัวเส้นใย ซึ่งพันธะเหล่านี้ช่วยเพิ่มความสามารถในการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยกล้วยและพอลิแลคติกแอซิด ส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตดีขึ้น โดยการทำไซลาไนเซชันด้วยไซเลนชนิด Si69 สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยกล้วยกับพอลิแลคติกแอซิดได้ดีกว่าการใช้ไซเลนชนิด APS เนื่องจากหมู่เอทออกซี (ethoxy group) ของไซเลนชนิด Si69 สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกับหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) ของสารตัวเติมเซลลูโลส ส่งผลให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิแลคติกแอซิดได้ดีขึ้น ทำให้แรงยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ดีขึ้น

Chun, Husseinsyah และ Osman (2012) ศึกษาผลการตัดแปรพื้นผิวของผงกะลามะพร้าว (coconut shell powder) ด้วยการทำไซลาไนเซชันต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงกะลามะพร้าวกับพอลิแลคติกแอซิด โดยผงกะลามะพร้าวถูกตัดแปรด้วย 3 เฟอร์เซนต์โดยปริมาตรของไซเลนชนิด 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-aminopropyltriethoxysilane, 3-APE) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงกะลามะพร้าวกับพอลิแลคติกแอซิดที่ปริมาณผงกะลามะพร้าวต่างกันคือ 15 30 45 และ 60 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ (part per hundred of resin, phr) ถูกเตรียมขึ้น จากผลการศึกษาสมบัติความต้านแรงดึงพบว่าค่าความต้านแรงดึงและค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเมื่อปริมาณผงกะลามะพร้าวเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่ามอดูลัสแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ค่าความต้านแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับผงกะลามะพร้าวที่ผ่านการตัดแปรพื้นผิวด้วยการทำไซลาไนเซชันมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับผงกะลามะพร้าวที่ไม่ผ่านการตัดแปรพื้นผิวด้วยการทำไซลาไนเซชันในทุกสัดส่วนการผสม เนื่องจากการทำไซลาไนเซชันสามารถเพิ่มแรงยึดติดระหว่างผงกะลามะพร้าวและพอลิแลคติกแอซิดให้ดีขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จึงส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น

Strubar Iii, Pilla, Wright, Ryan, Greene, Frank และ Billington (2012) ศึกษาผลของการทำไซลาไนเซชันต่อสมบัติทางกลและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิไฮดรอกซีบิวทิเลต-โค-พอลิไฮดรอกซีวาเลอเรต (poly(hydroxybutyrate)-co-poly(β -

hydroxyvalerate), PHBV) กับผงไม้โอ๊ค (oak wood flour) โดยผงไม้โอ๊คถูกตัดแปรด้วยไซเลนชนิดไตรเมทอกซี(ออกตะเดซิล)-ไซเลน (trimethoxy(octadecyl)-silane) จากนั้นพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้โอ๊คและพอลิไฮดรอกซีบิวทิลเลต-โค-พอลิไฮดรอกซีวาเลอเรตถูกเตรียมขึ้นที่ปริมาณผงไม้โอ๊ค 10 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากผลการศึกษาระดับความต้านแรงดึงพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากผงไม้โอ๊คที่ผ่านการทำให้ไซลาในเซชันมีความแข็งแรงดึงมากกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากผงไม้โอ๊คที่ไม่ผ่านการทำให้ไซลาในเซชัน นอกจากนี้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่ามีการยึดติดที่ติระหว่างผงไม้โอ๊คกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ เนื่องมาจากตัวเชื่อมประสานไซเลนสามารถเกิดปฏิกิริยาได้กับหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) ของสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้การกระจายตัวของผงไม้โอ๊คในพอลิไฮดรอกซีบิวทิลเลต-โค-พอลิไฮดรอกซีวาเลอเรตเมทริกซ์ดีขึ้น และทำให้การยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟสระหว่างผงไม้โอ๊คและพอลิเมอร์เมทริกซ์ดีขึ้น

2.1.1.2 การตัดแปรทางกายภาพ

2.1.1.2.1 การตัดแปรด้วยความร้อน (heat treatment)

การตัดแปรพื้นผิวสารตัวเติมเซลลูโลสด้วยความร้อน เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการช่วยเพิ่มแรงยึดติดระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์เมทริกซ์ อีกทั้งยังเป็นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่ต้องใช้สารเคมีในกระบวนการตัดแปรพื้นผิวสารตัวเติมเซลลูโลส Rong, Zhang, Liu, Yang และ Zeng (2001) ศึกษาผลของการตัดแปรด้วยความร้อนต่อลักษณะโครงสร้างและสมบัติความต้านแรงดึงของเส้นใยป่านสรนารายณ์ (sisal fiber) โดยเส้นใยป่านสรนารายณ์ถูกนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากผลการทดสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี พบว่าการตัดแปรด้วยความร้อนทำให้พีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1650 cm^{-1} ลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการกำจัดอะโรมาติกกลินบางส่วนออกจากเส้นใยระหว่างการตัดแปรด้วยความร้อน นอกจากนี้ยังพบว่า การตัดแปรด้วยความร้อนสามารถปรับปรุงค่าความต้านแรงดึงและค่ามอดุลัสแรงดึงของเส้นใยให้สูงขึ้นได้ เนื่องจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในโครงสร้างของเส้นใยที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ความเป็นผลึก (crystallinity) ของเส้นใยเพิ่มขึ้น

Ochi (2006) ศึกษาผลของการตัดแปรด้วยความร้อนต่อสมบัติทางกลของเส้นใยป่านมินดา (Manila hemp fiber) โดยเส้นใยป่านมินดาถูกตัดแปรด้วยความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างกันคือ 160 180 และ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 30 60 และ 120 นาที จากผลการศึกษาระดับทางกลพบว่าค่าความต้านแรงดึงของเส้นใยที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส มีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อให้ระยะเวลาในการให้ความร้อนมากขึ้น เช่นเดียวกับการตัดแปรเส้นใยด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ที่ค่าความต้านแรงดึงของเส้นใยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อน แต่อย่างไร

ก็ตามค่าความต้านแรงดึงของเส้นใยที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีค่าลดลงเมื่อให้ระยะเวลาในการให้ความร้อนมากขึ้น เนื่องจากเกิดการเสื่อมสลายของเส้นใยระหว่างการให้ความร้อน

Hakkou, Petrissana, Zoulalian และ Gerardin (2005) ศึกษาผลของการตัดแปรเส้นใยไม้ (wood fiber) ด้วยความร้อนต่อความสามารถในการเวท (wettability) โดยเส้นใยไม้ถูกนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันระหว่าง 20 ถึง 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ผลจากการทดสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี พบว่าการตัดแปรด้วยความร้อนทำให้พื้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1730 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคคาร์บอนิลของเฮมิเซลลูโลสลดลง และเส้นใยไม้มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) มากขึ้น หลังจากผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนที่อุณหภูมิช่วง 130 ถึง 160 องศาเซลเซียส

2.1.1.2.2 การตัดแปรโดยใช้โคโรนา (corona treatment)

การตัดแปรสารตัวเติมเซลลูโลสโดยใช้พลังงานโคโรนาสามารถช่วยเพิ่มพลังงานพื้นผิวอิสระขององค์ประกอบที่มีขั้วที่อยู่ภายในสารตัวเติมเซลลูโลสได้ โดยการเพิ่มปริมาณของหมู่คาร์บอนิลและหมู่ไฮดรอกซิล Gassan, Gutowski และ Bledzki (2000) ศึกษาผลของการตัดแปรโดยใช้โคโรนาต่อลักษณะ (characteristic) ของเส้นใยปอ (jute fiber) โดยเส้นใยถูกตัดแปรโดยใช้โคโรนาที่ปริมาณพลังงานต่างกันคือ 103 133 และ 200 มิลลิจูลต่อตารางมิลลิเมตร (mJ/mm^2) พบว่าการตัดแปรโดยใช้โคโรนาเพิ่มความชื้นของเส้นใยได้ โดยการเพิ่มปริมาณของหมู่คาร์บอนิลและหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มแรงยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าพลังงานพื้นผิวอิสระและสมบัติการเวท (wetting) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณพลังงานโคโรนาที่ใช้ในการตัดแปรไปจนถึง 133 มิลลิจูลต่อตารางมิลลิเมตร และมีแนวโน้มคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณพลังงานโคโรนา

Ragoubi, George, Molina, Bienaimé, Merlin, Hiver และ Dahoun (2012) ศึกษาผลของการตัดแปรโดยใช้โคโรนาต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยหญ้ามีสแคนทัส (miscanthus fiber) กับพอลิแลคติกแอซิด จากการศึกษพบว่า การตัดแปรโดยใช้โคโรนาทำให้เกิดการออกซิเดชันที่บริเวณพื้นผิว (surface oxidation) และการกัด (etching) ที่บริเวณพื้นผิวของเส้นใย นอกจากนี้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่าการตัดแปรเส้นใยโดยใช้โคโรนาสามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยหญ้ามีสแคนทัสกับพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ให้ดีขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าความต้านแรงดึงและค่ามอดุลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ผ่านการตัดแปรโดยใช้โคโรนามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analysis, TGA) ยังแสดง

ให้เห็นว่าการดัดแปรเส้นใยโดยใช้โคโรนาทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีความเสถียรต่อความร้อนเพิ่มขึ้น

2.1.2 การดัดแปรเมทริกซ์

การดัดแปรเมทริกซ์มีหลักการที่สำคัญ คือการกราฟท์หมู่ฟังก์ชันที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาบนสายโซ่หลักของพอลิเมอร์เมทริกซ์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์เมทริกซ์ให้ดีขึ้น Arbelaz, Fernández, Valea และ Mondragon (2006) ศึกษาผลการดัดแปรเมทริกซ์ต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยลินิน (flax fiber) กับพอลิคาโพลแลคโตน (polycaprolactone, PCL) ซึ่งพอลิคาโพลแลคโตนเมทริกซ์ถูกดัดแปรโดยการกราฟท์ด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride, MA) โดยใช้ไดคิวมีลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide, DCP) เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา จากผลการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยลินินกับพอลิคาโพลแลคโตนเมทริกซ์ที่ผ่านการดัดแปร มีค่าสมบัติความต้านแรงดึงและสมบัติความต้านแรงดัดโค้งสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิคาโพลแลคโตนเมทริกซ์ที่ไม่ผ่านการดัดแปร เป็นผลเนื่องมาจากการเกิดพันธะเคมีระหว่างหมู่แอนไฮไดรด์ (anhydride group) ของพอลิคาโพลแลคโตนเมทริกซ์ที่ผ่านการดัดแปรกับหมู่ไฮดรอกซิลของเส้นใยลินิน ทำให้การยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซดีขึ้นและส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทความเค้น (stress transfer) ที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมและเมทริกซ์มีประสิทธิภาพดีขึ้น และทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น ซึ่งการยึดติดที่ดีระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ผ่านการดัดแปรนี้สามารถยืนยันได้ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

Wu (2011) ศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต (polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) ที่ไม่ผ่านการดัดแปรและผ่านการดัดแปรด้วยอะคริลิกแอซิด (acrylic acid, AA) โดยใช้เส้นใยปานสรนารายณ์เป็นสารเสริมแรง พบว่าค่าความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์กับพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ไม่มีการดัดแปร มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากการกระจายตัวที่ไม่ดีของเส้นใยในพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ไม่มีการดัดแปร แต่อย่างไรก็ตามสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยปานสรนารายณ์กับพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่มีการดัดแปร โดยเฉพาะค่าความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเกิดพันธะเอสเทอร์ (ester bond) ที่มาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในเส้นใยปานสรนารายณ์กับหมู่คาร์บอกซิลในพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเมทริกซ์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยอะคริลิกแอซิด ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี และลักษณะทางสัณฐาน

วิทยายังแสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวของเส้นใยที่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ผ่านการตัดแปรร และมีการยึดติดบริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ผ่านการตัดแปรรที่ดีขึ้น

2.1.3 การใส่สารช่วยให้เข้ากัน

การใส่สารช่วยให้เข้ากันลงในพอลิเมอร์คอมโพสิต สามารถช่วยให้องค์ประกอบในพอลิเมอร์คอมโพสิตมีความเข้ากันได้เพิ่มขึ้น โดยสารช่วยให้เข้ากันจะเข้าไปอยู่ที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้มีแรงยึดติดที่ดี ส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติทางกลดีขึ้น Lee and Wang (2006) ศึกษาผลของการใช้สารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยไผ่ (bamboo fiber) กับพอลิแลคติกแอซิด โดยใช้ไลซีนไดไอโซไซยาเนต (lysine diisocyanate, LDI) เป็นสารช่วยให้เข้ากัน พบว่าค่าความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารช่วยให้เข้ากัน เป็นผลเนื่องมาจากไลซีนไดไอโซไซยาเนต สามารถเพิ่มแรงยึดติดระหว่างเส้นใยไผ่กับพอลิแลคติกแอซิดให้ดีขึ้นได้

Chen, Liu, Cooke, Hicks และ Zhang (2008) ศึกษาผลของการใช้สารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างกากชูการ์บีท (sugar beet pulp) กับพอลิแลคติกแอซิด โดยพอลิเมอร์ ไลฟีนิลมีเทน ไดไอโซไซยาเนต (polymeric diphenylmethane diisocyanate, pMDI) ถูกใช้เป็นสารช่วยให้เข้ากัน พบว่าสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อใช้พอลิเมอร์ ไลฟีนิลมีเทน ไดไอโซไซยาเนต ปรับปรุงความเข้ากันได้ และค่าความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณของสารช่วยให้เข้ากันเพิ่มขึ้นจาก 0.5 ไปยัง 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าสารช่วยให้เข้ากันสามารถเพิ่มแรงยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างกากชูการ์บีทกับพอลิแลคติกแอซิดให้ดีขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทความเค้นระหว่างสารตัวเติมและเมทริกซ์มีประสิทธิภาพดีขึ้น และทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น

Petinakis, Yu, Edward, Dean, Liu และ Scully (2009) ทำการศึกษาผลของการใช้เมทิลีนไดฟีนิล-ไดไอโซไซยาเนต (methylene diphenyl-diisocyanate, MDI) เป็นสารช่วยให้เข้ากันในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้ (wood flour) กับพอลิแลคติกแอซิด โดยพบว่าการเติมเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยาเนตลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตส่งผลให้ค่าความต้านแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมทิลีนไดฟีนิล-ไดไอโซไซยาเนตสามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์เมทริกซ์ให้ดีขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิต จึงส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้น

2.2 การปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิต

การปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทำพลาสติกไซเซชัน และการเติมพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงลงในพอลิเมอร์คอมโพสิต เป็นต้น

2.2.1 การปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยการทำพลาสติกไซเซชัน

พลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) นิยมใช้ในการปรับปรุงความเหนียวในพอลิเมอร์ อีกทั้งยังสามารถทำหน้าที่เป็นสารปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูป (processability) เนื่องจากพลาสติกไซเซอร์สามารถลดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ลงได้ ทำให้สายโซ่มีความยืดหยุ่นและเคลื่อนที่ได้ง่ายมากขึ้น Haq, Burgueño, Mohanty และ Misra (2008) ปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยกับพอลิเอสเตอร์เรซินแบบไม่อิ่มตัว (unsaturated polyester, UPE) โดยใช้น้ำมันอีพอกซิไคซ์ซอຍบีน (epoxidized soybean oil) เป็นพลาสติกไซเซอร์ พอลิเมอร์คอมโพสิตถูกเตรียมที่สัดส่วนการผสมระหว่างพอลิเอสเตอร์เรซินแบบไม่อิ่มตัวกับน้ำมันอีพอกซิไคซ์ซอຍบีน 100/0 90/10 และ 80/20 โดยใช้ปริมาณเส้นใยกันเท่ากันที่ 21 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ขึ้นอยู่กับน้ำหนักรวมของพอลิเมอร์คอมโพสิต) จากผลการศึกษพบว่า การเติมพลาสติกไซเซอร์สามารถเพิ่มความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตได้ สังกัดได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดและค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact strength) ของพอลิเมอร์คอมโพสิต ภายหลังจากเติมพลาสติกไซเซอร์ โดยค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดและค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตนี้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อใช้น้ำมันอีพอกซิไคซ์ซอຍบีนในปริมาณที่มากขึ้น ลักษณะเช่นนี้แสดงให้เห็นว่าน้ำมันอีพอกซิไคซ์ซอຍบีนสามารถลดแรงกระทำระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ จึงช่วยให้สายโซ่พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นสูงขึ้นและเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ความแข็งดึงและความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าลดลงเมื่อใช้ปริมาณน้ำมันอีพอกซิไคซ์ซอຍบีนมากขึ้น

Li, Zhou และ Pei (2011) ศึกษาผลของการใช้โพลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol, PEG) เป็นพลาสติกไซเซอร์ เพื่อปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านศรนารายณ์กับพอลิแลคติกแอซิด พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อใช้โพลิเอทิลีนไกลคอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ เนื่องจากโพลิเอทิลีนไกลคอลลดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่พอลิแลคติกแอซิด ส่งผลให้สายโซ่พอลิแลคติกแอซิดมีความยืดหยุ่นและเคลื่อนที่ได้ดีมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านแรงดัดโค้งและค่ามอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตที่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์

2.2.2 การปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยการเติมพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง

โดยทั่วไปแล้วการปรับปรุงความเหนียวด้วยวิธีการผสม (blending) เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและสะดวกในเชิงอุตสาหกรรม โดยนิยมใช้พอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงทั้งที่ย่อยสลายได้และย่อยสลายไม่ได้ทางชีวภาพมาปรับปรุงความเหนียวให้กับพอลิเมอร์คอมโพสิต Liu, Wu, Han, Yao, Kojima และ Suzuki (2008) ศึกษาสมบัติทางกลและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยไผ่กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยสารเพิ่มความเหนียวต่างชนิดกัน คือ เอทิลีนโพรพิลีนอิลาสโตเมอร์กิ่งฟลิกกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ (semicrystalline ethylene-propylene elastomers grafted maleic anhydride, sEPR-g-MA) เอทิลีนโพรพิลีนอิลาสโตเมอร์ออสันฐานกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ (amorphous ethylene-propylene elastomers grafted maleic anhydride, aEPR-g-MA) และพอลิเอทิลีนกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) โดยปริมาตรสารเพิ่มความเหนียวถูกใช้อยู่ในช่วง 0 ถึง 8.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ขึ้นอยู่กับน้ำหนักรวมของพอลิเมอร์คอมโพสิต) ในขณะที่สัดส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับเส้นใยไผ่คงที่ที่ 60/40 จากผลการศึกษาพบว่า สารเพิ่มความเหนียวชนิดพอลิเอทิลีนกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์หรือเอทิลีนโพรพิลีนอิลาสโตเมอร์กิ่งฟลิกกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์สามารถปรับปรุงค่าความต้านแรงดึง ค่าความต้านแรงดัดโค้ง และค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตให้สูงขึ้นได้ โดยค่าความต้านแรงดึงและค่าความต้านแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาตรสารเพิ่มความเหนียวไปจนถึง 2.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นมีแนวโน้มค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มปริมาตรสารเพิ่มความเหนียวมากกว่า 2.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในกรณีที่ใช้เอทิลีนโพรพิลีนอิลาสโตเมอร์ออสันฐานกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์เป็นสารเพิ่มความเหนียว ส่งผลทำให้ค่าความต้านแรงดึงและค่าความต้านแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลง และสามารถปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตได้เพียงระดับปานกลางเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้ปรับปรุงความเหนียว โดยค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเอทิลีนโพรพิลีนอิลาสโตเมอร์ออสันฐานกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้นไปจนถึง 2.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นจะลดลงอย่างต่อเนื่อง

Petinakis, Yu, Edward, Dean, Liu และ Scully (2009) ศึกษาผลการใช้พอลิเอทิลีนอะคริลิกแอซิด (poly(ethylene-acrylic acid)) เพื่อเป็นสารเพิ่มความเหนียวในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้และพอลิแลคติกแอซิด โดยพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตถูกเตรียมที่ปริมาณผงไม้ 5 10 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณพอลิเอทิลีนอะคริลิกแอซิด 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษาพบว่าค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดและค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์

คอมโพสิตระหว่างผงไม้และพอลิแลคติกแอซิดเพิ่มขึ้นเมื่อเติมพอลิเอทิลีนอะคริติกแอซิดเพื่อเป็นสารเพิ่มความเหนียว เป็นผลเนื่องมาจากพอลิเอทิลีนอะคริติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง จึงส่งผลให้เกิดการเสียรูปแบบพลาสติกในพอลิเมอร์เมทริกซ์มากขึ้น อย่างไรก็ตามค่าความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่มีการปรับปรุงความเหนียว เนื่องมาจากความไม่เข้ากันขององค์ประกอบในพอลิเมอร์คอมโพสิต

Jiang และ Qin (2006) ศึกษาผลของการใช้พอลิเอทิลีนออกทีนอีลาสโตเมอร์ (polyethylene octene elastomer, POE) เป็นสารเพิ่มความเหนียวในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้กับพอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) โดยใช้ปริมาณพอลิเอทิลีนออกทีนอีลาสโตเมอร์ 15 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณผงไม้คงที่ที่ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกแบบมีรอยบาก (notched impact strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนออกทีนอีลาสโตเมอร์เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณพอลิเอทิลีนออกทีนอีลาสโตเมอร์ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกแบบมีรอยบากได้ถึง 61 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิเอทิลีนออกทีนอีลาสโตเมอร์ เป็นผลเนื่องมาจากพอลิเอทิลีนออกทีนอีลาสโตเมอร์สามารถต้านการขยายตัวของรอยแตก (crack propagation) ระหว่างการทดสอบ แต่อย่างไรก็ตามสมบัติความต้านแรงดึงและสมบัติความต้านแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเล็กน้อยตามปริมาณของพอลิเอทิลีนออกทีนอีลาสโตเมอร์ที่เพิ่มขึ้น

Lee (2009) ศึกษาผลการปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้ไผ่ (bamboo flour) กับพอลิแลคติกแอซิดด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต โดยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตถูกใช้ที่ปริมาณ 5 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณผงไม้ไผ่ 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษพบว่าค่าความต้านแรงดึง ค่าความต้านแรงดัดโค้ง และค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเมื่อปริมาณผงไม้ไผ่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเติมพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตสามารถปรับปรุงความสามารถในการแตกหักแบบเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้ไผ่กับพอลิแลคติกแอซิดได้ โดยสังเกตได้จากค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เพิ่มขึ้นภายหลังการเติมพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพื่อเป็นสารเพิ่มความเหนียว

Liu, Yu, Yu, Zhao, Lu และ Wang (2012) ศึกษาผลของการปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับเส้นใยบาสัลต์ (basalt fiber) ด้วยสารเพิ่มความเหนียวต่างกัน 3 ชนิด คือ พอลิออกซีเอทิลีนกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ (polyoxy-ethylene grafted maleic anhydride, POE-g-MAH) เอทิลีน-โพรพิลีน-ไดอีนรับเบอร์กราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ (ethylene-propylene-diene rubber grafted maleic anhydride, EPDM-g-MAH) และเอทิลีน-อะคริเลต-ไกลซีดิล

เมทาคริเลตโคพอลิเมอร์ (ethylene-acrylate-glycidyl methacrylate copolymer, EAGMA) จากผลการศึกษพบว่าเอทิลีน-อะคริเลต-ไกลซิเดิลเมทาคริเลตโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับเส้นใยบาสซัลที่ได้ดีกว่าพอลิออกซีเอทิลีนกราฟท์มาลีอิกแอนไฮไดรด์และเอทิลีน-โพรพิลีน-ไดอีนรับเบอร์กราฟท์มาลีอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากเอทิลีน-อะคริเลต-ไกลซิเดิลเมทาคริเลตโคพอลิเมอร์มีความเข้ากันได้กับพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยบาสซัลที่ดีกว่าสารเพิ่มความเหนียวอีกสองชนิด จึงทำให้มีการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟสดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตดีขึ้นด้วย โดยปริมาณเอทิลีน-อะคริเลต-ไกลซิเดิลเมทาคริเลตโคพอลิเมอร์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สามารถปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตได้ดีที่สุด

Goriparthi, Suman และ Nalluri (2012) ศึกษาผลของการปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิคาร์โปลาแลคโตนต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกและค่าการกระจายพลังงาน (damping capacity) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับเส้นใยปอ โดยพอลิเมอร์คอมโพสิตถูกเตรียมที่สัดส่วนระหว่างพอลิแลคติกแอซิด พอลิคาโปลาแลคโตน และเส้นใยปอ 50/0/50 45/5/50 40/10/50 และ 35/15/50 จากผลการศึกษพบว่า การเติมพอลิคาโปลาแลคโตนลงในพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตสามารถปรับปรุงค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกและค่าการกระจายพลังงานของพอลิเมอร์คอมโพสิตได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณพอลิคาโปลาแลคโตน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณที่เหมาะสมซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกและค่าการกระจายพลังงานของพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยที่ความแข็งตั้งและความแข็งแรงของพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่ลดลงมากนัก

Qiang, Yu และ Gao (2012) ศึกษาผลของการปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับผงไม้ด้วยพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoates, PHAs) โดยพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิด ผงไม้ และพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตถูกเตรียมขึ้นที่สัดส่วนต่างๆ คือ 80/20/0 65/10/25 55/20/25 และ 45/30/25 จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อเติมพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตเป็นสารเพิ่มความเหนียวในพอลิเมอร์คอมโพสิต สามารถเปลี่ยนพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะ (brittle fracture) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตเป็นพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียว (ductile fracture) ได้ และมีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานทดสอบภายหลังการแตกหัก (fractured surface) ที่มีความขรุขระมากกว่าพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่มีการปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต

บทที่ 3

วัสดุและการทดลอง

3.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วยพอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) เกรด 3052D จากบริษัทเนเจอร์เวิร์ค (Nature Works LLC) พงจีเลื่อยชนิดไม้ตะเคียนทอง (*Hopea odorata* Roxb) จากโรงเลื่อยไม้แปรรูปปิยรัตน์ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา พอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต (*polybutylene adipate-co-terephthalate*, PBAT) เกรด Ecoflex FBX 7011 จากบริษัท บีเอเอสเอฟ จำกัด (BASF Co., Ltd) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) จากบริษัท อิตาลีมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด (Italmar (Thailand) Co., Ltd) มาลิกอนไฮไดรด์ (maleic anhydride, MA) และเปอร์ออกไซด์ชนิด 2,5 บิส(เทอ-บิวทิลเพอออกซิ)-2,5 ไดเมทิลเฮกเซน (2,5-bis(tert-butyl peroxy)-2,5 dimethylhexane, Luperox 101) จากบริษัท ซิกม่า-แอลดิค (Sigma-Aldrich)

3.2 การทดลอง

3.2.1 การเตรียมผงจีเลื่อย

คัดแยกผงจีเลื่อยที่มีขนาดอยู่ในช่วง 300-425 ไมครอน (μm) นำผงจีเลื่อยไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้เป็นผงจีเลื่อยที่ยังไม่ผ่านการตัดแปร (untreated sawdust, UT) จากนั้นนำผงจีเลื่อยนี้มาผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการทำอัลคาไลเซชัน (alkalization) โดยการนำผงจีเลื่อยแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำเส้นใยไปล้างด้วยน้ำจนได้สารละลายที่เป็นกลาง และนำผงจีเลื่อยไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้เป็นผงจีเลื่อยที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการทำอัลคาไลเซชัน (alkali treated sawdust, AT)

3.2.2 การเตรียมสารช่วยให้เข้ากัน

พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกอนไฮไดรด์ (poly(lactic acid) grafted with maleic anhydride, PLA-g-MA) ถูกเตรียมโดยใช้เครื่องบดผสมภายใน (internal mixer, Hakke Rheomix 3000P) ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที โดยปริมาณมาลิกอนไฮไดรด์ที่ใช้คือ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณเปอร์ออกไซด์ที่ใช้คือ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [Teamsinsungvon, 2010]

3.2.3 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต

พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงจีเลื่อยเตรียมที่ปริมาณผงจีเลื่อย 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยผงจีเลื่อยที่ให้อยู่ในรูปของผงจีเลื่อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่าน

การตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชัน การผสมเตรียมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder, Brabender DSE 35/17D) และขึ้นทศสอบขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีด (injection molding machine, Chuan Lih Fa CLF 80T)

เมื่อพิจารณาสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตเปรียบเทียบระหว่างผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อย่างต่าง ๆ อัตราส่วนระหว่างผงซีลี้อยู่และพอลิแลคติกแอซิดที่ทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติทางกลที่เหมาะสมที่สุดนำไปใช้ในการศึกษาผลของการปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณ 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การผสมเตรียมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และขึ้นทศสอบเตรียมด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบฉีด

จากการพิจารณาสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่เหมาะสมจะนำไปศึกษาผลของปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ โดยปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้คือ 3 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การผสมเตรียมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และขึ้นทศสอบเตรียมด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบฉีด

3.2.4 การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต

3.2.4.1 สมบัติทางกล (mechanical properties)

การทดสอบสมบัติความต้านแรงดึง (tensile properties) ทำตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยใช้เครื่อง universal testing machine (Instron, 5565) ขนาดของเซลล์รับแรง (load cell) คือ 5 กิโลนิวตัน (kN) ความยาวของเกท (gauge length) คือ 50 มิลลิเมตร (mm) และความเร็วในการดึง คือ 5 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)

การทดสอบสมบัติความต้านแรงดัดโค้ง (flexural properties) ทำตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยใช้เครื่อง universal testing machine (Instron, 5565) ขนาดของเซลล์รับแรง คือ 5 กิโลนิวตัน ระยะห่างระหว่างจุดรองรับที่ปลายทั้งสองด้าน (span length) คือ 53 มิลลิเมตร และความเร็วในการทดสอบ คือ 1.4 มิลลิเมตรต่อนาที

การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact properties) ทำตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยใช้เครื่อง impact testing machine (Atlas, BPI) และพลังงานการกระแทก (impact energy) ที่ใช้ในการทดสอบ คือ 2.7 จูล (J) โดยไม่ต้องทำรอยบากที่ขึ้นทศสอบ

3.2.4.2 สมบัติทางความร้อน (thermal properties)

อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อน (thermal decomposition temperature) วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง thermogravimetric analyzer (Perkin Elmer, SDT 2960) ที่อุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 600 ถึง 600 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน คือ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะไนโตรเจน

3.2.4.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา (morphological properties)

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (tensile fractured surface) และ/หรือ พื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact fractured surface) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตศึกษาด้วยเครื่อง scanning electron microscope (JEOL, JCM6010) ที่ 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) โดยพื้นผิวของชิ้นงานเคลือบด้วยทองคำก่อนนำไปศึกษา



บทที่ 4

วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลของการทำอัลคาไลเซชันและปริมาณผงซีลี้อยู่ต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่

4.1.1 สมบัติทางกล (mechanical properties)

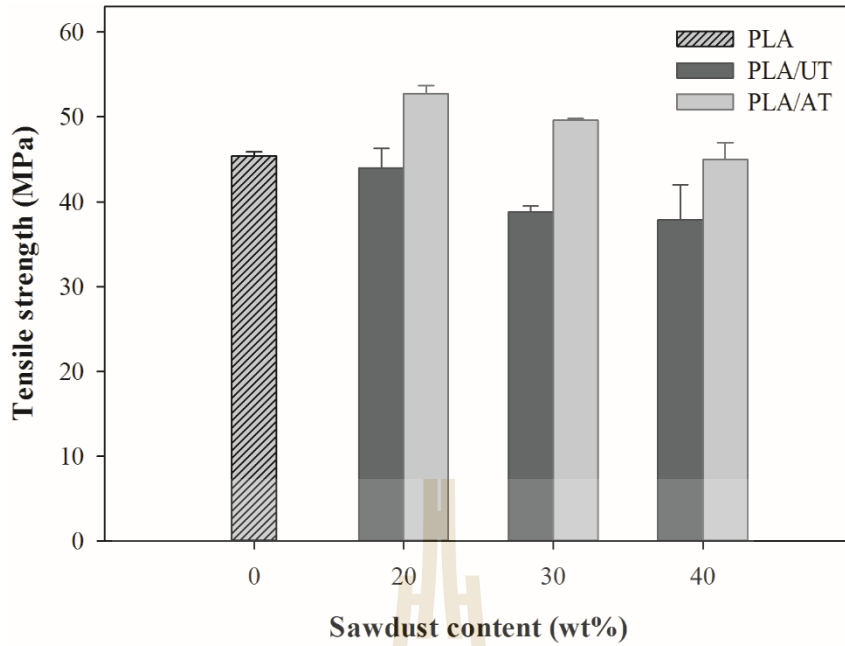
4.1.1.1 สมบัติความต้านแรงดึง (tensile properties)

สมบัติความต้านแรงดึงของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อยู่ต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อเติมผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันลงไปในพอลิแลคติกแอซิดทำให้ค่าความต้านแรงดึง (tensile strength) และค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาด (elongation at break) ของพอลิแลคติกแอซิดลดลง ในขณะที่ค่ามอดุลัสแรงดึง (tensile modulus) เพิ่มขึ้น ค่าความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันเพิ่มขึ้นจาก 20 ไปยัง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูป 4.1 ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการกระจายตัวของผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันในพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ไม่ดี และการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันกับพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ที่ต่ำ โดยสามารถยืนยันได้ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชัน (รูปที่ 4.9 (a)-(c)) ซึ่งแสดงให้เห็นการรวมกลุ่มกัน (agglomeration) ของผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชัน และการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ไม่ดี (รูปที่ 4.10 (a)-(c)) ส่งผลให้ค่าความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลง

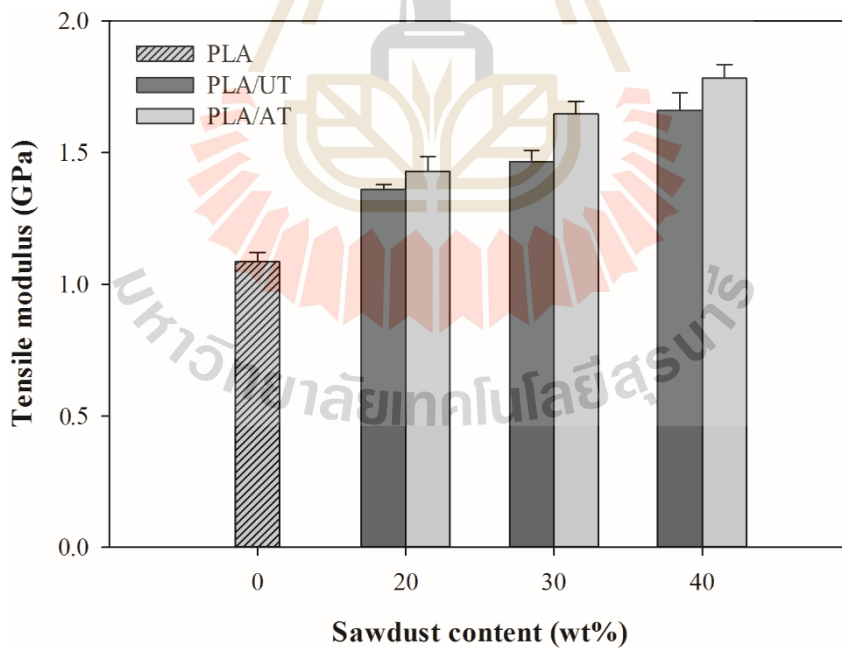
แต่อย่างไรก็ตามค่ามอดุลัสแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 4.2 เนื่องจากผลของการเสริมแรง (reinforcement effect) ของผงซีลี้อยู่ที่มีความแข็ง (rigid) ในพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ [Sombatsompop, Yotinwattanakumtorn และ Thongpin, 2005] Chun, Husseinsyah และ Osman (2012) พบว่าค่าความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงกะลามะพร้าว (coconut shell powder) และพอลิแลคติกแอซิดลดลง แต่ค่ามอดุลัสแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงกะลามะพร้าวเพิ่มขึ้น

ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเมื่อเติมผงซีลี้อย่างไม่ผ่านการคัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันลงในพอลิแลคติกแอซิด และลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณผงซีลี้อย่างเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.3 ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการลดลงของความยืดหยุ่นในการเสีรูปร่าง (deformability) ที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างผงซีลี้อย่างที่ไม่ผ่านการคัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันและพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ [Ming-Zhu, Chang-Tong, Xu-Bing และ Yun-Lei, 2011] Pilla, Gong, O'Neill, Rowell และ Krzysik (2008) พบคล้ายกัน คือค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้สน (pine wood flour) กับพอลิแลคติกแอซิดลดลงเมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น เพราะว่าความสามารถในการยืดหยุ่นของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลง

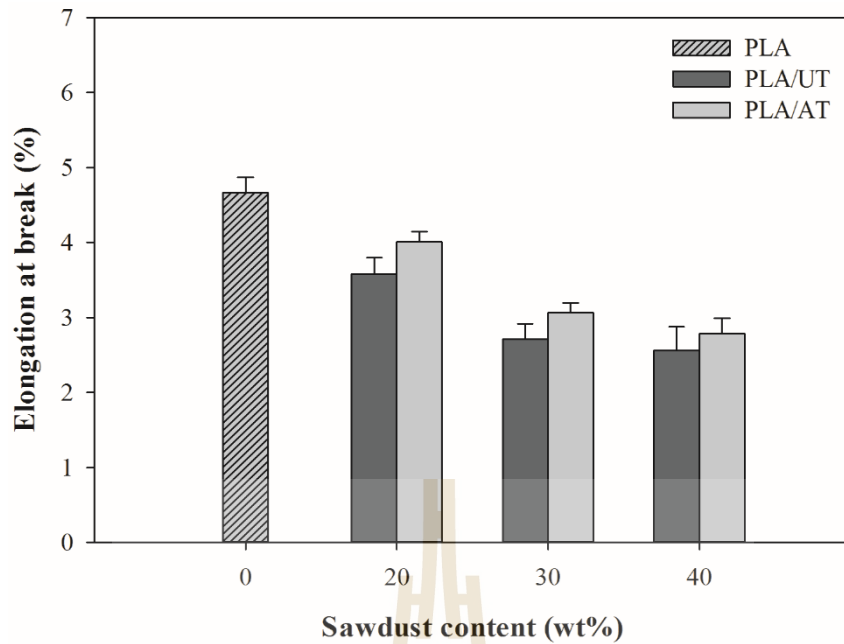
ค่าความต้านแรงดึง ค่ามอดูลัสแรงดึง และค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อย่างที่ไม่ผ่านการคัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันแสดงแนวโน้มที่คล้ายกันกับพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อย่างที่ไม่ผ่านการคัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชัน ดังแสดงในรูป 4.1-4.3 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณผงซีลี้อย่างเท่ากัน พบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยผงซีลี้อย่างที่ไม่ผ่านการคัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันมีค่าสมบัติความต้านแรงดึงดีกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยผงซีลี้อย่างที่ไม่ผ่านการคัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชัน เนื่องมาจากการทำอัลคาไลเซชันสามารถกำจัดลิกนิน (lignin) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) สารพอกซีผึ้ง (waxes) และสารปนเปื้อน (impurities) ต่างๆ ออกไปจากผงซีลี้อย่างได้ ส่งผลให้พื้นผิวผงซีลี้อย่างมีความขรุขระมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงยึดติดระหว่างผงซีลี้อย่างและพอลิแลคติกแอซิดผ่านกลไกแบบการเชื่อมต่อกันทางกล (mechanical interlocking) [Aydin, Tozlu, Kemaloglu, Aytac และ Ozkoc, 2011; Tran, Ogihara, Nguyen และ Kobayashi, 2011] โดยสามารถยืนยันได้ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 4.9 (d)-(f)) ซึ่งแสดงให้เห็นกระจายตัวของผงซีลี้อย่างที่ไม่ผ่านการคัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ดีในพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ และการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ดี (รูปที่ 4.10 (d)-(f)) การยึดติดบริเวณอินเทอร์เฟซที่ดีขึ้นนี้ส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทความเค้น (stress transfer) ที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมและเมทริกซ์มีประสิทธิภาพดีขึ้น และทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติความต้านแรงดึงที่ดีขึ้น Tran, Ogihara และ Kobayashi (2011) พบว่าสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate, PBS) กับเส้นใยมะพร้าว (coir fiber) ที่ผ่านการทำอัลคาไลเซชันมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ผ่านการทำอัลคาไลเซชัน เป็นผลเนื่องมาจากการทำอัลคาไลเซชันสามารถเพิ่มความขรุขระของเส้นใยมะพร้าว จึงส่งผลให้เกิดการเชื่อมต่อกันทางกลกับพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตเมทริกซ์ได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.1 ค่าความต้านแรงดึงของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ



รูปที่ 4.2 ค่ามอดูลัสแรงดึงของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ



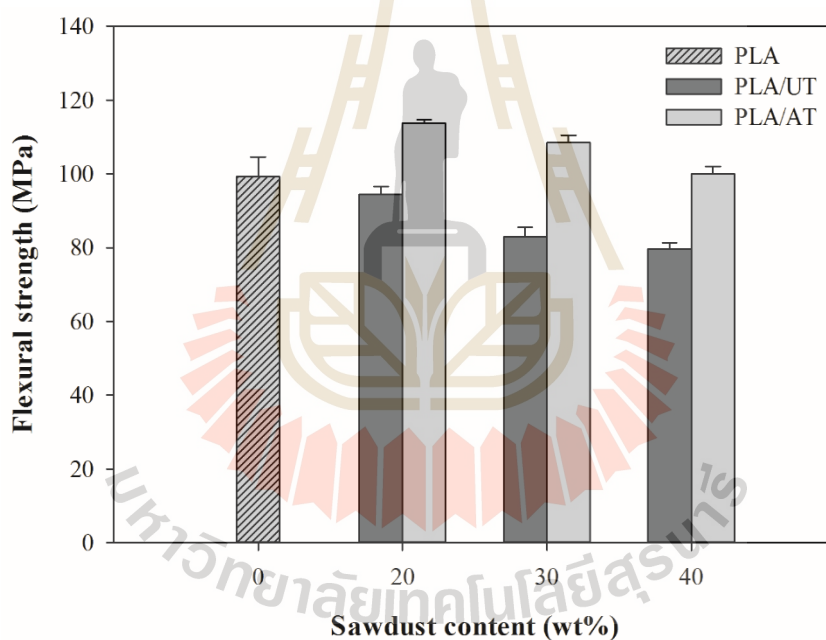
รูปที่ 4.3 ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อย่างต่าง ๆ

4.1.1.2 สมบัติความต้านแรงดัดโค้ง (flexural properties)

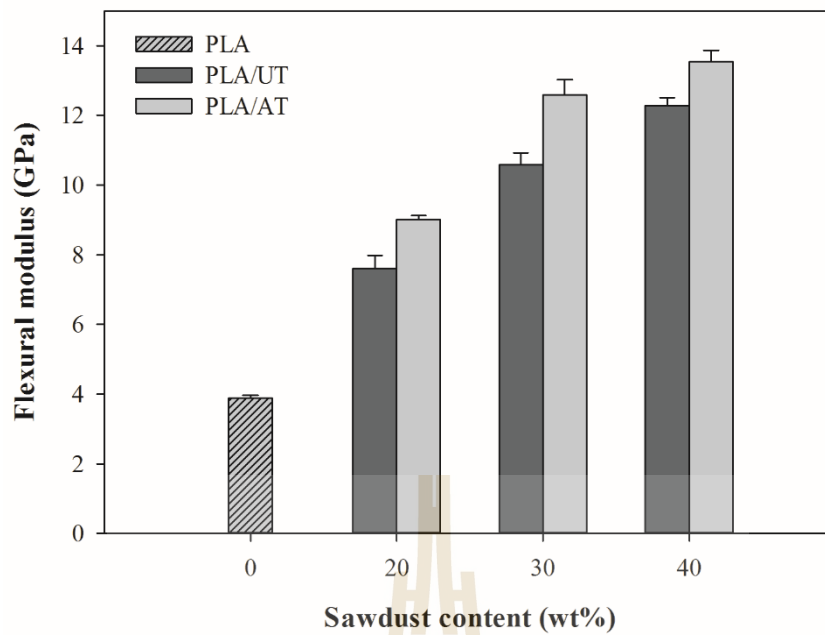
ค่าความต้านแรงดัดโค้ง (flexural strength) และค่ามอดุลัสแรงดัดโค้ง (flexural modulus) ของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อย่างต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.1 สมบัติความต้านแรงดัดโค้งมีแนวโน้มที่คล้ายกันกับสมบัติความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ โดยค่าความต้านแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเมื่อปริมาณผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูป 4.4 เป็นผลเนื่องจากการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟสระหว่างผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันกับพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ที่ไม่ดี และเกิดการรวมกลุ่มกันของผงซีลี้อยู่เมื่อมีปริมาณผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันสูงขึ้น ส่งผลให้การถ่ายโอนความเค้นจากพอลิเมอร์เมทริกซ์ไปสู่ผงซีลี้อยู่เกิดขึ้นได้ยาก [Ming-Zhu และคณะ, 2011] อย่างไรก็ตามค่ามอดุลัสแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นเมื่อเติมผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันลงในพอลิแลคติกแอซิด และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณผงซีลี้อยู่เพิ่มขึ้นจาก 20 ไปถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูป 4.5 เป็นผลเนื่องมาจากการเติมสารตัวเติมซึ่งมีความแข็งลงในพอลิเมอร์เมทริกซ์ [Sombatsompop และคณะ, 2005] Tran และคณะ (2011) พบเช่นเดียวกันว่าค่าความต้านแรงดัด

โค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยมะพร้าวกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลดลง แต่ค่ามอดุลัสแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเส้นใยมะพร้าวเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ค่าความต้านแรงดัดโค้งและค่ามอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เลื่อยที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากกระจายตัวของผงขี้เลื่อยที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ดีในพอลิแลคติกแอซิด และการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟสระหว่างสารตัวเติมและ พอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ดีผ่านกลไกการเชื่อมต่อกันทางกล [Islam, Pickering และ Foreman, 2010] Liu, Yu, Cheng และ Yang (2009) พบว่าพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตคอมโพสิตที่ทำจากเส้นใยปอ (jute fiber) ที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันให้ค่าความต้านแรงดัดโค้งและค่ามอดุลัสแรงดัดโค้งที่สูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ทำจากเส้นใยปอที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชัน เป็นผลเนื่องมาจากการปรับปรุงการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟสระหว่างเส้นใยปอและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเมทริกซ์



รูปที่ 4.4 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ

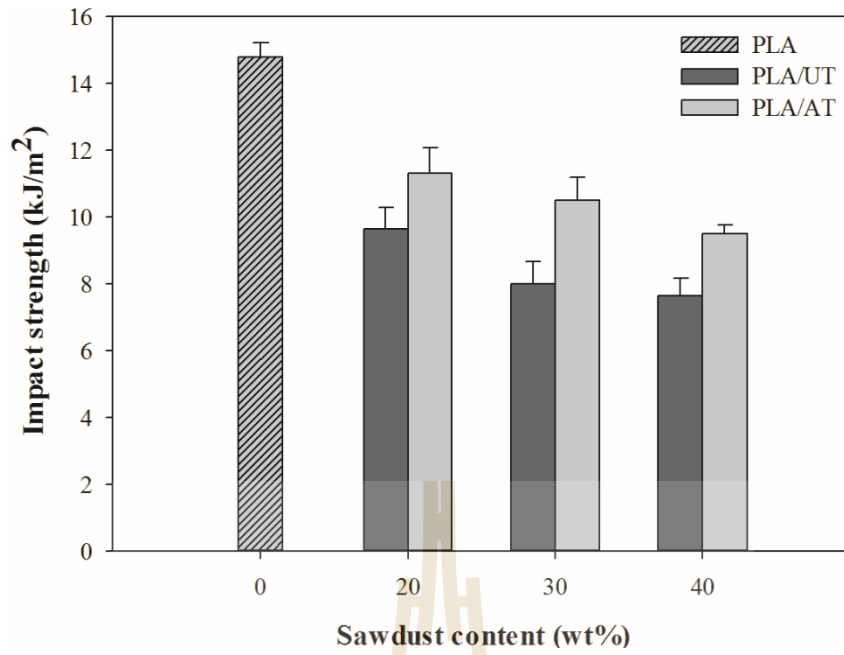


รูปที่ 4.5 ค่ามอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ

4.1.1.3 สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact properties)

ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact strength) ของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ แสดงในรูป 4.6 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิดลดลงเมื่อเติมผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชัน และลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณผงซีลี้อยเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการรวมกลุ่มของผงซีลี้อย ซึ่งส่งผลให้มีบริเวณอินเทอร์เฟซที่มีความเข้มแรงเค้น (stress concentration) เกิดขึ้นมาก [Tawakkal, Talib, Abdan และ Ling, 2012] Huda, Drzal, Misra และ Mohanty (2006) พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยไม้ (wood fiber) กับพอลิแลคติกแอซิดลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยไม้เพิ่มขึ้น เนื่องจากการถ่ายโอนความเค้นที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างเส้นใยไม้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่ดี

อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ใช้ผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชัน เนื่องจากการทำอัลคาไลเซชันสามารถปรับปรุงการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ให้ดีขึ้น ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความเค้นจากเมทริกซ์ไปสู่สารตัวเติมได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.6 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลน์เซชันที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกลของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอม โพลีระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการดัดแปรและผ่านการดัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ

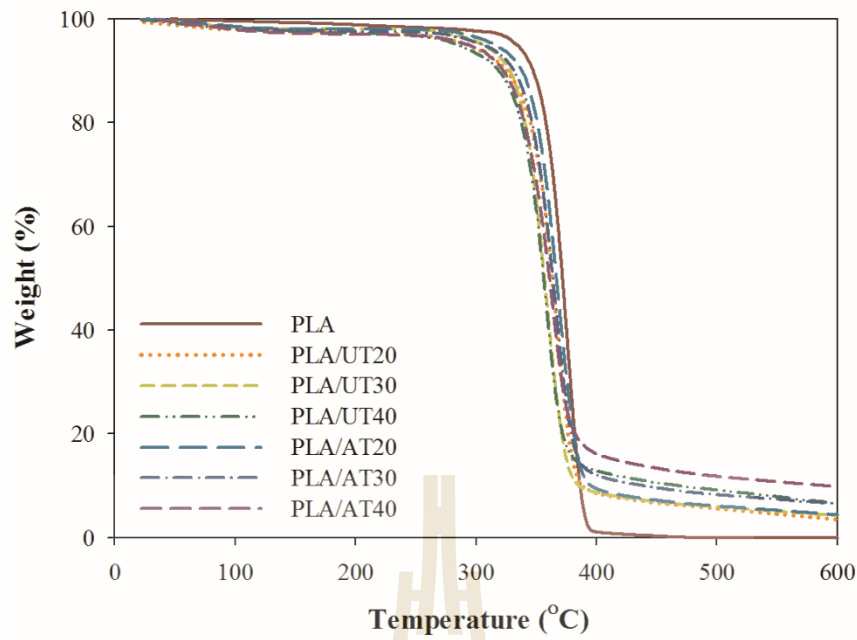
Formulation	Tensile strength	Young's modulus	Elongation at	Flexural strength	Flexural modulus	Impact strength
	(MPa)	(GPa)	break (%)	(MPa)	(GPa)	(kJ/m ²)
PLA	45.44±0.44	1.09±0.03	4.67±0.20	99.27±5.30	3.89±0.08	14.79±0.42
PLA/UT20	43.98±2.32	1.36±0.02	3.58±0.22	94.39±2.10	7.61±0.37	9.64±0.64
PLA/UT30	38.85±0.61	1.47±0.04	2.71±0.20	82.90±2.55	10.58±0.35	8.00±0.66
PLA/UT40	37.89±4.11	1.66±0.07	2.56±0.32	79.56±1.76	12.28±0.23	7.65±0.52
PLA/AT20	52.73±0.96	1.43±0.06	4.01±0.14	113.76±0.88	9.02±0.11	11.32±0.75
PLA/AT30	49.63±0.17	1.65±0.05	3.07±0.19	108.49±1.91	12.60±0.43	10.49±0.71
PLA/AT40	44.99±1.96	1.78±0.05	2.79±0.21	100.01±1.92	13.55±0.32	9.51±0.26

4.1.2 สมบัติทางความร้อน (thermal properties)

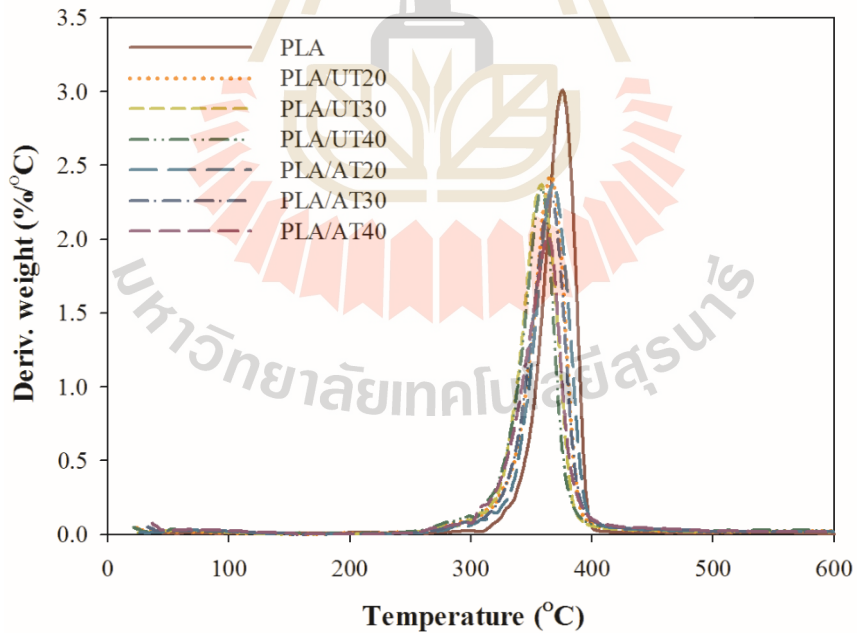
กราฟ TGA และ DTA ของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่การสูญเสียน้ำหนัก 5 เปอร์เซ็นต์ (thermal decomposition temperature at 5% weight loss, T_5) อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่การสูญเสียน้ำหนัก 50 เปอร์เซ็นต์ (thermal decomposition temperature at 50% weight loss, T_{50}) และอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อน (thermal decomposition temperature, T_d) ของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงขี้เลื่อยต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.2 จากกราฟ DTA ของพอลิแลคติกแอซิดในรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าพอลิแลคติกแอซิดมีขั้นตอนในการเสื่อมสลายด้วยความร้อนหนึ่งขั้นตอน และมีค่า T_5 , T_{50} และ T_d ที่อุณหภูมิ 333.87, 371.82 และ 375.77 องศาเซลเซียสตามลำดับ เมื่อเติมผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันลงในพอลิแลคติกแอซิด พบว่าการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทมีเพียงหนึ่งขั้นตอน โดยอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของผงขี้เลื่อยซ้อนทับกับอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด [Chun และคณะ, 2012] การเติมผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันลงไปพอลิแลคติกแอซิดส่งผลทำให้ T_5 , T_{50} และ T_d ของพอลิแลคติกแอซิดลดลงและลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณของผงขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากองค์ประกอบในผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชัน เช่น องค์ประกอบที่เป็นสารโมเลกุลต่ำ (สารพวกขี้ผึ้งและสารปนเปื้อนต่างๆ เป็นต้น) และเฮมิเซลลูโลสมีอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิด ส่งผลทำให้ความเสถียรต่อความร้อน (thermal stability) ของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิทลดลง [Wenjia, Kaushlendra และ John, 2013; Jandas, Mohanty, Nayak และ Srivastava, 2011] นอกจากนี้ความไม่เข้ากันระหว่างผงขี้เลื่อยไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันกับพอลิแลคติกแอซิดก็อาจเป็นเหตุผลที่ทำให้ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด ลดลงได้ [Lee, Kang, Doh, Yoon, Park และ Wu, 2008] ปริมาณเถ้า (char residue) ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงขี้เลื่อยที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.2 Seong, Mehdi, Sim, Bhuiyan, Jang, Ghaffar และ Kalaitzidon (2012) พบว่าพอลิแลคติกแอซิดมีความเสถียรต่อความร้อนดีกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างเส้นใยปอกระเจากับพอลิแลคติกแอซิด และปริมาณเถ้าที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยปอกระเจาที่มากขึ้น Huda และคณะ (2006) พบว่าความเสถียรต่อความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดลดลงเมื่อเติมผงไม้ลงไปพอลิแลคติกแอซิด เนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างผงไม้และพอลิแลคติกแอซิด โดยอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิทลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น

พอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เลื่อยที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันมีค่า T_5 , T_{50} และ T_d สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงขี้เลื่อยเท่ากัน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการหลุดออกของเฮมิเซลลูโลส และองค์ประกอบที่เป็นสารโมเลกุลต่ำในผงขี้เลื่อยระหว่างการทำอัลคาไลเซชัน ทำให้ผงขี้เลื่อยที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันมีความเสถียรต่อความร้อนดีขึ้น ส่งผลให้ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตดีขึ้นตามไปด้วย [Rosa, Chiou, Medeiros, Wood, Williams, Mattoso, Orts และ Imam, 2009] นอกจากนี้ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นผลเนื่องมาจากการปรับปรุงการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างผงขี้เลื่อยที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันและพอลิแลคติกแอซิดที่ดีขึ้น [Jandas และคณะ, 2011] Yu, Ren, Li, Yuan และ Li (2010) พบว่าการทำอัลคาไลเซชันสามารถปรับปรุงความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยป่านรามิ (ramie fiber) กับพอลิแลคติกแอซิดให้ดีขึ้น เนื่องจากมีการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างเส้นใยป่านรามิกับพอลิ-แลคติกแอซิดที่ดีขึ้น

นอกจากนี้ ปริมาณเถ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เลื่อยที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันดังแสดงในตารางที่ 4.2 เป็นผลเนื่องมาจากการทำอัลคาไลเซชันสามารถกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินออกไปจากผงขี้เลื่อยได้ปริมาณหนึ่ง ส่งผลให้มีสัดส่วนของเซลลูโลส (cellulose) ในผงขี้เลื่อยเพิ่มขึ้น โดยปริมาณเซลลูโลสที่มากขึ้นนี้ทำให้มีสัดส่วนของคาร์บอน (carbon) ในผงขี้เลื่อยเพิ่มขึ้นด้วย [Kumar, Negi, Choudhary และ Bhardwaj, 2014; Mohamad Haafiz, Eichhorn, Hassan และ Jawaid, 2013] ซึ่งปกติแล้วปริมาณเถ้าของสารตัวเติมเซลลูโลสจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น [Kumar และคณะ, 2014] ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดปริมาณเถ้าในผงขี้เลื่อยที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันเพิ่มขึ้น และโดยส่วนใหญ่แล้วปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตมักจะมาจากเถ้าของการเผาไหม้สารตัวเติมเซลลูโลส ดังนั้นพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากผงขี้เลื่อยที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันจึงมีปริมาณเถ้าที่สูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากผงขี้เลื่อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชัน Bachtiar, Sapuan, Zainudin, Khalina และ Dahlan (2013) รายงานว่าปริมาณเถ้าที่ 600 องศาเซลเซียสของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยตาล (sugar palm fiber) ที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันกับพอลิสไตรีนชนิดทนแรงกระแทก (high impact polystyrene) มีปริมาณสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชัน



รูปที่ 4.7 กราฟ TGA ของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิด และพงซีเคลือบที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณ พงซีเคลือบต่างๆ



รูปที่ 4.8 กราฟ DTA ของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิด และพงซีเคลือบที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณ พงซีเคลือบต่างๆ

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ

Formulation	T ₅ (°C)	T ₅₀ (°C)	T _d (°C)	Residue at 600°C (%)
PLA	333.87	371.82	375.77	0.00
PLA/UT20	298.96	362.95	364.40	3.52
PLA/UT30	295.58	358.69	360.52	4.20
PLA/UT40	284.71	356.10	356.87	6.59
PLA/AT20	315.99	366.69	368.22	4.36
PLA/AT30	306.12	363.83	365.54	6.49
PLA/AT40	293.33	361.00	361.76	9.78

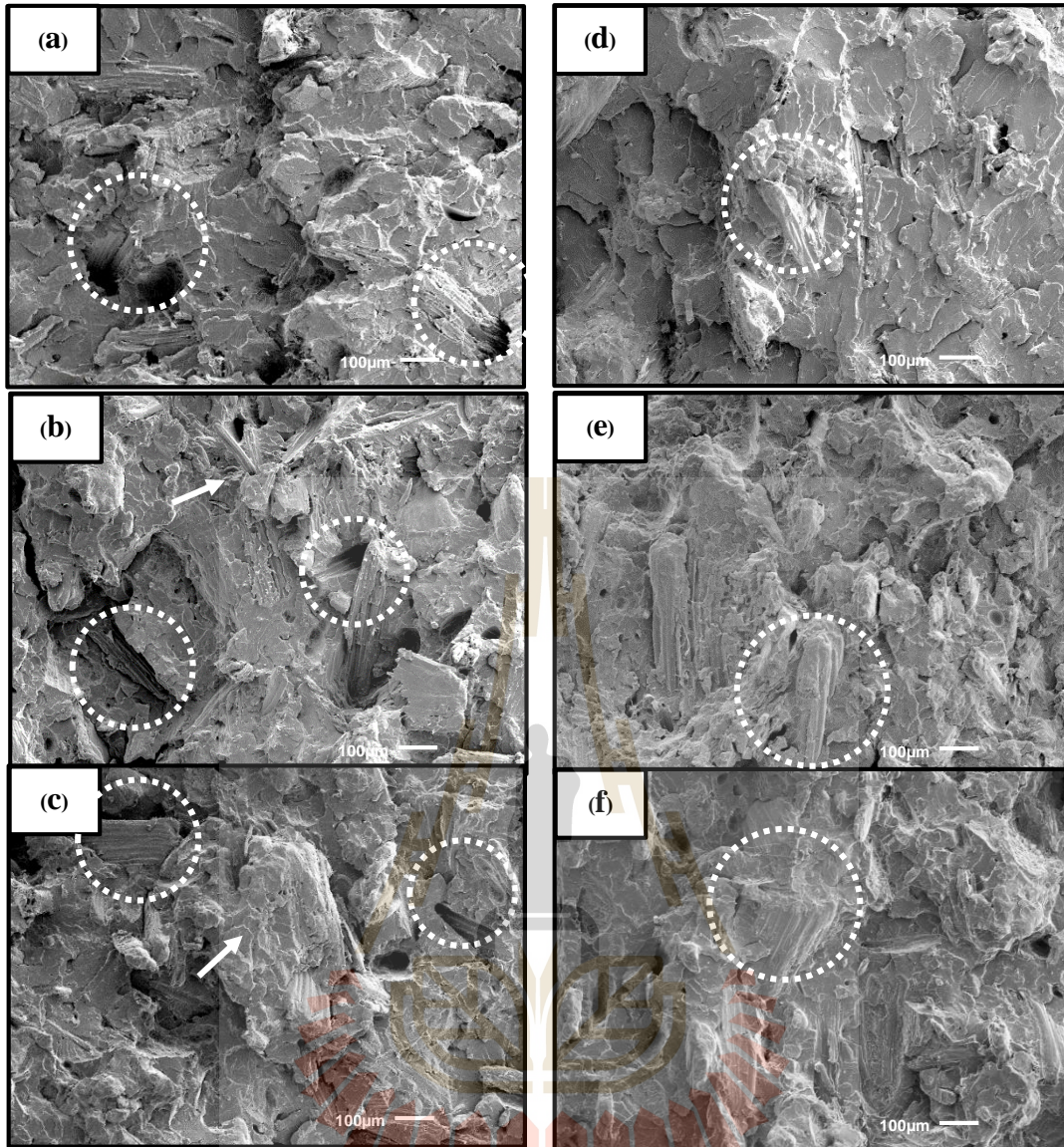
4.1.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา (morphological properties)

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (tensile fractured surface) ของพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรและผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อยต่างๆ ที่กำลังขยาย 100 และ 300 เท่า แสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ พื้นผิวแตกหักของพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชัน แสดงให้เห็นว่ามีช่องว่างระหว่างผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันกับพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ (รูปที่ 4.10 (a)-(c)) และพบว่าเมื่อเกิดการหลุด (pull out) ของผงซีลี้อยจากพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ (รูปที่ 4.9 (a)-(c)) ลักษณะเช่นนี้บ่งบอกว่ามีแรงยึดติดที่ไม่ดีระหว่างผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันกับพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ นอกจากนี้เมื่อปริมาณผงซีลี้อยที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันเพิ่มขึ้น พบว่าเกิดการรวมกลุ่มกันของผงซีลี้อยดังแสดงในรูปที่ 4.9 (b) และ (c) ซึ่งเป็นสาเหตุของการลดลงของค่าความต้านแรงดึง ค่าความต้านแรงดึง ค่าความต้านทานต่อแรงกระทำของพอลิเมอร์คอมพอสิต

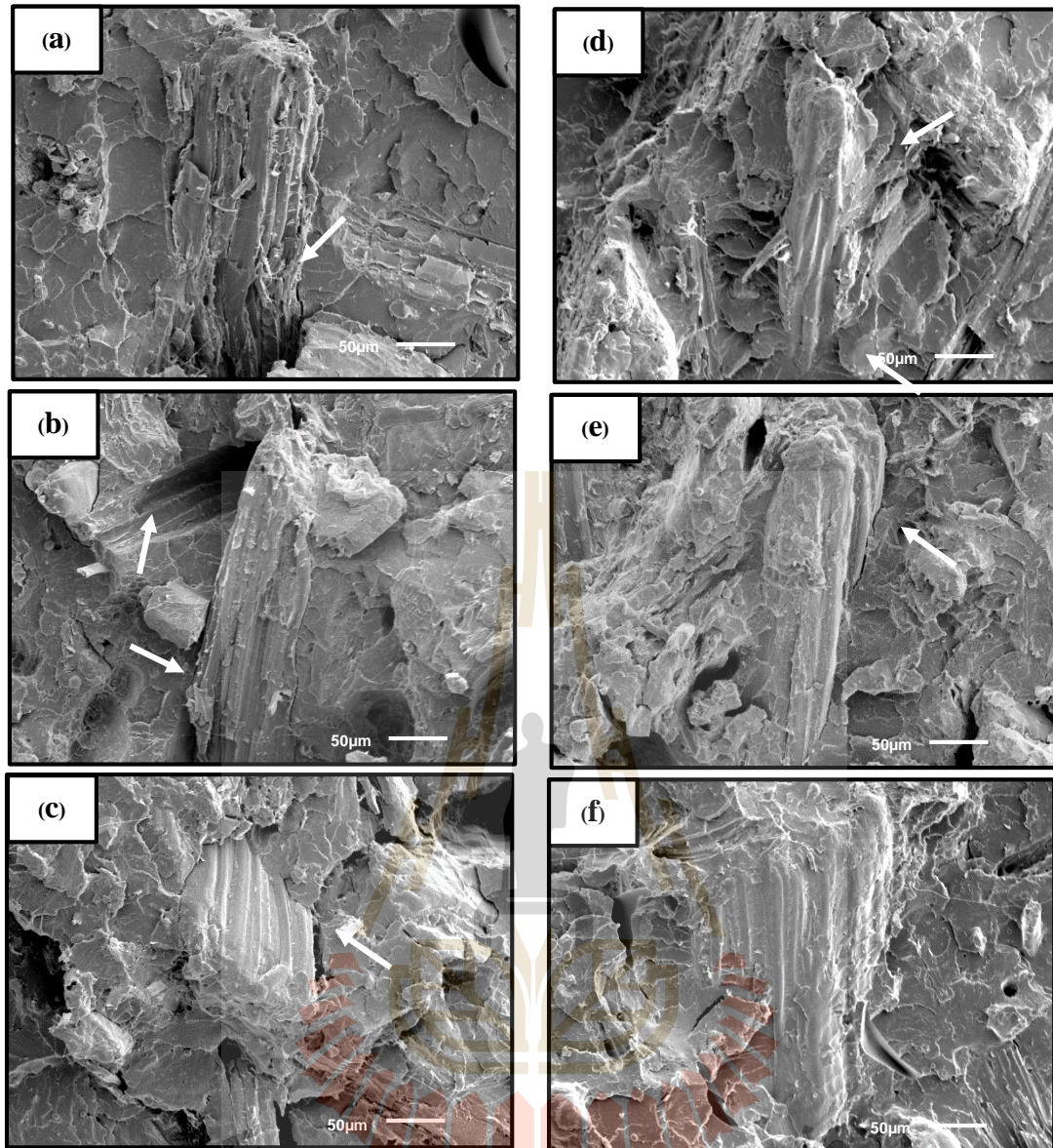
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันแสดงให้เห็นว่ามีการยึดติดที่ดีระหว่างผงซีลี้อยที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันและพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.10 (d)-(f) นอกจากนี้ยังไม่สังเกตเห็นการรวมกลุ่มของผงซีลี้อยในพอลิแลคติกแอซิด

เมทริกซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (d)-(f) ลักษณะเช่นนี้ชี้ให้เห็นว่าการทำอัลคาไลเซชันสามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างผงซีลีเนียมและพอลิแลคติกแอซิด อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงการกระจายตัวของผงซีลีเนียมในพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ได้ดีขึ้นอีกด้วย จึงส่งผลให้สมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีเนียมที่ผ่านการดัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันดีขึ้น





รูปที่ 4.9 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิต (กำลังขยาย 100 เท่า) (a) PLA/UT20 (b) PLA/UT30 (c) PLA/UT40 (d) PLA/AT20 (e) PLA/AT30 และ (f) PLA/AT40



รูปที่ 4.10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิต (กำลังขยาย 300 เท่า) (a) PLA/UT20 (b) PLA/UT30 (c) PLA/UT40 (d) PLA/AT20 (e) PLA/AT30 และ (f) PLA/AT40

เมื่อพิจารณาสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เลื่อยที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้สมบัติทางกลที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงสมบัติทางกลที่สูงที่สุด ภายหลังจากการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชัน ซึ่งสัดส่วนการผสมนี้จะนำไปใช้ในการศึกษาในส่วนถัดไป

4.2 ผลของปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อย

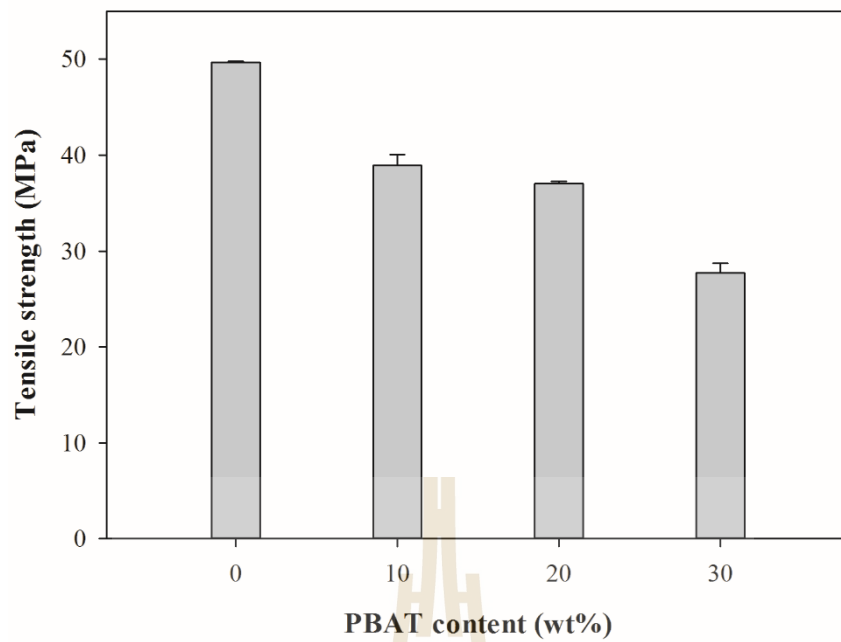
4.2.1 สมบัติทางกล

4.2.1.1 สมบัติความต้านแรงดึง

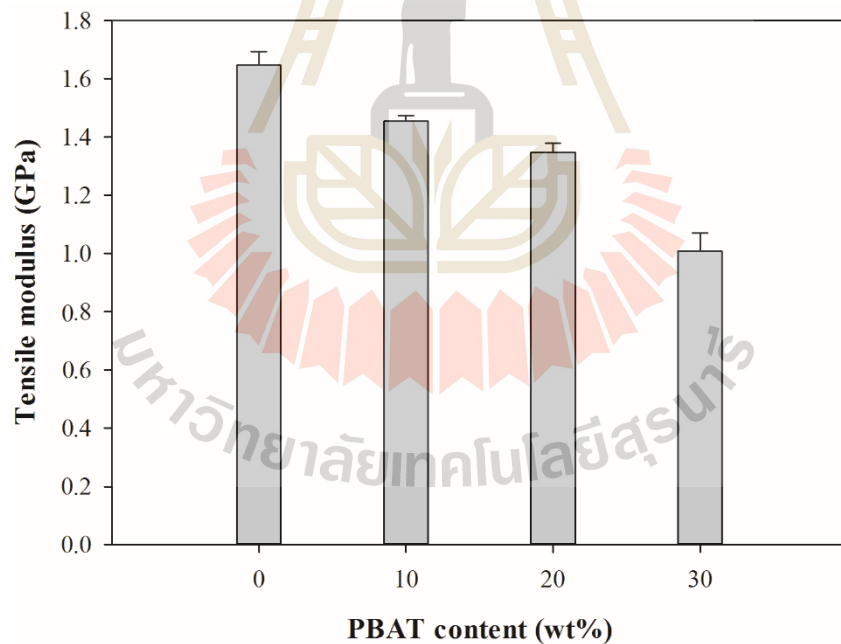
สมบัติความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ปรับปรุงความเหนียว (toughness) ด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.3 เมื่อปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านแรงดึง และค่ามอดุลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากสองปัจจัยหลัก คือ ความอ่อนนุ่มของพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต และความไม่เข้ากันระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต [Goriparthi, Suman และ Nalluri, 2012] โดยความไม่เข้ากันระหว่างพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบในพอลิเมอร์คอมโพสิตสามารถยืนยันได้ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในรูป 4.19 (b)-(d) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีเฟสพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตกระจายตัวอยู่ในพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าความต้านแรงดึงและค่ามอดุลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลง โดยมีอีกหลายงานวิจัยที่พบผลคล้ายกัน Petinakis, Yu, Edward, Dean, Liu และ Scully (2009) พบว่าการใช้พอลิเอทิลีนอะคริลิกแอซิด (poly(ethylene-acrylic acid)) เพื่อเป็นสารเพิ่มความเหนียวในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้และพอลิแลคติกแอซิด ส่งผลให้ค่าความต้านแรงดึงและค่ามอดุลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่มีการปรับปรุงความเหนียว เนื่องมาจากความไม่เข้ากันขององค์ประกอบในพอลิเมอร์คอมโพสิต Jiang และ Qin (2006) พบเช่นเดียวกันว่าค่าความต้านแรงดึงและค่ามอดุลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้และพอลิโพรพิลีน (polypropylene) ลดลงเมื่อเติมพอลิเอทิลีนออกทีนอีลาสโตเมอร์ (polyethylene octene elastomer) เพื่อปรับปรุงความเหนียว โดยค่าความต้านแรงดึงและค่ามอดุลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเอทิลีนออกทีนอีลาสโตเมอร์จาก 15 เป็น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตสูงกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้ปรับปรุงความเหนียว โดยค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิตสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพิ่มขึ้นจาก 10 ไปยัง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.13 โดยการเติมพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณ 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปรับปรุงค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิตได้ถึง 36 68 และ 81 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยกลไกการปรับปรุงความเหนียวของพอลิ

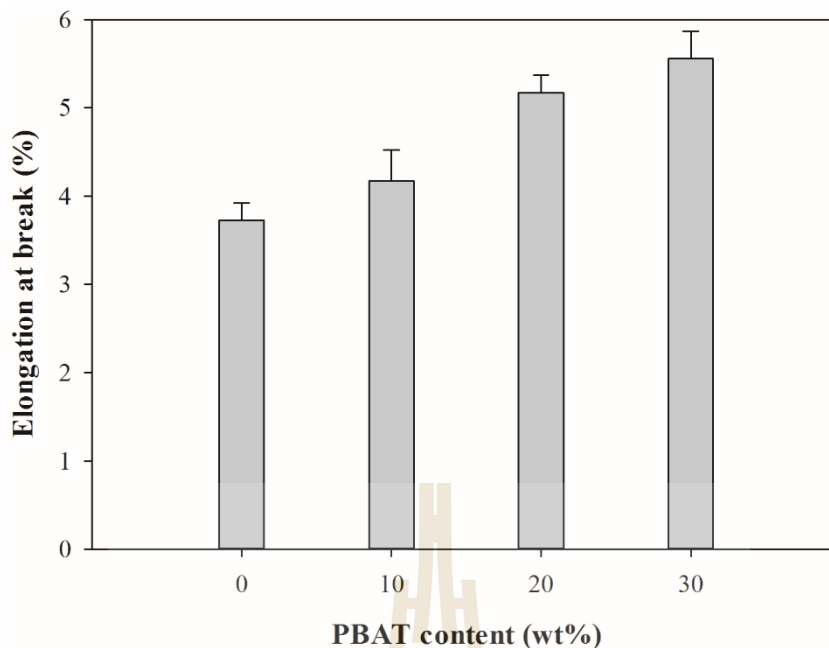
เมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เลื่อยด้วยการเติมพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตมาจากการเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงาน (energy absorption) ระหว่างการทดสอบ [Kfoury, Raquez, Hassouna, Odent, Toniazzi, Ruch และ Dubois, 2013] ซึ่งสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้จากการสังเกตภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact fractured surface) ในรูปที่ 4.19 (b)-(d) ที่แสดงให้เห็นว่ามีเฟสพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตกระจายตัวอยู่ในพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ โดยปกติแล้วพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตจะมีสมบัติยืดหยุ่น (elastic properties) ที่ต่างจากพอลิแลคติกแอซิด ดังนั้นเฟสพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตจะเป็นจุดที่เกิดความเข้มข้นแรงเค้น (stress concentrators) ระหว่างการทดสอบ ซึ่งจุดที่เกิดความเข้มข้นนี้ช่วยเหนี่ยวนำให้เกิดกลไกการแตกหักแบบเหนียว (ductile deformation) ในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์คอมโพสิทเพิ่มขึ้นได้ ส่งผลให้ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิทสูงขึ้นเมื่อมีการปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตสามารถยืนยันได้ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ที่แสดงให้เห็นถึงการยึดตัวของเมทริกซ์ซึ่งเป็นลักษณะของการแตกหักแบบเหนียว (รูปที่ 4.21 (b)-(d)) โดยลักษณะเช่นนี้จะไม่เกิดในพอลิเมอร์คอมโพสิทที่ไม่ได้ปรับปรุงความเหนียว (รูปที่ 4.21 (a)) Lee (2009) พบผลที่คล้ายกันว่าการเติมพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตสามารถปรับปรุงความสามารถในการแตกหักแบบเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงไม้ไผ่ (bamboo flour) กับพอลิแลคติกแอซิดได้ โดยสังเกตได้จากค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิทที่เพิ่มขึ้นภายหลังการเติมพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพื่อเป็นสารเพิ่มความเหนียว Petinakis และคณะ (2009) พบว่าค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงไม้และพอลิแลคติกแอซิดเพิ่มขึ้นเมื่อเติมพอลิเอทิลีนอะคริเลตเพื่อเป็นสารเพิ่มความเหนียว โดยการเพิ่มขึ้นของค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิทเป็นผลเนื่องมาจากพอลิเอทิลีนอะคริเลตเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง จึงส่งผลให้เกิดการเสียรูปแบบพลาสติกในพอลิเมอร์เมทริกซ์มากขึ้น Sombatsompop และคณะ (2005) พบว่าค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิโพรพิลีนสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อปริมาณเอทิลีนออกทีนอิลาสโตเมอร์เพิ่มขึ้น โดยกลไกการปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิท คือการปรับปรุงความสามารถในการเสียรูปแบบพลาสติกของพอลิเมอร์เมทริกซ์โดยการเหนี่ยวนำของอิลาสโตเมอร์เฟส



รูปที่ 4.11 ค่าความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.12 ค่ามอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ

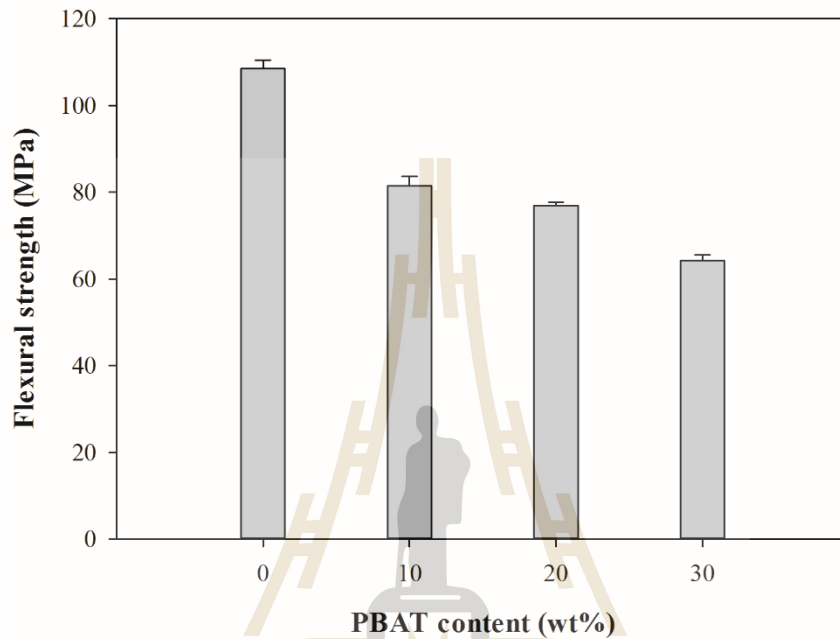


รูปที่ 4.13 ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ

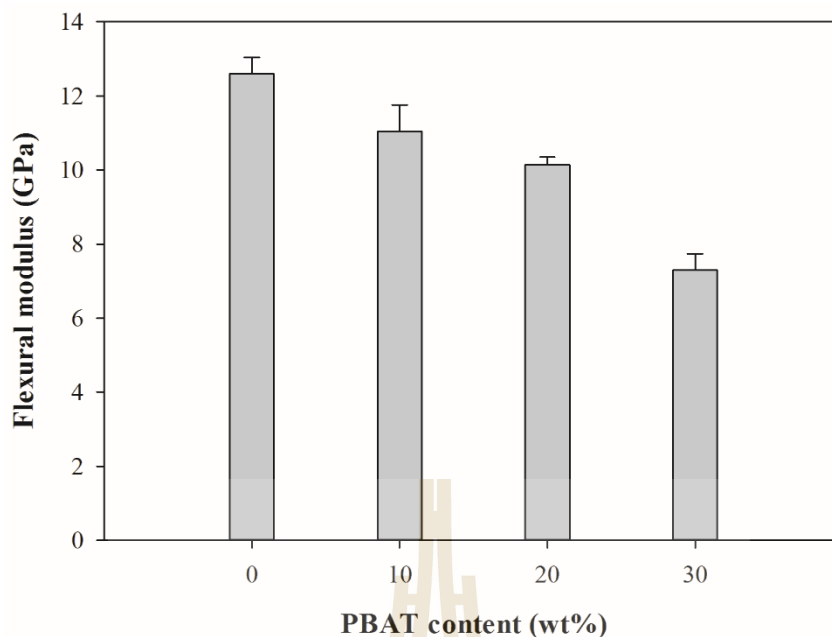
4.2.1.2 สมบัติความต้านแรงดัดโค้ง

สมบัติความต้านแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.3 ค่าความต้านแรงดัดโค้งและค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่ำกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่มีการปรับปรุงความเหนียว และเมื่อปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต้านแรงดัดโค้งและค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงอย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ เพราะพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตมีความยืดหยุ่นสูง แต่มีความแข็งแรง (strength) และความแข็งตึง (stiffness) ที่ต่ำ [Jiang และคณะ, 2006] ดังนั้นการเติมพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตจึงส่งผลให้ความเปราะ (brittleness) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลง นอกจากนี้ความไม่เข้ากันระหว่างพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตและพอลิแลคติกแอซิดอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่าความต้านแรงดัดโค้งและค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงด้วย Yao, Wu, Liu, Lei และ Zhou (2011) พบผลคล้ายกันในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยฟางข้าว (rice straw fiber) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene) ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยเอทิลีน/โพรพิลีนโคพอลิเมอร์ที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชัน (unfunctionalized ethylene/propylene copolymer) โดยค่าความต้านแรงดัดโค้งและค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเมื่อปริมาณของเอทิลีน/

โพรพิลีน โคลิเมอร์ที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันเพิ่มขึ้น Sombatsompop และคณะ (2005) พบว่าค่าความต้านแรงดัดโค้งและค่ามอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงขี้เลื่อยและพอลิโพรพิลีนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อมีปริมาณเอทิลีนออกทีนอิลาสโตเมอร์ในพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากความอ่อนนุ่มของเอทิลีนออกทีนอิลาสโตเมอร์ทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าความต้านแรงดัดโค้งและค่ามอดุลัสแรงดัดโค้งลดลง



รูปที่ 4.14 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงขี้เลื่อยที่ปรับปรุงค่าความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ

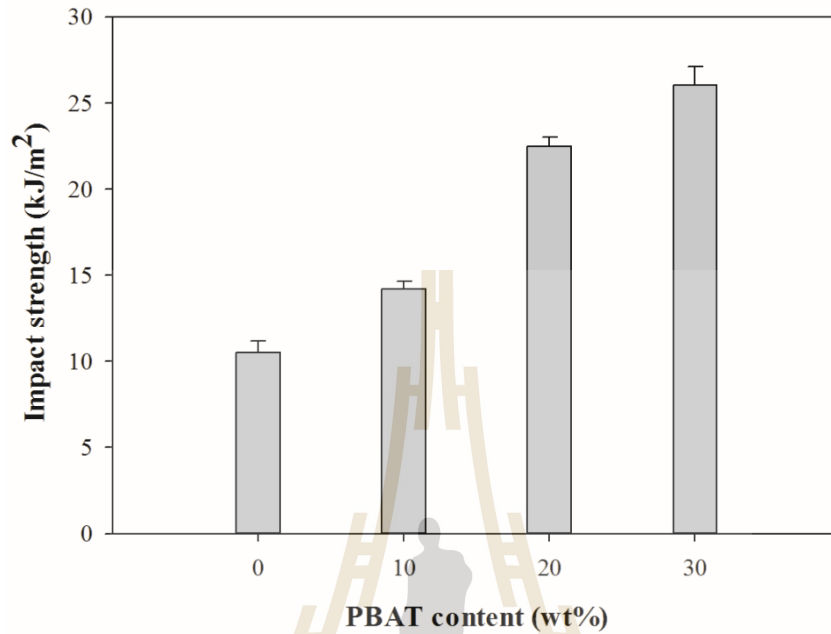


รูปที่ 4.15 ค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ

4.2.1.3 สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก

ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติมพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพื่อเป็นสารเพิ่มความเหนียว และเมื่อปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยการเติมพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณ 10-20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถปรับปรุงค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตได้ถึง 35 114 และ 148 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตนี้เป็นผลเนื่องมาจากการมีอยู่ของพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงและมีความเหนียวสูง [Afrifah และ Matuana, 2013; Qiang และคณะ, 2012; Cai, Wang, Nie, Tian, Zhu และ Zhou, 2011] Goriparthi และคณะ (2012) พบผลที่คล้ายกันในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยพอลิแลคติกแอซิดที่มีการปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิคาโพลแลคโตน (polycaprolactone) โดยการเติมพอลิคาโพลแลคโตนลงในพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตสามารถปรับปรุงค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตได้อย่างมีนัยสำคัญ Qiang และคณะ (2012) พบว่าการเติมพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoates) สามารถปรับปรุงค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก

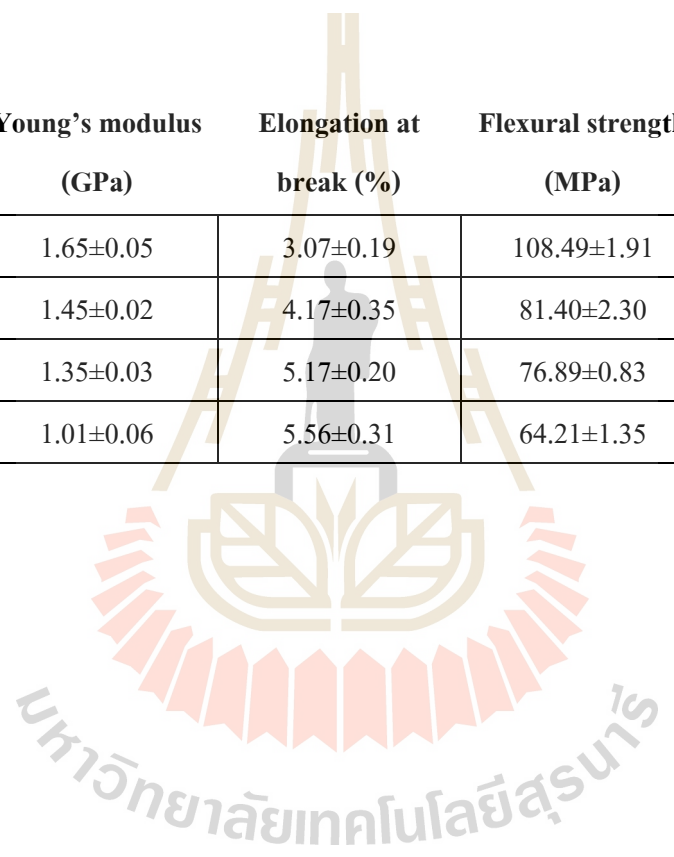
ของพอลิแลคติกแอซิดคอม โพลีที่เสริมแรงด้วยผงไม้ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเกิดการเปลี่ยน พฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะเป็นพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียว (brittle-ductile transition) ที่ สัดส่วนของผงไม้ระหว่าง 15 และ 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.16 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอรัคคอม โพลีระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและ ผงไม้ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีเนียมที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตที่ ปริมาณต่างๆ

Formulation	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (GPa)	Impact strength (kJ/m ²)
PLA/AT30	49.63±0.17	1.65±0.05	3.07±0.19	108.49±1.91	12.60±0.43	10.49±0.71
PLA/AT30/PBAT10	38.93±1.14	1.45±0.02	4.17±0.35	81.40±2.30	11.04±0.71	14.21±0.46
PLA/AT30/PBAT20	37.05±0.21	1.35±0.03	5.17±0.20	76.89±0.83	10.13±0.22	22.47±0.54
PLA/AT30/PBAT30	27.73±1.02	1.01±0.06	5.56±0.31	64.21±1.35	7.29±0.44	26.04±1.07



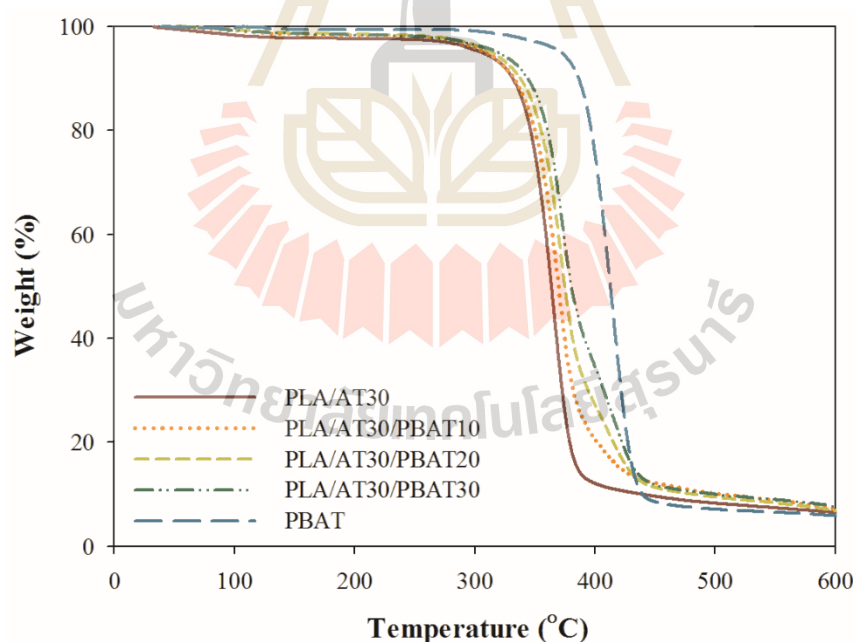
4.2.2 สมบัติทางความร้อน

อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.4 กราฟ TGA และ DTA ของพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ จากกราฟ DTA ของพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตในรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตมีขั้นตอนในการเสื่อมสลายด้วยความร้อนเพียงหนึ่งขั้นตอน และมีค่าอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่การสูญเสียน้ำหนัก 5 เปอร์เซ็นต์ (thermal decomposition temperature at 5% weight loss, T_5) อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่การสูญเสียน้ำหนัก 50 เปอร์เซ็นต์ (thermal decomposition temperature at 50% weight loss, T_{50}) และอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อน (thermal decomposition temperature, T_d) ที่อุณหภูมิ 372.00 412.69 และ 413.82 องศาเซลเซียสตามลำดับ กรณีพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่มีขั้นตอนการเสื่อมสลายหนึ่งขั้นตอนและมีค่า T_5 , T_{50} และ T_d ที่อุณหภูมิ 306.12 368.83 และ 365.54 องศาเซลเซียสตามลำดับ การเติมพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตลงในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพสิตแสดงขั้นตอนในการเสื่อมสลายด้วยความร้อนสองขั้นตอน โดยการเสื่อมสลายด้วยความร้อนขั้นแรก ($T_{d,1}$) ที่อุณหภูมิประมาณ 370 องศาเซลเซียส เป็นการเสื่อมสลายของผงซีลี้อยู่และพอลิแลคติกแอซิด และการเสื่อมสลายด้วยความร้อนขั้นที่สอง ($T_{d,2}$) ที่อุณหภูมิประมาณ 414 องศาเซลเซียส เป็นการเสื่อมสลายของพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต นอกจากนี้พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตยังมีอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่สูงขึ้น เพราะพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตมีอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่สูงกว่าพอลิแลคติกแอซิดดังแสดงในตารางที่ 4.4 [Kumar และคณะ, 2010; Teamsinsungvon, 2010] เมื่อปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนขั้นแรกของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนขั้นที่สองไม่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในตารางที่ 4.4 นอกจากนี้ปริมาณแก้วที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามปริมาณของพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต Ko, Hong, Park, Gupta, Choi และ Bhattacharya (2009) พบผลคล้ายกันว่าความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับคาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้น (multi-walled carbon nanotube) สูงขึ้นเมื่อเติมพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตในปริมาณที่สูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผล

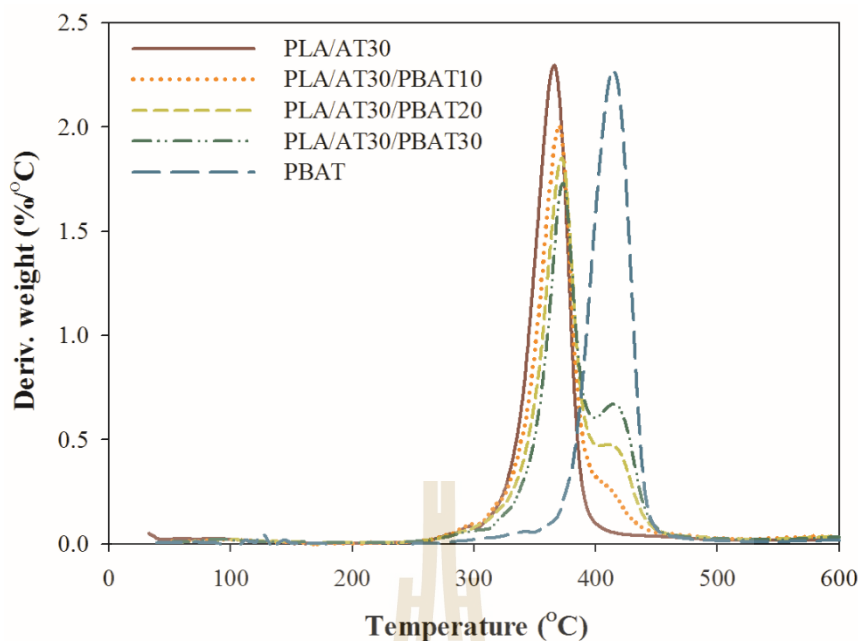
เนื่องจากพอลิবিวิธินอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตมีอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่สูงกว่าพอลิแลกติกแอซิด ดังนั้นจึงทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีความเสถียรต่อความร้อนที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ปริมาณแก้วของพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณของพอลิবিวิธินอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิবিวิธินอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิবিวิธินอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ

Formulation	T ₅ (°C)	T ₅₀ (°C)	T _{d,1} (°C)	T _{d,2} (°C)	Residue at 600°C (%)
PBAT	372.00	412.69	-	413.82	5.82
PLA/AT30	306.12	363.83	365.54	-	6.49
PLA/AT30/PBAT10	309.16	369.43	370.66	413.21	7.20
PLA/AT30/PBAT20	314.18	374.76	372.00	413.82	7.35
PLA/AT30/PBAT30	319.74	380.16	374.22	413.60	7.65



รูปที่ 4.177 กราฟ TGA ของพอลิবিวิธินอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิবিวิธินอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ



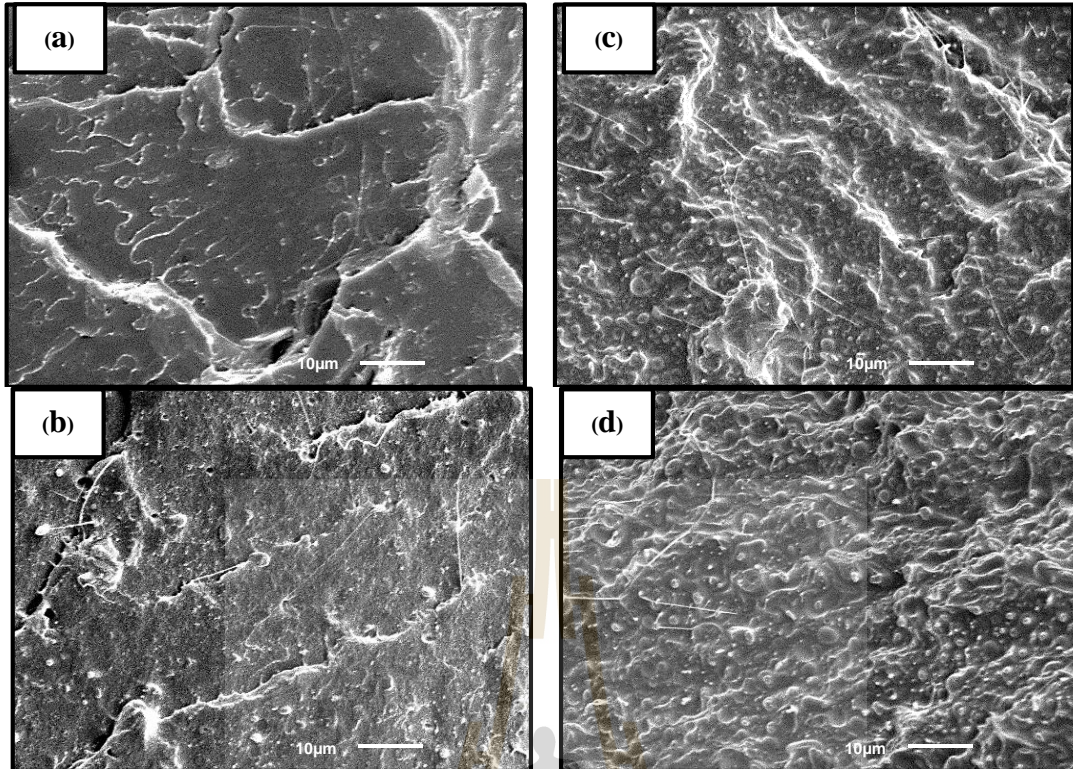
รูปที่ 4.18 กราฟ DTA ของพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต และพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณต่างๆ

4.2.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

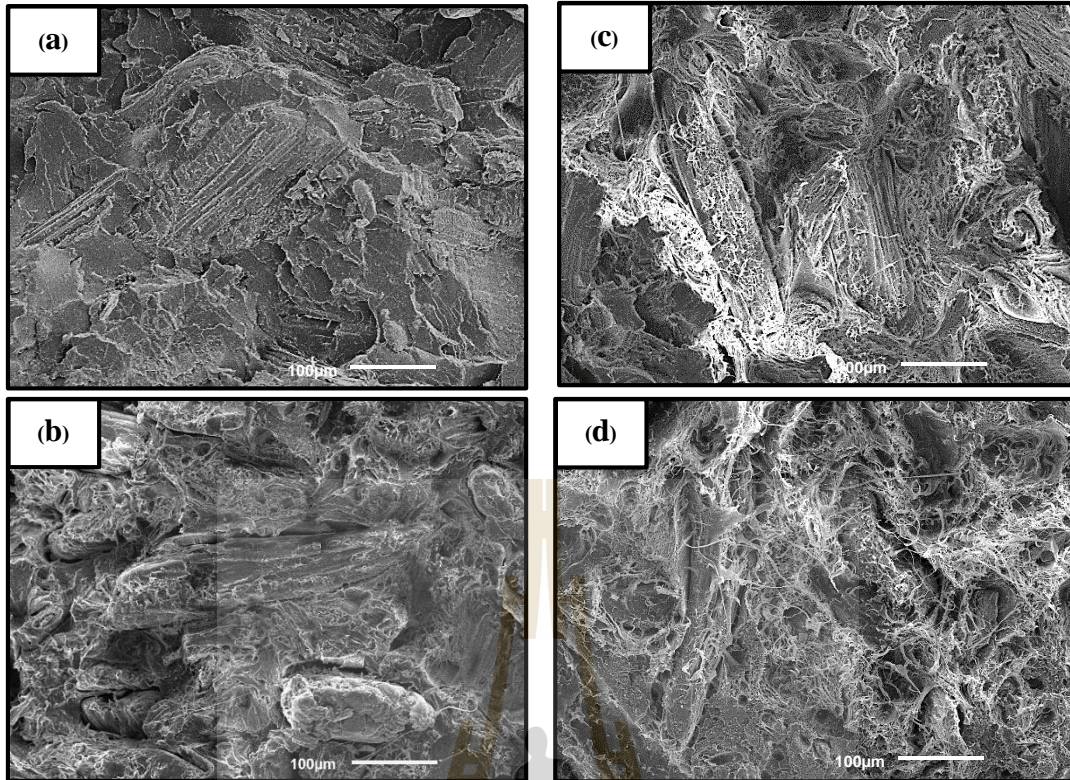
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกและพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงถูกตรวจสอบเพื่อศึกษากลไกการปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ด้วยการเติมพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต โดยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกที่กำลังขยาย 1500 เท่า แสดงในรูปที่ 4.19 โดยรูปที่ 4.19 (a) แสดงลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่มีการปรับปรุงความเหนียว แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่มีการปรับปรุงความเหนียวมีพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะ (brittle failure) [Goriparthi และคณะ, 2012] เมื่อเติมพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตลงในพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิต พบว่าเฟสพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตกระจายตัวอยู่ในพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ แสดงให้เห็นว่ามีความไม่เข้ากันระหว่างพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตและพอลิแลคติกแอซิด และขนาดของพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเฟสมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูป 4.19 (b)-(d) ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการรวมกลุ่มกัน (coalescence) ของพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเฟสทำให้ค่าความต้านแรงดึง ค่ามอดูลัสแรงดึง ค่าความต้านแรงดัดโค้ง และค่า

มอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเมื่อปริมาณพอลิโพรพิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพิ่มขึ้น [Teamsinsungvon, 2010; Hong, Namkung, Ahn, Lee และ Kim, 2006]

การเพิ่มขึ้นของลักษณะการแตกหักแบบเหนียวของพอลิเมอร์คอมโพสิตสามารถยืนยันได้ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 4.20-4.21 โดยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เติมพอลิโพรพิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตแสดงลักษณะการแตกหักแบบเหนียว ซึ่งสามารถสังเกตได้จากลักษณะพื้นผิวที่มีความขรุขระ (ที่กำลังขยาย 200 เท่า) และลักษณะการยืดยาว (elongate) ของเมทริกซ์ที่เกิดขึ้นขณะทดสอบแรงดึง (ที่กำลังขยาย 1500 เท่า) ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (b)-(d) และ 4.21 (b)-(d) ตามลำดับ ซึ่งลักษณะการแตกหักแบบเหนียวเหล่านี้ไม่สามารถพบได้ในพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่มีการปรับปรุงความเหนียว (รูปที่ 4.20 (a) และ 4.21 (a)) นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณพอลิโพรพิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตในพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์คอมโพสิตแสดงขอบเขตของการแตกหักแบบเหนียวเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดและค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีปริมาณพอลิโพรพิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตสูงขึ้น

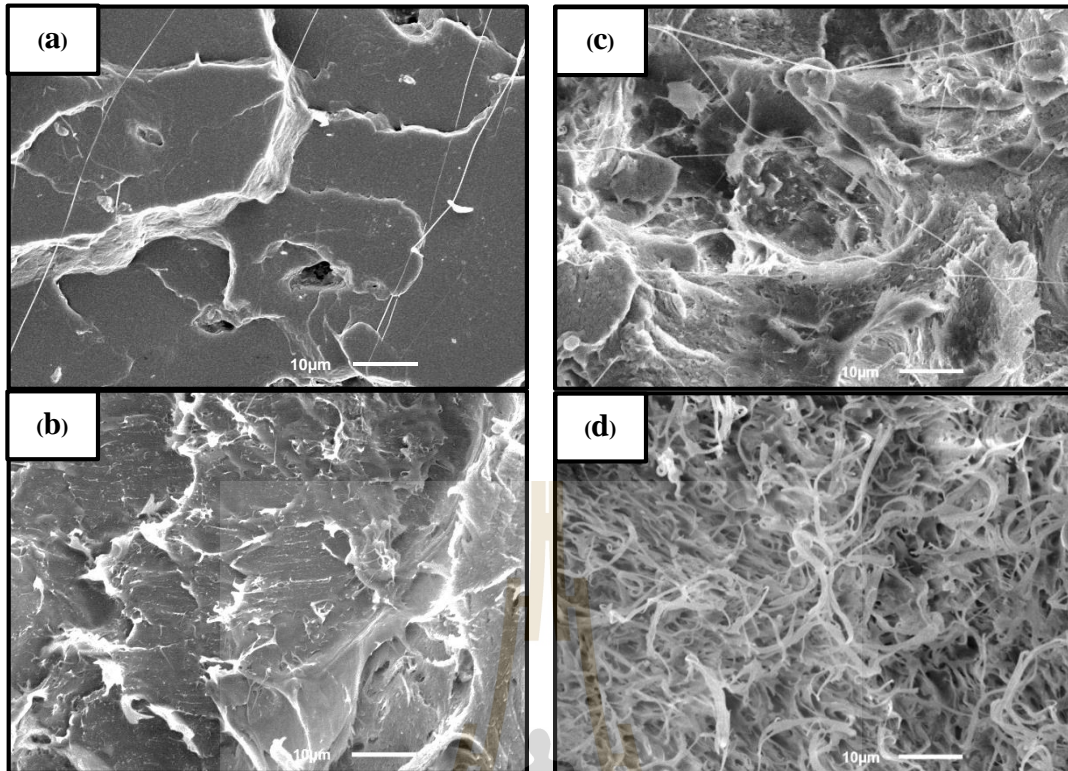


รูปที่ 4.19 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิต (กำลังขยาย 1500 เท่า) (a) PLA/AT30 (b) PLA/AT30/PBAT10 (c) PLA/AT30/PBAT20 และ (d) PLA/AT30/PBAT30



รูปที่ 4.20 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิต (กำลังขยาย 200 เท่า) (a) PLA/AT30 (b) PLA/AT30/PBAT10 (c) PLA/AT30/PBAT20 และ (d) PLA/AT30/PBAT30





รูปที่ 4.21 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิต (กำลังขยาย 1500 เท่า) (a) PLA/AT30 (b) PLA/AT30/PBAT10 (c) PLA/AT30/PBAT20 และ (d) PLA/AT30/PBAT30

เมื่อพิจารณาสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิวิริลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต พบว่าปริมาณพอลิวิริลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิต โดยไม่สูญเสียสมบัติด้านความแข็งแรงและความแข็งดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตมากนัก

4.3 ผลของปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮไดรด์ต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิวิริลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต

4.3.1 สมบัติทางกล

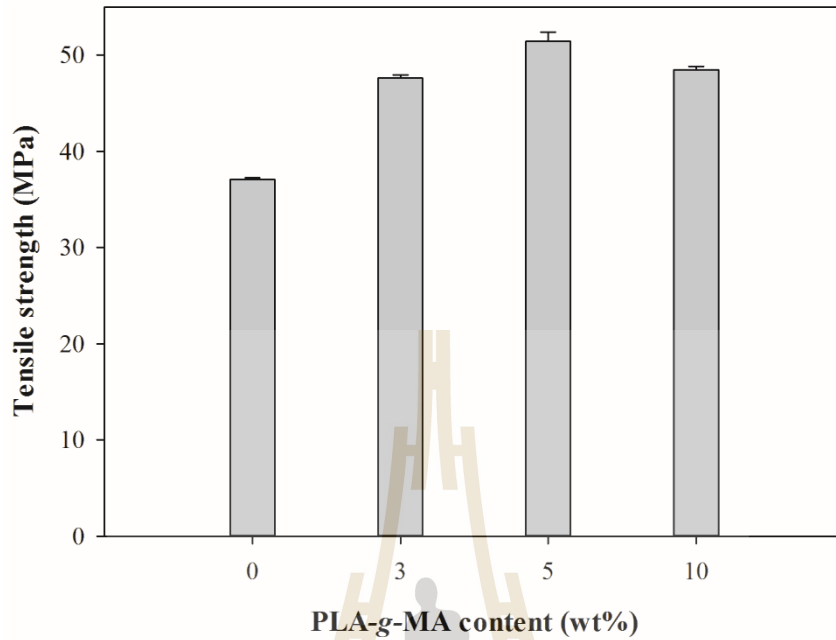
4.3.1.1 สมบัติความต้านแรงดึง

สมบัติความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิวิริลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิด

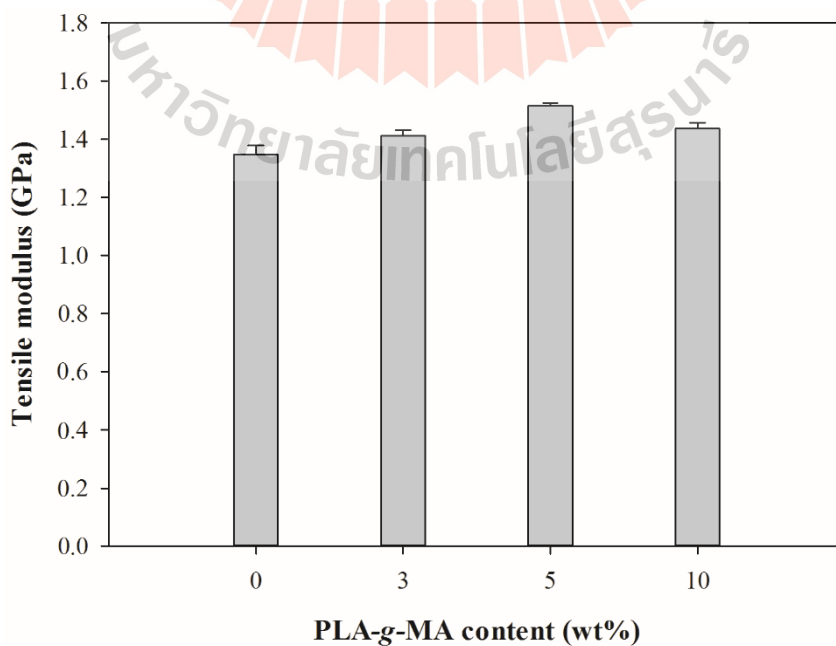
กราฟท์มาลิกอิกแอนไฮโดรด์ต่างๆแสดงในตารางที่ 4.5 ค่าความต้านแรงดึงและค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อใส่พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกอิกแอนไฮโดรด์ 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักเพื่อเป็นสารช่วยให้เข้ากัน (compatibilizer) ทั้งนี้เป็นเพราะสารช่วยให้เข้ากันปรับปรุงการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟสระหว่างพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบในคอมโพสิต โดยการเกิดแรงกระทำระหว่าง โมเลกุล (intermolecular interaction) ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกอิกแอนไฮโดรด์กับสายโซ่ของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต [Lee, 2009; Yuan, Liu และ Ren, 2009] โดยสมบัติความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีค่าสูงสุดเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกอิกแอนไฮโดรด์ไปถึง 5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถปรับปรุงค่าความต้านแรงดึง ค่ามอดุลัสแรงดึง และค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตได้ถึง 50 12 และ 193 เปอร์เซนต์ เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ โดยการเพิ่มขึ้นของสมบัติความต้านแรงดึงนี้สามารถยืนยันได้ด้วยลักษณะทางสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.30 (b)-(d) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตมีความเข้ากันได้มากขึ้นเมื่อใส่สารช่วยให้เข้ากันในพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิต Lee (2009) พบผลคล้ายกันที่ว่าค่าความต้านแรงดึงและค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้ไผ่กับพอลิแลคติกแอซิดที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าสูงขึ้นเมื่อใส่พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกอิกแอนไฮโดรด์เพื่อเป็นสารช่วยให้เข้ากัน

อย่างไรก็ตามค่าความต้านแรงดึง ค่ามอดุลัสแรงดึง และค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกอิกแอนไฮโดรด์ไปจนถึง 10 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.22-4.24 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการที่พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกอิกแอนไฮโดรด์มีหมู่แอนไฮโดรด์ที่อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง (side reactions) ระหว่างการผสม โดยหมู่แอนไฮโดรด์นี้สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการตัดสายโซ่ (chain scission) ของพอลิเมอร์ที่มีพันธะเอสเทอร์ (ester bond) อยู่ในโครงสร้างได้ด้วยการเกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolysis reaction) ซึ่งส่งผลให้ขนาดสายโซ่โมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดสั้นลง จึงส่งผลทำให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงด้วย [Wootthikanokkhan, Kasemwananimit, Sombatsompop, Kositchaiyong, Isarankura na Ayutthaya และ Kaabbuathong, 2012] Sis, Ibrahim และ Yunus (2013) พบผลที่คล้ายกันในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยปอกระเจากับพอลิแลคติกแอซิดที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต โดยพบว่าสมบัติความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ (3-อะมิโนโพรพิล)ไตรเมทอกซีไซเลน ((3-amino propyl)trimethoxysilane, APTMS) 2 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

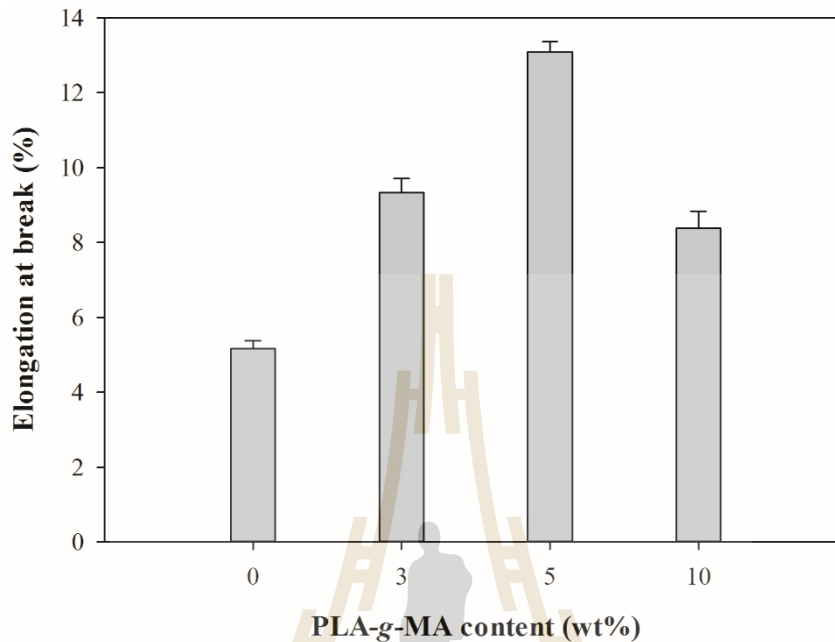
เพื่อเป็นสารช่วยให้เข้ากัน แต่เมื่อใส่ (3-อะมิโนโพรพิล) ไตรเมทอกซีไซเลน ในปริมาณเกินกว่า 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สมบัติความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตมีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.22 ค่าความต้านแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีเยนที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ



รูปที่ 4.23 ค่ามอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ



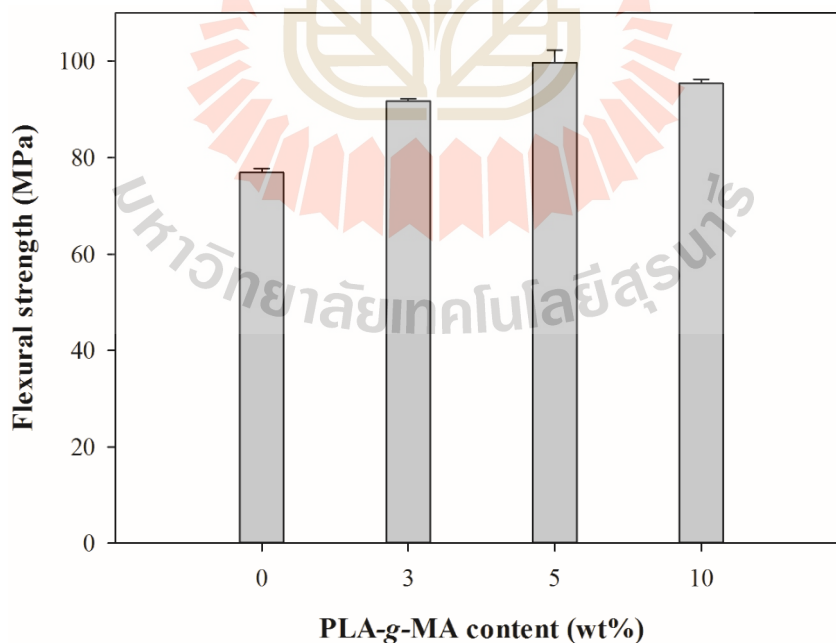
รูปที่ 4.24 ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ

4.3.1.2 สมบัติความต้านแรงดัดโค้ง

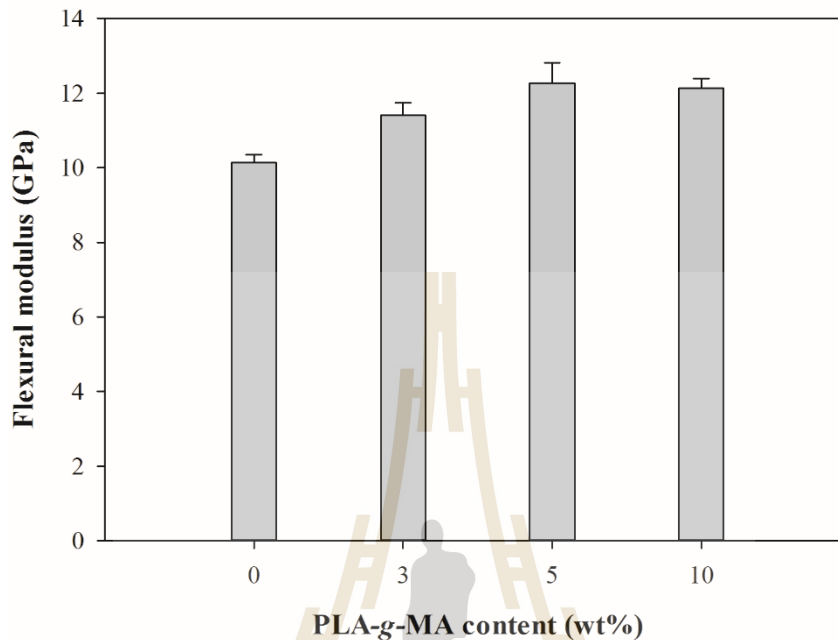
สมบัติความต้านแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.5 ค่าความต้านแรงดัดโค้งและค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตแสดงแนวโน้มที่คล้ายกันกับค่าความต้านแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยค่าความต้านแรงดัดโค้งและค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใส่พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ไปจนถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.25-4.26 ทั้งนี้เป็นเพราะการปรับปรุงการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตด้วยแรงกระทำระหว่างโมเลกุลกับพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ [Lee, 2009; Yuan และคณะ, 2009] โดยค่าความต้านแรงดัดโค้งและค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพิ่มขึ้น

30 และ 21 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตที่ไม่ได้ปรับปรุง ความความเข้ากันได้ Lee (2009) พบว่าค่าความต้านแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผง ไม้ไผ่กับพอลิแลคติกแอซิดที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าสูงขึ้นเมื่อใส่พอลิ แลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์เพื่อเป็นสารช่วยให้เข้ากัน

แต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านแรงดัดโค้งและค่ามอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิแลคติก แอซิดคอมโพสิตที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.25 และ 4.26 ตามลำดับ ซึ่งน่าจะเป็นผล เนื่องจากเกิดการตัดสายโซ่ของพอลิแลคติกแอซิดเมื่อใช้พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮ ไดรด์ในปริมาณที่มากเกินไป ส่งผลทำให้ขนาดสายโซ่ของพอลิแลคติกแอซิดสั้นลง จึงส่งผลให้ค่า ความต้านแรงดัดโค้งและค่ามอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตมีค่าลดลง Sis และ คณะ (2013) พบว่าเมื่อใส่สารช่วยให้เข้ากัน คือ (3-อะมิโนโพรพิล)ไตรเมทอกซีไซเลน 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยปอกระเจากับพอลิแลคติกแอซิดที่ปรับปรุงความ เหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ทำให้ค่าความต้านแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ คอมโพสิตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความเข้ากันระหว่างองค์ประกอบของพอลิเมอร์ คอมโพสิตดีขึ้น แต่ค่าความต้านแรงดัดโค้งและค่ามอดุลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตมี แนวโน้มลดลงเมื่อใส่ปริมาณ(3-อะมิโนโพรพิล)ไตรเมทอกซีไซเลนเกินกว่า 2 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก



รูปที่ 4.25 ค่าความต้านแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮโดรด์ต่างๆ



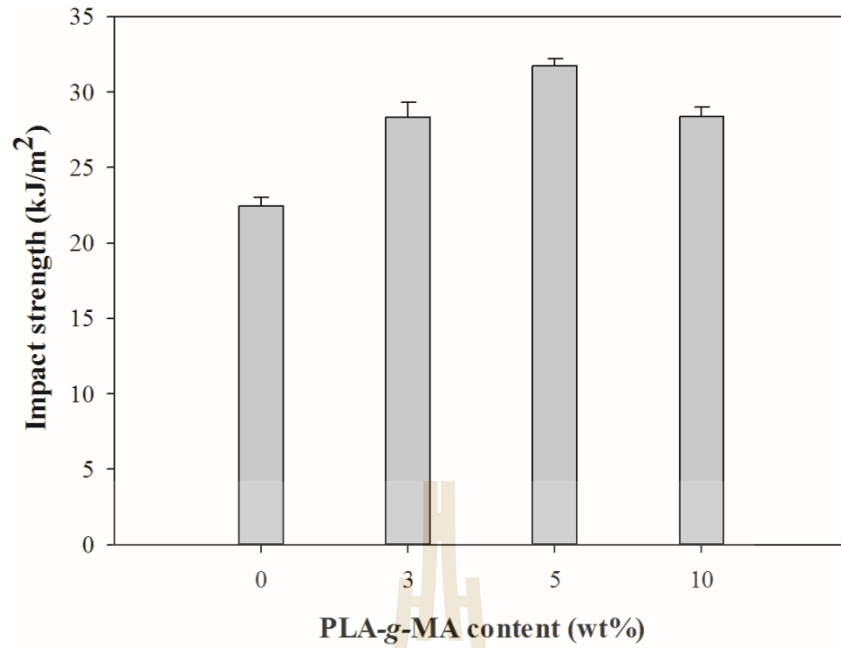
รูปที่ 4.26 ค่ามอดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮโดรด์ต่างๆ

4.3.1.3 สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก

ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮโดรด์ต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.27 และตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเมื่อใส่พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮโดรด์เพื่อเป็นสารช่วยให้เข้ากันในพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตที่ 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้น 26 และ 46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮโดรด์สามารถช่วยปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตได้ด้วยการเพิ่มการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อใส่พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮโดรด์เพิ่มขึ้นถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลง น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากเกิดการตัดสายโซ่โมเลกุลของพอลิแลคติกแอซิดระหว่างการผสม Sis และคณะ (2013)

พบผลที่คล้ายกันในพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยปอกระเจากับพอลิแลคติกแอซิดที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิวินิลอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต โดยพบว่าเมื่อใส่ (3-อะมิโนโพรพิล)ไตรเมทอกซีไซเลน 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้น 22 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลงเมื่อใส่สารช่วยให้เข้ากัน ปริมาณเกินกว่า 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

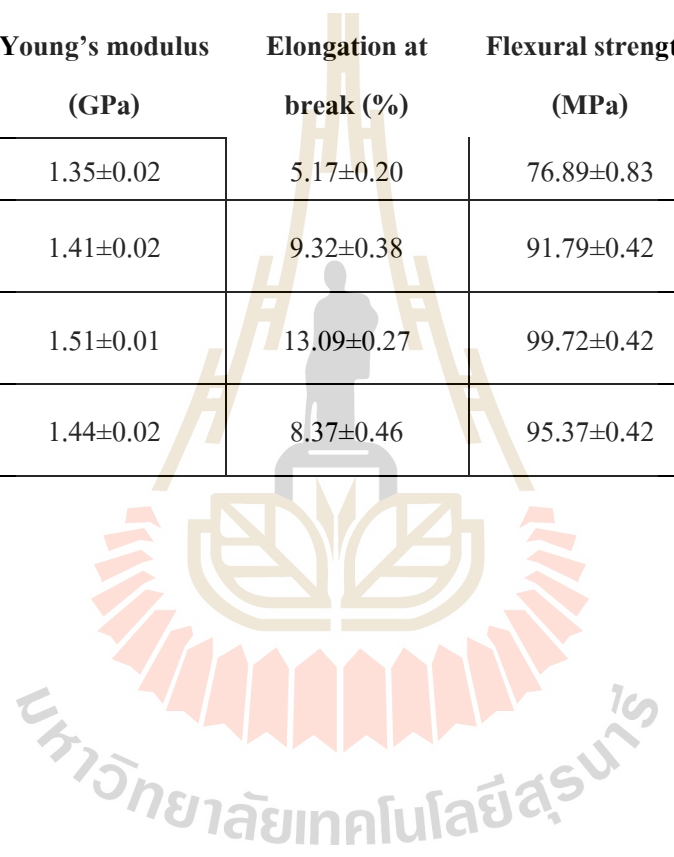




รูปที่ 4.27 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีเนียมที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีออยที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ

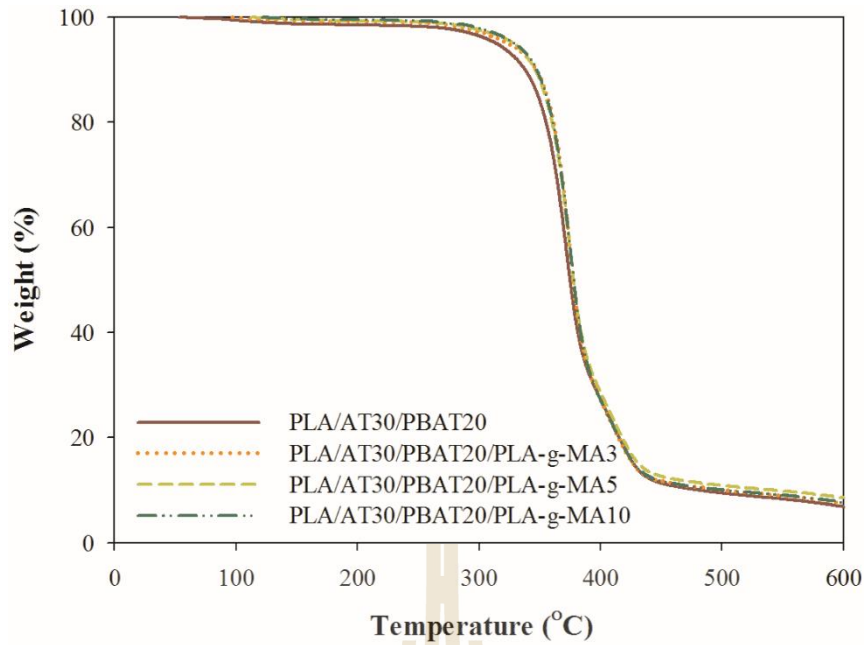
Formulation	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (GPa)	Impact strength (kJ/m ²)
PLA/AT30/PBAT20	37.05±0.21	1.35±0.02	5.17±0.20	76.89±0.83	10.13±0.22	22.47±0.54
PLA/AT30/PBAT20/ PLA-g-MA3	47.60±0.34	1.41±0.02	9.32±0.38	91.79±0.42	11.40±0.33	28.34±0.99
PLA/AT30/PBAT20/ PLA-g-MA5	51.40±0.98	1.51±0.01	13.09±0.27	99.72±0.42	12.27±0.53	31.75±0.47
PLA/AT30/PBAT20/ PLA-g-MA10	48.44±0.35	1.44±0.02	8.37±0.46	95.37±0.42	12.12±0.27	28.38±0.64



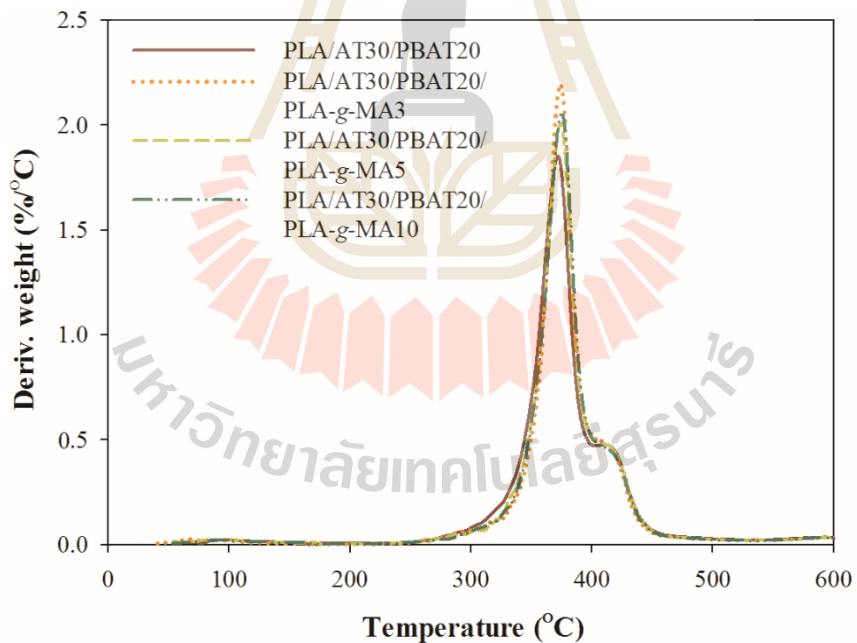
4.3.2 สมบัติทางความร้อน

กราฟ TGA และ DTA ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีเนียมที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ และค่าอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีเนียมที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.6 โดยจากกราฟ DTA ในรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่าพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตทั้งที่ไม่มีและมีการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์แสดงขั้นตอนในการเสื่อมสลายด้วยความร้อนสองขั้นตอน โดยการเสื่อมสลายด้วยความร้อนขั้นแรก ($T_{d,1}$) ที่อุณหภูมิประมาณ 370 องศาเซลเซียส เป็นการเสื่อมสลายของผงซีลีเนียมและพอลิแลคติกแอซิด และการเสื่อมสลายด้วยความร้อนขั้นที่สอง ($T_{d,2}$) ที่อุณหภูมิประมาณ 414 องศาเซลเซียส เป็นการเสื่อมสลายของพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่การสูญเสียน้ำหนัก 5 เปอร์เซ็นต์ (thermal decomposition temperature at 5% weight loss, T_5) อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่การสูญเสียน้ำหนัก 50 เปอร์เซ็นต์ (thermal decomposition temperature at 50% weight loss, T_{50}) อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนขั้นแรกและอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนขั้นที่สองของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่มีปรับปรุงความเข้ากันได้ มีค่า 314.18 374.76 372.00 และ 413.83 องศาเซลเซียสตามลำดับ นอกจากนี้พอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ยังมีอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่สูงกว่าพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตที่ไม่มีปรับปรุงความเข้ากันได้ แสดงให้เห็นว่าพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตมีความเสถียรต่อความร้อนที่ดีขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.6 เป็นผลเนื่องจากความเข้ากันระหว่างองค์ประกอบของพอลิเมอร์คอมโพสิตดีขึ้น Lee (2009) พบว่าอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้ไผ่กับพอลิแลคติกแอซิดที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าสูงขึ้นเมื่อใส่พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์เพื่อเป็นสารช่วยให้เข้ากัน

อย่างไรก็ตามอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนและปริมาณเถ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ที่เพิ่มขึ้น Yao (2008) พบผลที่คล้ายกันว่าปริมาณสารช่วยให้เข้ากันไม่ส่งผลต่อความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยฟางข้าวกับพอลิเอทิลีนที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิเอทิลีน/พอลิโพรพิลีน โคลิเมอร์



รูปที่ 4.28 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอีกแอนไฮไดรด์ต่างๆ



รูปที่ 4.29 กราฟ DTA ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอีกแอนไฮไดรด์ต่างๆ

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพลิทีระหว่างพอลิแลคติก-แอซิดและผงซีลีอ์ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮโดรด์ต่างๆ

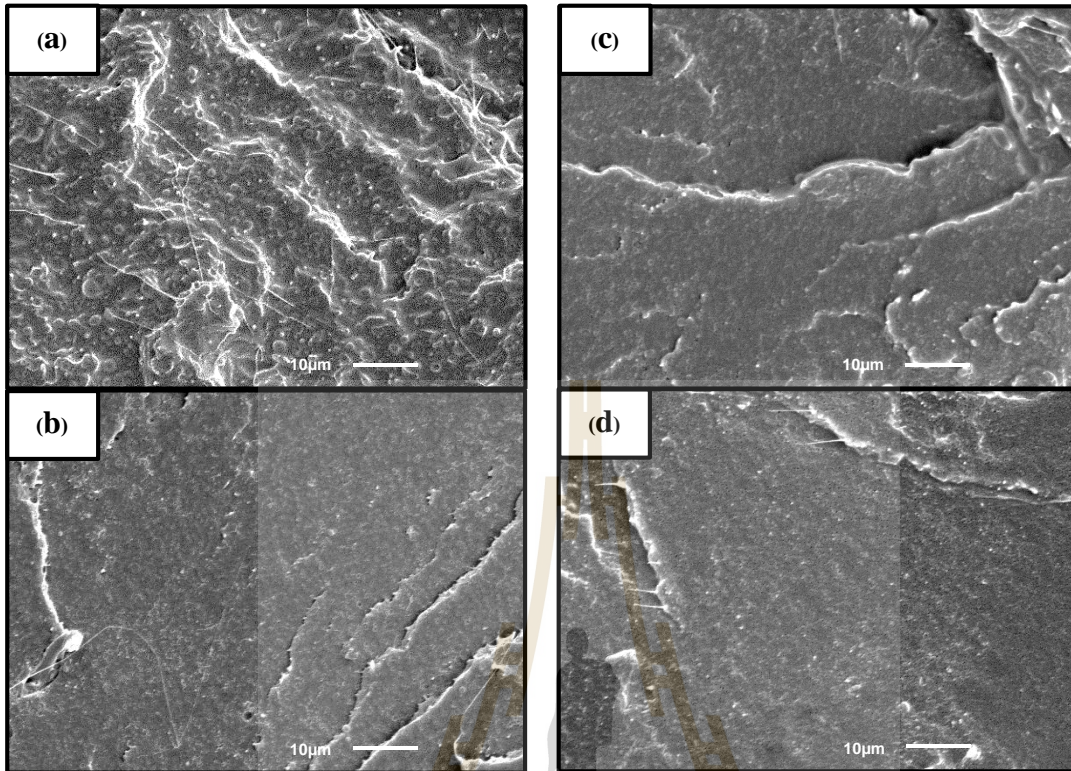
Formulation	T ₅ (°C)	T ₅₀ (°C)	T _{d,1} (°C)	T _{d,2} (°C)	Residue at 600°C (%)
PLA/AT30/PBAT20	314.18	374.76	372.00	413.82	6.85
PLA/AT30/PBAT20/ PLA-g-MA3	323.82	377.23	375.77	413.40	7.54
PLA/AT30/PBAT20/ PLA-g-MA5	328.54	377.68	376.45	413.56	8.52
PLA/AT30/PBAT20/ PLA-g-MA10	329.07	377.91	376.02	413.72	7.67

4.3.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

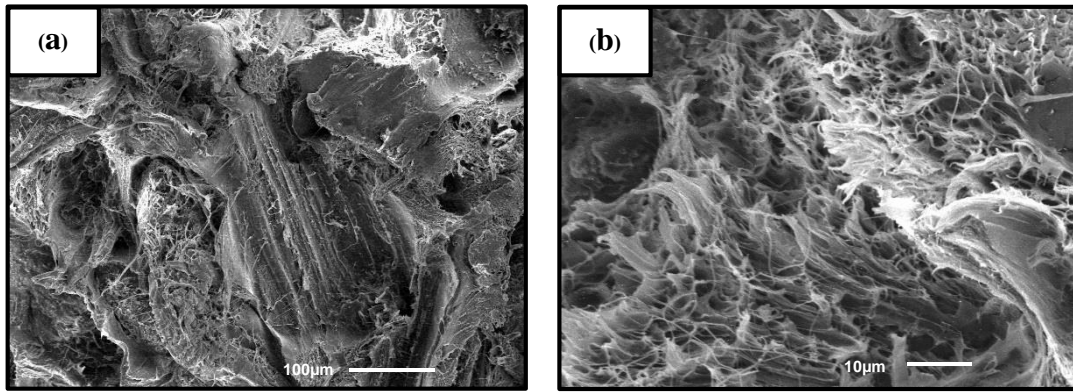
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกที่กำลังขยาย 1500 เท่าของพอลิเมอร์คอมโพลิทีระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีอ์ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮโดรด์ต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.30 โดยรูปที่ 4.30 (a) แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์คอมโพลิทีที่ไม่มีการใส่สารช่วยให้เข้ากันมีขนาดเฟสกระจายของพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตในพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์มีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ โดยขนาดเฟสกระจายของพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตในพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์นี้ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อใส่พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮโดรด์เพื่อเป็นสารช่วยให้เข้ากันดังแสดงในรูปที่ 4.30 (b)-(d) แสดงให้เห็นว่าพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮโดรด์สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตได้ดี [Jafari, Asadinezhad, Yavari, Khonakdar, Böhme, 2005]

นอกจากนี้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพลิทีระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลีอ์ที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต และปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮโดรด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 200 เท่า (รูปที่ 4.31 (a)) แสดงให้เห็นถึงการยึดติดที่ดีบริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างองค์ประกอบของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพลิที นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นได้ว่าพอลิเมอร์คอมโพลิทีที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ยังคงแสดงลักษณะพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียว โดยสังเกตได้จากการยึดตัวของเมทริกซ์ที่กำลังขยาย 1500 เท่า (รูปที่ 4.31 (b)) ลักษณะสัณฐานวิทยาเช่นนี้ส่งผลให้พอลิเมอร์คอมโพลิทีที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแล

คติกราดภาพที่มอลีกแอนไฮโดรคมีสมบัติโดยรวมดีขึ้น ทั้งในด้านความแข็งตึง ความแข็งแรง และความเหนียว



รูปที่ 4.30 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระทำของพอลิเมอร์คอมโพสิต (กำลังขยาย 1500 เท่า) (a) PLA/AT30/PBAT20 (b) PLA/AT30/PBAT20/PLA-g-MA3 (c) PLA/AT30/PBAT20/PLA-g-MA5 และ (d) PLA/AT30/PBAT20/PLA-g-MA10



รูปที่ 4.31 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของ พอลิเมอร์คอมโพสิต PLA/AT30/PBAT20/PLA-g-MA5 (a) กำลังขยาย 200 เท่า และ (b) กำลังขยาย 1500 เท่า



บทที่ 5

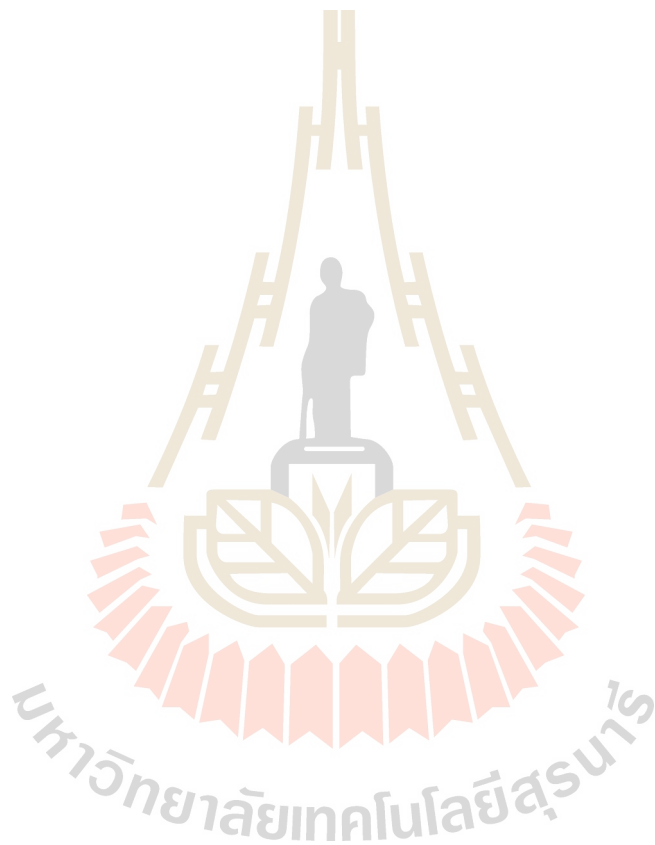
บทสรุป

จากผลของการทำอัลคาไลเซชันและปริมาณผงซีลี้อยู่ต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และ
ลักษณะของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ พบว่าค่า โมดูลัสแรงดึงและ
ค่าโมดูลัสแรงดัดโค้งของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณผงซีลี้อยู่ที่ไม่
ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความต้านแรงดึง ค่าความต้านแรงดัดโค้ง ค่า
ความต้านทานต่อแรงกระแทก และค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากการกระจายของผงซีลี้อยู่ที่
ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันในพอลิแลคติกแอซิดไม่ดี และการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซ
ระหว่างผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันกับพอลิแลคติกแอซิดที่ต่ำ นอกจากนี้ความ
เสถียรต่อความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตก็ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการ
ตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบในผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการ
ทำอัลคาไลเซชัน เช่น สารสีผง และสารปนเปื้อนอื่นๆ และเฮมิเซลลูโลสมีอุณหภูมิเสื่อมสลายด้วยความ
ร้อนต่ำกว่าพอลิ แลคติกแอซิด ส่งผลทำให้ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดแอซิด
คอมโพสิตลดลง อย่างไรก็ตามสมบัติทางกลและความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง
พอลิ แลคติกแอซิดและผงซีลี้อยู่ที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ
พอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากผงซีลี้อยู่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันที่ปริมาณผงซีลี้อยู่
เท่ากัน เป็นผลเนื่องมาจากการปรับปรุงการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างผงซีลี้อยู่ที่ผ่านการตัด
แปรด้วยการทำอัลคาไลเซชันและพอลิแลคติกแอซิดที่ดีขึ้น โดยลักษณะทางฐานวิทยาศาสตร์สามารถยืนยันได้
ว่าการตัดแปรผงซีลี้อยู่ด้วยการทำอัลคาไลเซชันปรับปรุงการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างผงซีลี้อยู่
และพอลิแลคติกแอซิด และการกระจายตัวของผงซีลี้อยู่ในพอลิแลคติกแอซิดเมทริกซ์ให้ดีขึ้นได้

เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิบิวทิรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตลงในพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิต พบว่าค่า
ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิดคอมโพสิตเพิ่มขึ้น แต่
ค่าความต้านแรงดึง ค่าโมดูลัสแรงดึง ค่าความต้านแรงดัดโค้ง และค่าโมดูลัสแรงดัดโค้งลดลง เป็นผล
เนื่องจากความอ่อนนุ่มของพอลิบิวทิรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต และความไม่เข้ากันระหว่างพอลิแลคติก
แอซิดและพอลิบิวทิรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต อย่างไรก็ตามความเสถียรต่อความร้อนของพอลิแลคติก
แอซิดคอมโพสิตสูงขึ้น เมื่อปริมาณของพอลิบิวทิรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิบิวทิ
รีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตมีอุณหภูมิเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่สูงกว่าพอลิแลคติกแอซิด และ
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทาน
ต่อแรงดึงของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต
แสดงให้เห็นถึงลักษณะของการแตกหักแบบเหนียว

พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ปรับปรุงสมบัติทางกลและความเสถียรต่อความร้อน
ของพอลิเมอร์คอมโพสิต เนื่องจากสารช่วยให้เข้ากันปรับปรุงการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างพอลิ

เมอร์ที่เป็นองค์ประกอบในคอมโพสิต โดยการเกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์กับสายโซ่ของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต โดยปริมาณพอลิแลคติกแอซิด กราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพวงจี้เดี่ยวที่ปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต คือ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ลักษณะทางสัณฐานวิทยายังสามารถยืนยันได้ว่าพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตให้ดีขึ้นได้



บรรณานุกรม

- กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2010. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) (ออนไลน์). เข้าได้จาก: <http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR12.pdf>.
- Afrifah, K. A., and Matuana, L. M. (2013). Fracture toughness of poly(lactic acid)/ethylene acrylate copolymer/wood-flour composite ternary blends. Polym. Int. 62. 7. 1053-1058.
- Arbelaiz, A., Fernández, B., Valea, A., and Mondragon, I. (2006). Mechanical properties of short flax fibre bundle/ poly(ϵ - caprolactone) composites: Influence of matrix modification and fibre content. Carbohydr. Polym. 64. 2. 224-232.
- Aydin, M., Tozlu, H., Kemaloglu, S., Aytac, A., and Ozkoc, G. (2011). Effects of alkali treatment on the properties of short flax fiber-poly(lactic acid) eco-composites. J. Polym. Environ. 19. 1. 11-17.
- Bachtiar, D., Sapuan, S. M., Zainudin, E. S., Khalina, A., and Dahlan, K. Z. H. M. (2013). Thermal properties of alkali- treated sugar palm fibre reinforced high impact polystyrene composites. Pertanika J. Sci. & Technol. 21. 1. 141-150.
- Bettini, S. H. P., Bonse, B. C., Melo, E. A., and Muñoz, P. A. R. (2010). Effect of sawdust surface treatment and compatibilizer addition on mechanical behavior, morphology, and moisture uptake of polypropylene/sawdust composites. Polym. Eng. Sci. 50. 5. 978-985.
- Bwire, S. N., Christian, N., and Joseph, T. (2007). Chemical and thermal stability of rice husks against alkali treatment. BioRes. 3. 4. 1267-1277.
- Cai, G., Wang, J., Nie, Y., Tian, X., Zhu, X., and Zhou, X. (2011). Effects of toughening agents on the behaviors of bamboo plastic composites. Polym. Compos. 32. 12. 1945-1952.
- Chen, F., Liu, L., Cooke, P. H., Hicks, K. B., and Zhang, J. (2008). Performance enhancement of poly(lactic acid) and sugar beet pulp composites by improving interfacial adhesion and penetration. Ind. Eng. Chem. Res. 47. 22. 8667-8675.
- Chun, K., Husseinsyah, S., and Osman, H. (2012). Mechanical and thermal properties of coconut shell powder filled polylactic acid biocomposites: Effects of the filler content and silane coupling agent. J. Polym. Res. 19. 5. 1-8.
- Edeerozey, A. M. M., Akil, H. M., Azhar, A. B., and Ariffin, M. I. Z. (2007). Chemical modification of kenaf fibers. Mater. Lett. 61. 10. 2023-2025.
- Gassan, J., Gutowski, V. S., and Bledzki, A. K. (2000). About the surface characteristics of natural fibres. Macromol. Mater. Eng. 283. 1. 132-139.

- Goriparthi, B. K., Suman, K. N. S., and Nalluri, M. R. (2012). Processing and characterization of jute fiber reinforced hybrid biocomposites based on polylactide/polycaprolactone blends. Polym. Compos. 33. 2. 237-244.
- Hakkou, M., Petrisana, M., Zoulalian, A., and Gerardin, P. (2005). Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. Polym. Degrad. Stab. 89. 1. 1-5.
- Haq, M., Burgueño, R., Mohanty, A. K., and Misra, M. (2008). Hybrid bio-based composites from blends of unsaturated polyester and soybean oil reinforced with nanoclay and natural fibers. Compos. Sci. Technol. 68. 15-16. 3344-3351.
- Hong, J. S., Namkung, H., Ahn, K. H., Lee, S. J., and Kim, C. (2006). The role of organically modified layered silicate in the breakup and coalescence of droplets in PBT/PE blends. Polymer. 47. 11. 3967-3975.
- Hu, R. and Lim, J. K. (2007). Fabrication and mechanical properties of completely biodegradable hemp fiber reinforced poly(lactic acid) composites. J. Compos. Mater. 41. 13. 1655-1669.
- Huda, M. S., Drzal, L. T., Misra, M., and Mohanty, A. K. (2006). Wood-fiber-reinforced poly(lactic acid) composites: evaluation of the physicomechanical and morphological properties. J. Appl. Polym. Sci. 102. 5. 4856-4869.
- Islam, M. S., Pickering, K. L., and Foreman, N. J. (2010). Influence of alkali treatment on the interfacial and physico-mechanical properties of industrial hemp fibre reinforced polylactic acid composites. Composites Part A. 41. 5. 596-603.
- Jafari, S. H., Asadinezhad, A., Yavari, A., Khonakdar, H. A., Böhme, F. (2005). Compatibilizing effects on the phase morphology and thermal properties of polymer blends based on PTT and m-LLDPE. Polym. Bull. 54. 417-426.
- Jandas, P. J., Mohanty, S., Nayak, S. K., and Srivastava, H. (2011). Effect of surface treatments of banana fiber on mechanical, thermal, and biodegradability properties of PLA/banana fiber biocomposites. Polym. Compos. 32. 11. 1689-1700.
- Jiang, F. and Qin, T. (2006). Toughening wood/polypropylene composites with polyethylene octene elastomer (POE). J. For. Res. 17. 4. 312-314.
- Kfoury, G., Raquez, J. M., Hassouna, F., Odent, J., Toniazzo, V., Ruch, D., and Dubois, P. (2013). Recent advances in high performance poly(lactide): From “green” plasticization to super-tough materials via (reactive) compounding. Front. Chem. 1. 32. 1-46.
- Ko, S. W., Hong, M. K., Park, B. J., Gupta, R. K., Choi, H. J., and Bhattacharya, S. N. (2009). Morphological and rheological characterization of multi-walled carbon nanotube/PLA/ PBAT blend nanocomposites. Polym. Bull. 63. 1. 125-134.

- Kumar, A., Negi, Y. S., Choudhary, V., Bhardwaj, N. K. (2014). Characterization of cellulose nanocrystals produced by acid-hydrolysis from sugarcane bagasse as agro-waste. *J. Mater. Phys. Chem.* 2. 1. 1-8.
- Kumar, M., Mohanty, S., Nayak, S. K., and Rahail Parvaiz, M. (2010). Effect of glycidyl methacrylate (GMA) on the thermal, mechanical and morphological property of biodegradable PLA/PBAT blend and its nanocomposites. *Bioresour. Technol.* 101. 21. 8406-8415.
- Lee, S. (2009). Evaluation on the high flexible polylactic acid and bamboo flour bio-composite by melting blend. Master Thesis. Program in Environmental Materials Science. Seoul National University.
- Lee, S. H. and Wang, S. (2006). Biodegradable polymers/bamboo fiber biocomposite with bio-based coupling agent. *Composites Part A.* 37. 1. 80-91.
- Lee, S. Y., Kang, I. A., Doh, G. H., Yoon, H. G., Park, B. D., and Wu, Q. (2008). Thermal and mechanical properties of wood flour/talc-filled polylactic acid composites: effect of filler content and coupling treatment. *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 21. 209-223.
- Li, Z., Zhou, X., and Pei, C. (2011). Effect of sisal fiber surface treatment on properties of sisal fiber reinforced polylactide composites. *Int. J. Polym. Sci.* 2011. doi:10.1155/2011/803428.
- Liu, H., Wu, Q., Han, G., Yao, F., Kojima, Y., and Suzuki, S. (2008). Compatibilizing and toughening bamboo flour-filled HDPE composites: Mechanical properties and morphologies. *Composites Part A.* 39. 12. 1891-1900.
- Liu, L., Yu, J., Cheng, L., and Yang, X. (2009). Biodegradability of poly(butylene succinate) (PBS) composite reinforced with jute fibre. *Polym. Degrad. Stab.* 94. 1. 90-94.
- Liu, T., Yu, F., Yu, X., Zhao, X., Lu, A., and Wang, J. (2012). Basalt fiber reinforced and elastomer toughened polylactide composites: Mechanical properties, rheology, crystallization, and morphology. *J. Appl. Polym. Sci.* 125. 2. 1292-1301.
- Liu, W., Mohanty, A. K., Drzal, L. T., Askel, P., and Misra, M. (2004). Effects of alkali treatment on the structure, morphology and thermal properties of native grass fibers as reinforcements for polymer matrix composites. *J. Mater. Sci.* 39. 1051-1054.
- Lopattananon, N., Panawarangkul, K., Sahakaro, K., and Ellis, B. (2006). Performance of pineapple leaf fiber-natural rubber composites: The effect of fiber surface treatments. *J. Appl. Polym. Sci.* 102. 1974-1984.
- Ming-Zhu, P., Chang-Tong, M., Xu-Bing, Z., and Yun-Lei, P. (2011). Effects of rice straw fiber morphology and content on the mechanical and thermal properties of rice straw fiber high density polyethylene composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 121. 5. 2900-2907.

- Mohamad Haafiz, M. K., Eichhorn, S. J., Hassan, A., and Jawaid, M. (2013). Isolation and characterization of microcrystalline cellulose from oil palm biomass residue. *Carbohydr. Polym.* 93. 2. 628-634.
- Ochi, S. (2006). Development of high strength biodegradable composites using manila hemp fiber and starch-based biodegradable resin. *Composites Part A*, 37. 1879-1883.
- Petinakis, E., Yu, L., Edward, G., Dean, K., Liu, H., and Scully, A. (2009). Effect of matrix-particle interfacial adhesion on the mechanical properties of poly(lactic acid) / wood-flour micro-composites. *J. Polym. Environ.* 17. 2. 83-94.
- Pilla, S., Gong, S., O'Neill, E., Rowell, R. M., and Krzysik, A. M. (2008). Polylactide-pine wood flour composites. *Polym. Eng. Sci.* 48. 3. 578-587.
- Qian, S., Mao, H., Sheng, K., Lu, J., Luo, Y., and Hou, C. (2013). Effect of low-concentration alkali solution pretreatment on the properties of bamboo particles reinforced poly(lactic acid) composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 130. 3. 1667-1674.
- Qiang, T., Yu, D., and Gao, H. (2012). Wood flour/polylactide biocomposites toughened with polyhydroxyalkanoates. *J. Appl. Polym. Sci.* 124. 3. 1831-1839.
- Ragoubi, M., George, B., Molina, S., Bienaimé, D., Merlin, A., Hiver, J. M., and Dahoun, A. (2012). Effect of corona discharge treatment on mechanical and thermal properties of composites based on miscanthus fibres and polylactic acid or polypropylene matrix. *Composites Part A*, 43. 4. 675-685.
- Rong, M. Z., Zhang, M. Q., Liu, Y., Yang, G. C., and Zeng, H. M. (2001). The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. *Compos. Sci. Technol.* 61. 10. 1437-1447.
- Rosa, M. F., Chiou, B., Medeiros, E. S., Wood, D. F., Williams, T. G., Mattoso, L. H. Orts, W. J., and Imam, S. H. (2009). Effect of fiber treatments on tensile and thermal properties of starch/ethylene vinyl alcohol copolymers/coir biocomposites. *Bioresour. Technol.* 100. 21. 5196-5202.
- Sawpan, M. A., Pickering, K. L., and Fernyhough, A. (2011). Improvement of mechanical performance of industrial hemp fibre reinforced polylactide biocomposites. *Composites Part A*, 42. 3. 310-319.
- Seong, O. H., Mehdi, K., Sim, I. N., Bhuiyan, M. A., Jang, Y. H., Ghaffar, J., and Kalaitzidon, K. (2012). Understanding the reinforcing mechanisms in kenaf fiber/PLA and kenaf fiber/PP composites: A comparative study. *Int. J. Polym. Sci.* 2012. 1-8. doi:10.1155/2012/679252
- Sis, A., Ibrahim, N., and Yunus, W. (2013). Effect of (3-aminopropyl)trimethoxysilane on mechanical properties of PLA/PBAT blend reinforced kenaf fiber. *Iran. Polym. J.* 22. 2. 101-108.
- Sombatsompop, N., Yotinwattanakumtorn, C., and Thongpin, C. (2005). Influence of type and concentration of maleic anhydride grafted polypropylene and impact modifiers on mechanical properties of PP/wood sawdust composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 97. 2. 475-484.

- Srubar Iii, W. V., Pilla, S., Wright, Z. C., Ryan, C. A., Greene, J. P., Frank, C. W., and Billington, S. L. (2012). Mechanisms and impact of fiber-matrix compatibilization techniques on the material characterization of PHBV/oak wood flour engineered biobased composites. Compos. Sci. Technol. 72. 6. 708-715.
- Tawakkal, I. S. M. A., Talib, R. A., Abdan, K. and Ling, C. N. (2012). Mechanical and physical properties of kenaf derived cellulose (KDC)-filled polylactic acid (PLA) composites. BioRes. 7. 2. 1643-1655.
- Teamsinsungvon, A. (2010). Physical properties of poly(lactic acid) / poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends and their composites. Master Thesis. School of Polymer Engineering. Suranaree University of Technology.
- Tran, H. N., Ogihara, S., and Kobayashi, S. (2011). Mechanical properties of short coir/PBS biodegradable composites: effect of alkali treatment and fiber content. 18TH International Conference on Composite Materials (ICCM-18). Jeju, Korea, August 21-26.
- Tran, H. N., Ogihara, S., Nguyen, H. T., and Kobayashi, S. (2011). Effect of alkali treatment on interfacial and mechanical properties of coir fiber reinforced poly(butylene succinate) biodegradable composites. Composites Part B. 42. 6. 1648-1656.
- Wenjia, J., Kaushlendra, S., and John, Z. (2013). Pyrolysis kinetics of physical components of wood and wood-polymers using isoconversion method. Agriculture. 3. 1. 12-32.
- Wootthikanokkhan, J., Kasemwananimit, P., Sombatsompop, N., Kositchaiyong, A., Isarankura na Ayutthaya, S., and Kaabbuathong, N. (2012). Preparation of modified starch-grafted poly(lactic acid) and a study on compatibilizing efficacy of the copolymers in poly(lactic acid)/thermoplastic starch blends. J. Appl. Polym. Sci. 126. S1. E389-E396.
- Wu, C. S. (2011). Process, characterization and biodegradability of aliphatic aromatic polyester/sisal fiber composites. J. Polym. Environ. 19. 3. 706-713.
- Yao, F. (2008). Rice straw fiber polymer composites: thermal and mechanical performance. Master Thesis. School of Renewable Natural Resources. Louisiana State University.
- Yao, F., Wu, Q., Liu, H., Lei, Y., and Zhou, D. (2011). Rice straw fiber reinforced high density polyethylene composite: Effect of coupled compatibilizing and toughening treatment. J. Appl. Polym. Sci. 119. 4. 2214-2222.
- Yu, T., Ren, J., Li, S., Yuan, H., and Li, Y. (2010). Effect of fiber surface-treatments on the properties of poly(lactic acid)/ramie composites. Composites Part A. 41. 4. 499-505.
- Yuan, H., Liu, Z., and Ren, J. (2009). Preparation, characterization, and foaming behavior of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-butylene terephthalate) blend. Polym. Eng. Sci. 49. 5. 1004-1012.

ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการ

นางสาว กษมา จารุกัจฉา ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ สถานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 การศึกษา พ.ศ.
2533 วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2536 วิทยาศาสตร
มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) มหาวิทยาลัยมหิดล และ พ.ศ. 2542 Ph.D. (Polymer Engineering)
University of Akron, OH, USA สาขาวิชาการที่มีความสนใจ กระบวนการขึ้นรูปและตรวจสอบพอลิเมอร์
(polymer processing and characterization) และ พอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต (polymer blends and
composites) ผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ
35 บทความ และรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 15 ฉบับ

