คอมโพสิตที่ย่อยสลายได้จากพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร : แกลบ, เปลือกทุเรียน และใบสับปะรด

อนันต์ สิริเฉลิมกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คอมโพสิตที่ย่อยสลายได้จากพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร : แกลบ, เปลือกทุเรียน และใบสับปะรด

อนันต์ สิริเฉลิมกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

BIODEGRADABLE COMPOSITES FROM POLY(LACTIC ACID) AND AGRICULTURAL WASTE : RICE HUSK, DURIAN BARK AND PINEAPPLE LEAVES

ANAN SIRICHALARMKUL

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF

THE REQUIREMENTS FOR MASTER OF SCIENCE

IN POLYMER SCIENCE

FACULTY OF SCIENCE

BURAPHA UNIVERSITY

2021

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของ อนันต์ สิริเฉลิมกุล ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุปราณี แก้วภิรมย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรเพ็ญ อาทรกิจวัฒน์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุปราณี แก้วภิรมย์)

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกรัฐ ศรีสุข)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.นุจรี ไชยมงคล)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

61910066: สาขาวิชา: วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์; วท.ม. (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์)
คำสำคัญ: คอมโพสิตที่ย่อยสลายได้, แกลบ, เปลือกทุเรียน, ใบสับปะรด, การฉีดขึ้นรูปพลาสติก

อนันต์ สิริเฉลิมกุล : คอมโพสิตที่ย่อยสลายได้จากพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร : แกลบ, เปลือกทุเรียน และใบสับปะรด. (BIODEGRADABLE COMPOSITES FROM POLY(LACTIC ACID) AND AGRICULTURAL WASTE : RICE HUSK, DURIAN BARK AND PINEAPPLE LEAVES) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: สุปราณี แก้วภิรมย์ ปี พ.ศ. 2564.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาสมบัติเชิงกล, การย่อยสลายในธรรมชาติ, สัณฐานวิทยา และความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปคอมโพสิตที่ย่อยสลายได้จากพอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) และวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรได้แก่แกลบ (RH), เปลือกทุเรียน (DB) และใบสับปะรด (PL) เป็นบรรจุภัณฑ์กระถางต้นไม้ ด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป คอมโพสิตที่ย่อยสลายได้ถูกเตรียมขึ้นด้วยเครื่องหลอมอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ โดยมีปริมาณวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรทั้ง 3 ชนิดในอัตราส่วนตั้งแต่ 10–30% wt. ปรับปรุงการผสมให้ดีขึ้นด้วยสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) เมื่อทำการผสมวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรทั้ง 3 ชนิดลงไปใน PLA พบว่าความแข็งแรงต่อแรงดึง, ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด, ความแข็งแรงต่อแรงกระแทก และอุณหภูมิหลอมลดลง การเพิ่ม PBS ที่อัตราส่วน PLA/PBS ที่ 60/40 ช่วยเพิ่มค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด และความแข็งแรงต่อแรงกระแทกให้สูงขึ้น อุณหภูมิที่ใช้สำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูป PLA ลดลงจาก 220-230 °C เป็น 170-180 °C เมื่อเติมแกลบในปริมาณ 30% wt. การย่อยสลายทางชีวภาพของคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และจุลินทรีย์ในดิน โดยพบว่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของคอมโพสิตลดลง และเกิดการกัดกร่อนเป็นรูพรุนจำนวนมากที่พื้นผิวของคอมโพสิตที่ย่อยสลายได้ ในกระบวนการทดสอบแม่พิมพ์พบว่าสามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานกระถางได้เหมือนพลาสติกชีวภาพทั่วไป นอกจากนี้การนำเอาวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรมาผสมกับพลาสติกชีวภาพสามารถลดต้นทุนในกระบวนการผลิตให้ลดลงได้เมื่อผสมตั้งแต่ 20% wt. ขึ้นไป แกลบ, เปลือกทุเรียน และใบสับปะรดจัดเป็นสารเติมแต่งที่มีประสิทธิภาพในการลดต้นทุน และปรับปรุงสมบัติการย่อยสลายในธรรมชาติด้วยวิธีการฝังกลบให้ดีขึ้น สามารถขึ้นรูป และมีสมบัติทางกลเทียบเคียงได้กับ PLA บริสุทธิ์

61910066: MAJOR: POLYMER SCIENCE; M.Sc. (POLYMER SCIENCE)

KEYWORDS: green composite, rice husk, durian bark, pineapple leaf, plastic injection

ANAN SIRICHALARMKUL : BIODEGRADABLE COMPOSITES FROM POLY(LACTIC ACID) AND AGRICULTURAL WASTE : RICE HUSK, DURIAN BARK AND PINEAPPLE LEAVES. ADVISORY COMMITTEE: SUPRANEE KAEWPIROM, 2021.

This research focuses on the mechanical properties, biodegradability, morphology and possibility to process PLA/PBS/agricultural waste green composites into plant-pots using an injection molding. Green composites based on poly(lactic acid) (PLA), poly(butylene succinate) (PBS), and agricultural waste: rice husk (RH), durian bark (DB) and pineapple leaf (PL) with various agricultural waste contents (10–30% wt.) were produced using a twin-screw extruder. The compatibility of agricultural waste and the polymer matrix was improved by chemical surface modifications using maleic anhydride coupling agent. With filled agricultural waste into PLA matrix, mechanical properties and melt temperature decreased. The addition of PBS with the PLA/PBS ratio of 60/40 improved the elongation at break and impact strength of the green composite. The suitable processing temperatures for PLA decreased from 220–230 °C to 170–180 °C when 30% wt. of agricultural waste was filled. After biodegradation via either enzymatic degradation or hydrolysis in soil, surface erosion with many voids, mass loss and the decrease in tensile strength of all the composites were observed. Like bioplastics, green composites showed their capability to be molded into plant-pots using conventional injection molding machine in mold trial process. In addition, 20% wt. of the agricultural waste materials mixed with bioplastics could significantly reduce the cost of the production process. RH, DB and PL were analyzed as an effective fillers for PLA to develop green composites with low cost, high biodegradability, improved processability, and comparable mechanical properties as neat PLA.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้คงไม่อาจสำเร็จสมบูรณ์ได้หากปราศจาก รองศาสตราจารย์ ดร.สุปราณี แก้วภิรมย์ ที่กรุณารับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้า ซึ่งท่านอาจารย์ได้สละเวลาอันมีค่าตรวจสอบ แก้ไข และปรับปรุงข้อบกพร่องให้งานวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอบพระคุณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ได้มอบทุนสนับสนุนค่าธรรมเนียมการศึกษาสำหรับนิสิตระดับปริญญาโท หลักสูตรเหมาจ่าย แบบเต็มเวลาให้แก่ข้าพเจ้า รวมถึงอุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิสถาบันไทย-เยอรมัน ที่ให้การสนับสนุนในการศึกษาต่อในระดับปริญญาโท

ขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประยูร สุรินทร์ รักษาการอธิการบดีสถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน และนายบุญสิน นาดอนดู่ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือสำหรับการทดสอบในงานวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงบริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน), บริษัท ภูมิใจ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด, บริษัท มัลติแบกซ์ จำกัด (มหาชน) และบริษัท อินเน็กซ์ เคมีคอล จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์วัสดุและอุปกรณ์จนงานวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

อนันต์ สิริเฉลิมกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญรูปภาพ ..... ฐ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย 3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) 4
2.1.1 ความหมายของพลาสติกชีวภาพ 4
2.1.2 ประเภทของพลาสติกชีวภาพ 4
2.2 เซลลูโลส 6
2.3 คอมโพสิต 7
2.4 สารเติมแต่ง 7
2.5 กระบวนการผสมด้วยเครื่องหลอมอัดรีด 8
2.6 กระบวนการฉีดพลาสติก 12
2.7 การทดสอบ และการวิเคาะห์ 15

2.7.1 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties) 15

2.7.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) 18

2.7.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิคอินฟาเรดสเปกโทรสโคปี (FTIR) 19

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 20

2.9 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 22

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 24

3.1 สารเคมี และวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย 24

3.1.1 สารเคมี 24

3.1.2 อุปกรณ์ 25

3.1.3 เครื่องมือ 25

3.2 การเตรียมไบโอคอมโพสิต 25

3.2.1 การเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ 25

3.2.2 การเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียน 26

3.2.3 การเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับใบสับปะรด 27

3.2.4 การเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง 28

3.2.5 การเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทก 28

3.3 การศึกษาสมบัติของไบโอคอมโพสิต 28

3.3.1 สมบัติเชิงกล 28

3.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา 29

3.3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี 29

3.3.4 การศึกษากระบวนการย่อยสลายโดยการฝังดิน 29

3.3.5 กระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุไบโอคอมโพสิต 30

3.3.6 การวิเคราะห์ราคาของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างจากวัสดุไบโอคอมโพสิต 30

บทที่ 4 ผลการวิจัย.....31
4.1 ผลการเตรียมไบโอคอมโพสิต.....31
4.1.1 การเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ.....31
4.1.2 การเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียน.....32
4.1.3 การเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับใบสับปะรด.....34
4.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของไบโอคอมโพสิต.....36
*4.2.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ*36
4.2.2 ผลการทดสอบผลสมบัติเชิงกลของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียน.....40
4.2.3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับใบสับปะรด.....44
4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของไบโอคอมโพสิต.....50
4.3.1 สมบัติทางความร้อนของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ.....50
4.3.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียน.....51
4.3.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับใบสับปะรด.....51
4.4 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา.....53
4.4.1 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....53
4.4.2 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับวัสดุชีวมวล.....56
4.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี.....67
4.5.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ.....67

4.5.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียน 70

4.5.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับใบสับปะรด 72

4.6 การศึกษากระบวนการย่อยสลายโดยการฝังดิน 75

4.6.1 สมบัติเชิงกลของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ 75

4.6.2 การลดลงของน้ำหนักของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ 78

4.6.3 ลักษณะพื้นผิวของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบศึกษาด้วยภาพถ่ายดิจิตอล และภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง 81

4.6.4 การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างทางเคมีของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบด้วยเทคนิค FTIR 83

4.7 การทดลองขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ไบโอคอมโพสิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก 84

4.7.1 การออกแบบผลิตภัณฑ์ด้วยโปรแกรมจำลองการไหลของพลาสติก 84

4.7.2 ผลการจำลองการไหลของวัสดุของผลิตภัณฑ์กระถางรูปทรงหกเหลี่ยม 87

4.7.3 การทดลองฉีดขึ้นรูปไบโอคอมโพสิตโดยอ้างอิงจากผลจำลองการไหล 88

4.7.4 การลดต้นทุนพลาสติกชีวภาพด้วยวัสดุชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการเกษตร 89

บทที่ 5 อภิปรายและสรุปผลการวิจัย 91

5.1 อภิปรายผลการวิจัย 91

5.1.1 สมบัติเชิงกลของไบโอคอมโพสิต 91

5.1.2 สมบัติทางความร้อนของไบโอคอมโพสิต 92

5.1.3 สัณฐานวิทยาของไบโอคอมโพสิต 92

5.1.4 โครงสร้างทางเคมีของไบโอคอมโพสิต 93

5.1.5 กระบวนการย่อยสลายโดยการฝังดิน 95

5.1.6 การทดลองขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กระถาง 97

5.2 สรุปผลการวิจัย 97

5.3 ข้อเสนอแนะ.....98
5.3.1 ข้อแนะนำการขึ้นรูปวัสดุไบโอคอมโพสิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก.....98
5.3.2 การศึกษาต่อไป.....98
5.3.3 การใช้ประโยชน์จากไบโอคอมโพสิต.....99
บรรณานุกรม.....100
ภาคผนวก.....106
ภาคผนวก ก.....107
ภาคผนวก ข.....116
ภาคผนวก ค.....138
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....145

BURAPHA UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 อัตราส่วนการผสมระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ 26
ตารางที่ 2 อัตราส่วนการผสมระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียน 27
ตารางที่ 3 อัตราส่วนการผสมระหว่างพลาสติกชีวภาพกับใบสับปะรด 28
ตารางที่ 4 ผลการเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ 31
ตารางที่ 5 ผลการเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียน 33
ตารางที่ 6 ผลการเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับใบสับปะรด 35
ตารางที่ 7 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิตจากพอลิแลคติกแอซิดกับแกลบ 68
ตารางที่ 8 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิตจากพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับแกลบ 69
ตารางที่ 9 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิตจากพอลิแลคติกแอซิด กับเปลือกทุเรียน 71
ตารางที่ 10 อินฟาเรดสเปกตรัมของไบโอคอมโพสิตจากพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับเปลือกทุเรียน 72
ตารางที่ 11 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิตจากพอลิแลคติกแอซิดกับใบสับปะรด 74
ตารางที่ 12 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิตจากพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับใบสับปะรด 74
ตารางที่ 13 การลดลงของความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน 77
ตารางที่ 14 การลดลงของค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดหลังทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน 78
ตารางที่ 15 น้ำหนักชิ้นงานทดสอบหลังผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยการฝังดิน 79
ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองการไหลของรูปทรงของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 แบบ 85
ตารางที่ 17 เงื่อนไขการฉีดขึ้นรูปจากผลวิเคราะห์การจำลองการไหลของพอลิแลคติกแอซิด 88
ตารางที่ 18 เงื่อนไขการทดลองฉีดขึ้นรูปไบโอคอมโพสิต 89
ตารางที่ 19 วิเคราะห์ราคาต้นทุนของไบโอคอมโพสิต 90

มหาวิทยาลัยบูรพา
BURAPHA UNIVERSITY

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ประเภทของพลาสติกชีวภาพ (Kirwan, 2011).....4

ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิแลคติกแอซิด (ซ้าย) และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต (ขวา) (Mark, 1999).....5

ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส (Anil Kumar & Gupta, 2018).....7

ภาพที่ 4 เครื่องหลอมอัดรีด และส่วนประกอบที่สำคัญ (Osswald & Menges, 2012).....8

ภาพที่ 5 การบีบอัดพลาสติกให้แบนเรียบภายในกระบอก (Osswald & Menges, 2012).....9

ภาพที่ 6 การหลอมพลาสติกในช่วงการเปลี่ยนสถานะ (Osswald & Menges, 2012).....10

ภาพที่ 7 เครื่องหลอมอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดียว (Osswald & Menges, 2012).....11

ภาพที่ 8 เกลียวหนอนชนิด Cavity transfer mixing section (Osswald & Menges, 2012).....11

ภาพที่ 9 ประเภทการทำงานของเกลียวหนอนคู่ (Osswald & Menges, 2012).....12

ภาพที่ 10 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องฉีด (Osswald & Menges, 2012).....13

ภาพที่ 11 กระบวนการฉีดพลาสติกในหนึ่งรอบการผลิต (Osswald & Menges, 2012).....13

ภาพที่ 12 รูปร่าง และขนาดของชิ้นงานทดสอบ ASTM D 638 (Osswald & Menges, 2012).....16

ภาพที่ 13 กราฟความเค้น และความเครียดของวัสดุที่มีความเปราะ (Osswald & Menges, 2012)...17

ภาพที่ 14 กราฟความเค้น-ความเครียดของวัสดุที่มีความเหนียว (สุจัยพรรณ เข็มแก้ว, 2559).....17

ภาพที่ 15 ชิ้นงานทดสอบแข็งแรงต่อแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256 – 10 (Sanjay, Arpitha, Laxmana Naik, Gopalakrishna, & Yogesh, 2016).....18

ภาพที่ 16 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Goodhew & Humphreys, 2000).....19

ภาพที่ 17 ลักษณะการทำงานของเครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิคอินฟเรดสเปกโทรสโคปี (FTIR) (Vivaldo-Lima & Saldívar-Guerra, 2013).....20

ภาพที่ 18 ลักษณะการอุดตันในเครื่องหลอมอัดรีดของคอมโพสิต PLADB30 และ PLAPL30.....36

ภาพที่ 19 ลักษณะการไหม้ในเครื่องหลอมอัดรีดของไบโอคอมโพสิต PLADB30 และ PLAPL3036
ภาพที่ 20 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากแกลบ 37
ภาพที่ 21 ผลการทดสอบค่ามอดูลัสของแรงดึงของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากแกลบ.....38
ภาพที่ 22 ผลการทดสอบค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากแกลบ.....39
ภาพที่ 23 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากแกลบ.....40
ภาพที่ 24 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากเปลือกทุเรียน ...41
ภาพที่ 25 ผลการทดสอบค่ามอดูลัสของแรงดึงของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากเปลือกทุเรียน.....42
ภาพที่ 26 ผลการทดสอบค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากเปลือกทุเรียน 43
ภาพที่ 27 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากเปลือกทุเรียน.....44
ภาพที่ 28 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากใบสับปะรด.....45
ภาพที่ 29 ผลการทดสอบค่ามอดูลัสของแรงดึงของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากใบสับปะรด.....46
ภาพที่ 30 ผลการทดสอบค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากใบสับปะรด47
ภาพที่ 31 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากใบสับปะรด 48
ภาพที่ 32 ผล DSC ของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ 50
ภาพที่ 33 ผล DSC ของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียน 51
ภาพที่ 34 ผล DSC ของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับใบสับปะรด.....52
ภาพที่ 35 ลักษณะผิวรอยแตกจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์.....54
ภาพที่ 36 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์.....55
ภาพที่ 37 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLARH10.....57

ภาพที่ 38 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLARH20.....58
ภาพที่ 39 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLARH30.....59
ภาพที่ 40 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLAPBSRH30.....60
ภาพที่ 41 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLADB10.....61
ภาพที่ 42 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLADB20.....62
ภาพที่ 43 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLAPBSDB30.....63
ภาพที่ 44 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLAPL10.....64
ภาพที่ 45 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLAPL20.....65
ภาพที่ 46 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLAPBSPL30.....66
ภาพที่ 47 อินฟาเรดสเปกตรัมของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ 68
ภาพที่ 48 อินฟาเรดสเปกตรัมของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียน 71
ภาพที่ 49 อินฟาเรดสเปกตรัมของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพ PLA กับใบสับปะรด73
ภาพที่ 50 ความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 30, 60, 120 และ 180 วัน.....76
ภาพที่ 51 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 30, 60, 120 และ 180 วัน 77
ภาพที่ 52 น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบหลังการฝังดินที่ระยะเวลา 180 วัน 80
ภาพที่ 53 ร้อยละของน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบหลังการฝังดินที่ระยะเวลา 180 วัน.....80

ภาพที่ 54 การย่อยสลายโดยการฝังดินด้วยภาพถ่ายดิจิตอล (a – j) และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (k – t).....82

ภาพที่ 55 อินฟราเรดสเปกโตรของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพ PLA กับแกลบ หลังทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นเวลา 180 วัน.....83

ภาพที่ 56 รูปทรงของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 แบบ คือ แบบวงกลม, แบบสี่เหลี่ยม และ แบบหกเหลี่ยม 84

ภาพที่ 57 ผลการวิเคราะห์ Filling time (s).....85

ภาพที่ 58 ผลการวิเคราะห์ Filling pressure (MPa).....85

ภาพที่ 59 ผลการวิเคราะห์ Filling stress (MPa).....86

ภาพที่ 60 ผลการวิเคราะห์ Sink mark displacement (mm).....86

ภาพที่ 61 ผลการวิเคราะห์ Warpage displacement (mm).....86

ภาพที่ 62 รูปแบบการไหลเติมเต็มของพอลิแลคติกแอซิดในแม่พิมพ์.....87

ภาพที่ 63 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กระถางที่สามารถขึ้นรูปได้จากไบโอคอมโพสิต.....89

ภาพที่ 64 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการระหว่างการผสมพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และเซลลูโลส (Kaewpirom & Worrarat, 2014).....94

ภาพที่ 65 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการระหว่างการผสมพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และเซลลูโลส (Liminana et al., 2018).....95

ภาพที่ 66 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด.....108

ภาพที่ 67 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 108

ภาพที่ 68 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของแกลบ.....109

ภาพที่ 69 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของเปลือกทุเรียน.....109

ภาพที่ 70 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของใบสับปะรด.....110

ภาพที่ 71 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLARH10.....110

ภาพที่ 72 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLARH20.....111

ภาพที่ 73 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLARH30.....111

ภาพที่ 74 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLAPBSRH30.....112

ภาพที่ 75 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLADB10.....112
ภาพที่ 76 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLADB20.....113
ภาพที่ 77 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLAPBSDB30.....113
ภาพที่ 78 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLAPL10.....114
ภาพที่ 79 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLAPL20.....114
ภาพที่ 80 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLAPBSPL30.....115

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันในสังคมมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วทั้งขนาดชุมชน และจำนวนประชากรที่เพิ่มสูงขึ้น เป็นเหตุให้เกิดการบริโภคสินค้า และบริการที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการแข่งขันทางการตลาดที่สูงขึ้นตามไปด้วย สินค้าอุปโภค และบริโภคต่าง ๆ ที่ออกจำหน่ายจึงต้องมีราคาถูก น้ำหนักเบา แข็งแรงทนทาน พลาสติกจึงเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่สำคัญถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในการผลิตสินค้า และบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ พลาสติกจึงกลายเป็นวัสดุที่เข้ามามีบทบาทในการดำเนินชีวิตอย่างมากสำหรับมนุษย์

พลาสติกเป็นสารสังเคราะห์อินทรีย์ที่มีความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการทางความร้อน เช่น กระบวนการฉีดพลาสติก กระบวนการอัดขึ้นรูป กระบวนการเป่าขึ้นรูป และกระบวนการหลอมอัดรีดขึ้นรูป เป็นต้น พลาสติกที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายเป็นเหตุให้ปริมาณขยะพลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในแต่ละปี โดยทั่วไปพลาสติกเกิดจากผลพลอยได้ของกระบวนการการผลิตน้ำมัน และก๊าซธรรมชาติกว่า 80% ของสารเคมีที่ไม่ใช่น้ำมันเชื้อเพลิงถูกนำไปผลิตเป็นพอลิเมอร์ จากปีคริสต์ศักราช 2018 มีการใช้พลาสติกจากทั่วโลกในปริมาณที่มากกว่า 8.3 ล้าน ๆ ตัน ส่งผลให้เกิดขยะพลาสติกประมาณ 6.3 ล้าน ๆ ตัน ขยะเหล่านี้ถูกนำไปรีไซเคิล หรือ กำจัดโดยวิธีการเผาเพียง 21% ที่เหลืออีก 79% นั้นถูกกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ หรือ ถูกทิ้งลงสิ่งแวดล้อม โดยมีรายงานว่าในมหาสมุทรทั่วโลกได้มีขยะพลาสติกมากกว่า 5.25 ล้านชิ้นถูกทิ้งอยู่จึงมีความเป็นไปได้อย่างยิ่งว่าการที่ขยะเหล่านี้ถูกปล่อยทิ้งลงสู่สภาพแวดล้อมทางธรรมชาตินั้นจะส่งผลต่อปัญหาสุขภาพของมนุษย์เนื่องจากการปนเปื้อนในน้ำ อาหาร และอากาศ พลาสติกชีวภาพจึงเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจมาก ในการนำมาใช้ทดแทนวัสดุพลาสติก (Karan, Funk, Grabert, Oey, & Hankamer, 2019)

พลาสติกชีวภาพ คือพลาสติกที่สามารถย่อยสลายเชิงชีวภาพได้เองในธรรมชาติ หรือ การใช้ผลิตผลจากการเกษตรเข้ามาผ่านกระบวนการสังเคราะห์แทนการใช้ปิโตรเลียม พลาสติกชีวภาพได้รับการพัฒนาขึ้นจากการตระหนักถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมากจากการใช้พลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ หรือ มลพิษที่เกิดจากการกำจัดขยะพลาสติก อย่างไรก็ตามราคาของ

พลาสติกชีวภาพนั้นถือว่าแพงกว่าราคาของพลาสติกทั่วไปทำให้ไม่สามารถนำผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติกชีวภาพเข้ามาแข่งขันทางการตลาดได้มากเท่าที่ควร โดยปกติแล้วในทางอุตสาหกรรมหากต้องการลดต้นทุน หรือ ปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ การนำเอาวัสดุอื่น ๆ ที่มีราคาถูกกว่ามาผสมก็เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยม เช่น การผสมแคลเซียมคาร์บอเนตในพลาสติกเพื่อลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น ดังนั้นการลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพลาสติกชีวภาพจะสามารถทำได้โดยการนำเอาวัสดุชีวมวลที่มีราคาถูกกว่ามาผสมกับพลาสติกชีวภาพที่มีราคาแพง (Qiang, Yu, & Gao, 2012)

แกลบ เปลือกทุเรียน ใบสับปะรด เป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีราคาถูก สามารถย่อยสลายได้เองในธรรมชาติที่เรียกได้ว่าเป็นวัสดุชีวมวล โดยวัสดุดังกล่าวนั้นสามารถพบได้เป็นจำนวณมากเนื่องจากเป็นสินค้าทางการเกษตรซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์ชีวภาพ

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการนำวัสดุ 3 ชนิดซึ่งเป็นวัสดุชีวมวลผสมเข้ากับพลาสติกชีวภาพ คือ แกลบ, เปลือกทุเรียน และใบสับปะรด โดยการบดละเอียดให้วัสดุชีวมวลมีลักษณะคล้ายผงแป้งก่อนจะนำไปผสมกับพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate, PBS) เพื่อทำการลดต้นทุนผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติกชีวภาพ และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรที่หาง่าย มีราคาถูก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตไบโอคอมโพสิตจากวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรกับพลาสติกที่ย่อยสลายได้ชนิดพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เพื่อสร้างไบโอคอมโพสิต
2. ศึกษาสมบัติของไบโอคอมโพสิต
3. ผลิตบรรจุภัณฑ์จากไบโอคอมโพสิต

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. เป็นแนวทางการใช้วัสดุชีวมวลเพื่อผลิตไบโอคอมโพสิตซึ่งเป็นสารประกอบของชีวมวลกับพลาสติกที่ย่อยสลายได้พอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต
2. สามารถลดต้นทุนผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติกที่ย่อยสลายได้ชนิดพอลิแลคติกแอซิดให้เกิดความสามารถในการแข่งขันทางการตลาด

3. สร้างมูลค่าให้กับวัสดุชีวมวลที่มีมูลค่าต่ำ หรือ วัสดุชีวมวลที่เป็นขยะเหลือทิ้งจากภาคการเกษตร

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. บดละเอียดสารชีวมวลได้แก่ แกลบ, เปลือกทุเรียน และใบสับปะรดให้มีลักษณะคล้ายผงแป้ง

2. เตรียมไบโอคอมโพสิต โดยการผสมพลาสติกที่ย่อยสลายได้ชนิดพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต กับสารชีวมวลทั้ง 3 ชนิด ด้วยกระบวนการหลอมอัดรีด (Extrusion process)

3. ศึกษาสมบัติเชิงกลของไบโอคอมโพสิตทั้ง 3 ชนิด ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยเริ่มจากการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึง (Dumbbell) ขนาดตามมาตรฐาน ASTM D638 – 02a จากกระบวนการฉีดพลาสติก (Injection process) จากนั้นทำการทดสอบแรงดึงด้วยอัตราเร็วในการดึงที่ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที ส่วนวัดแรง (Load cell) 100 กิโลนิวตัน ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D638 – 02a

4. ศึกษาสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ที่มาจากพลาสติกที่ย่อยสลายได้ชนิดพอลิแลคติกแอซิด พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และไบโอคอมโพสิตที่ผสมด้วยสารชีวมวลทั้ง 3 ชนิด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยการถ่ายภาพที่พื้นผิวรอยแตกจากการทดสอบแรงดึงของผลิตภัณฑ์

5. ศึกษากระบวนการขึ้นรูปไบโอคอมโพสิตด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก

6. ศึกษากระบวนการย่อยสลายโดยการฝังดิน

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

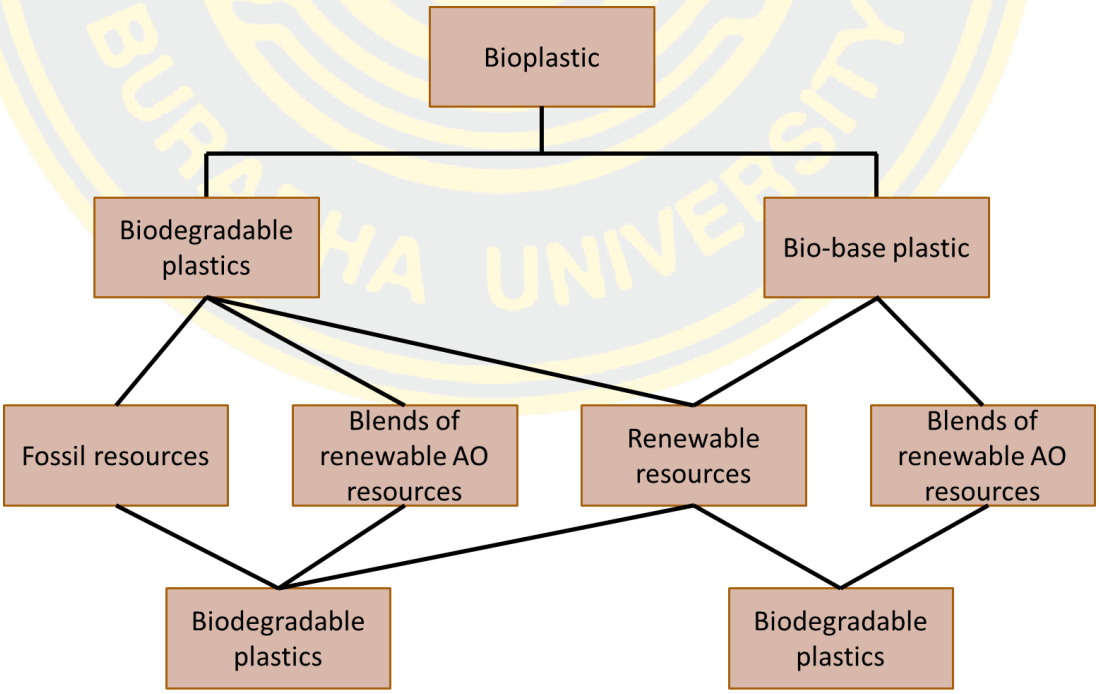
2.1 พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic)

2.1.1 ความหมายของพลาสติกชีวภาพ

พลาสติกชีวภาพ คือ พลาสติกที่ผลิตจากวัสดุทางธรรมชาติ ส่วนมากมักมาจากพืชผลทางการเกษตร หรือ พลาสติกที่ถูกสังเคราะห์ให้สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพภายใต้สภาวะความชื้น อุณหภูมิ และออกซิเจน โดยอาศัยเอนไซม์จากจุลินทรีย์แบคทีเรีย รา และยีสต์

2.1.2 ประเภทของพลาสติกชีวภาพ

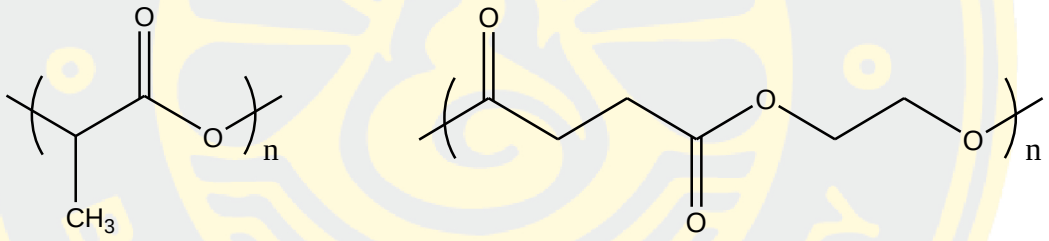
โดยพลาสติกชีวภาพจัดได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ คือ พลาสติกชีวภาพที่ไม่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Non-biodegradable plastic) และพลาสติกชีวภาพที่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Compostable plastic)



ภาพที่ 1 ประเภทของพลาสติกชีวภาพ (Kirwan, 2011)

พลาสติกชีวภาพที่ไม่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพถูกแบ่งออกเป็น 2 จำพวก โดยจำพวกแรกเป็นพลาสติกทั่วไปที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากปิโตรเลียมและผสมสารเติมแต่งเพื่อให้เกิดการแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ซึ่งมากพอที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้แต่การสลายตัวทางชีวภาพจะไม่สมบูรณ์ ส่วนอีกจำพวกหนึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพที่ได้มาจากพืชผลทางการเกษตร หรือ วัสดุตามธรรมชาติเช่น ไบโอพอลิเอททีลีน (Bio-PE), ไบโอพอลิโพรพิลีน (Bio-PP) และไบโอพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Bio-PET) เป็นต้น

พลาสติกชีวภาพที่สามาถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จะเป็นผลผลิตที่ได้จากวัสดุตามธรรมชาติ หรือ ปิโตรเลียมก็ได้ โดยเมื่อนำไปผ่านกระบวนการฝังกลบให้ย่อยสลายทางชีวภาพจะย่อยสลายจนไม่หลงเหลือสารพิษตกค้าง หรือ สิ่งแปลกปลอมใด ๆ ไว้ในสภาพแวดล้อม เช่น พอลิแลคติกแอซิด, พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต (PBS) เป็นต้น (Kirwan, 2011)



PLA **PBS**

ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิแลคติกแอซิด (ซ้าย) และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต (ขวา) (Mark, 1999)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้พลาสติกชีวภาพ 2 ชนิด คือ พอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ดังภาพที่ 2 ซึ่งแสดงโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกชีวภาพทั้ง 2 ชนิด พลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิดเป็นพอลิเอสเทอร์อะลิฟาติกส่วนมากผลิตจากพืชที่อุดมไปด้วยแป้ง และน้ำตาล แต่สามารถผลิตจากปิโตรเลียมได้ด้วยเช่นกัน พอลิแลคติกแอซิดทนต่อไขมัน และน้ำมัน มีลักษณะโปร่งใสผิวมันวาว ส่วนพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิบิวทิลีนซักซิเนต เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปิโตรเคมีลักษณะสีขาวขุ่นทึบแสง มีความยืดหยุ่น ทนต่อความร้อน และย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีเมื่อเทียบกับพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิด นอกจากนี้พลาสติกชีวภาพ 2 ชนิด สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนด้วยกระบวนการทางความร้อนได้ เช่น การอัดขึ้นรูป

การเป่าขึ้นรูป และการฉีดขึ้นรูป โดยมักถูกผสมด้วยวัสดุอื่น ๆ เพื่อลดต้นทุนในกระบวนการผลิต เช่น นาโนเคลย์ เซลลูโลส หรือ วัสดุชีวมวลอื่น ๆ เป็นต้น (Mark, 1999)

การย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกชีวภาพ (Alshehrei, 2017) การเสื่อมสภาพของพลาสติกเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือ ทางเคมีของพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจากปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมเช่น แสง ความร้อน และความชื้น ซึ่งการย่อยสลายทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่หมายถึงการย่อยสลายและการดูดซึมของพอลิเมอร์โดยจุลินทรีย์ที่มีชีวิตเช่น แบคทีเรีย และเชื้อรา โดยพลาสติกส่วนมากมักเกิดการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic biodegradation) และแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic biodegradation)

การย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน ออกซิเจนเป็นส่วนสำคัญในการช่วยให้จุลินทรีย์ทำลายสารอินทรีย์ให้แตกออกเป็นสารประกอบอินทรีย์ขนาดเล็ก และจะเกิดปฏิกริยาข้างเคียง ได้น้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ 2.1

$$\text{C plastic} + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O + \text{C residual} + \text{Biomass} \qquad 2.1$$

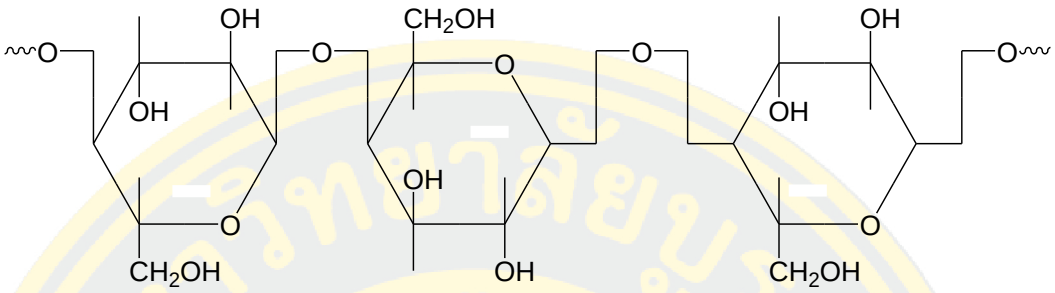
การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะมีแบคทีเรียบางชนิดที่ใช้ไนเตรตซัลเฟต เหล็กแมงกานีส และคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อแยกสารอินทรีย์ออกเป็นสารประกอบให้มีขนาดเล็กลง โดยในระหว่างการย่อยสลายแบททีเรียจะทำลายสายโซ่พอลิเมอร์ให้มีขนาดเล็กลง ให้กลายเป็นโอลิโกเมอร์ ไดเมอร์ และมอนอเมอร์ โดยโมเลกุลเหล่านี้จะมีขนาดเล็กพอที่จะละลายน้ำ และถูกดูดซึมโดยแบคทีเรีย ซึ่งจะเกิดปฏิกริยาข้างเคียงได้น้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซมีเทน ดังสมการ 2.2

$$\text{C plastic} \longrightarrow CH_4 + CO_2 + H_2O + \text{C residual} + \text{Biomass} \qquad 2.2$$

2.2 เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีอยู่มากที่สุดสามารถพบได้ตามผนังเนื้อเยื่อของพืช เกิดจากหน่วยซ้ำ ๆ กันของโมเลกุลกลูโคสจึงมีความเป็นพอลิเมอร์คาร์โบไฮเดรตสูง และมีเส้นใยประมาณ 50% มีสูตรโมเลกุลทั่วไป คือ $(C_6H_{12}O_6)_n$ โครงสร้างของเซลลูโลสมีลักษณะเป็นแบบเส้นตรง การจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบ และมีความเป็นผลึกสูง จึงทำให้เซลลูโลสมีอุณหภูมิหลอมที่สูงอย่างมากเป็นเหตุให้เซลลูโลสไม่สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมที่รุนแรงได้เช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติกอื่น ๆ ซึ่งโดยปกติแล้วเซลลูโลสมักเกิดการสลายตัวก่อนการหลอม ทำให้บ่อยครั้งถูกใช้

เป็นสารเติมผสมในพลาสติกชนิดอื่น ๆ (Harper & Petrie, 2003) โดยภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส



ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส (Anil Kumar & Gupta, 2018)

2.3 คอมโพสิต

คอมโพสิตเกิดจากการการนำเอาวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมกันแต่ไม่เกิดการหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันจะมีสารตัวหนึ่งเป็นส่วนประกอบหลัก และมีสารตัวอื่น ๆ ที่เติมเข้ามาผสมกระจายตัวอยู่ในสารที่เป็นส่วนประกอบหลัก หลังจากวัสดุต่าง ๆ ผสมรวมกันเป็นคอมโพสิตแล้วเอกลักษณ์ของสารทั้งหมดจะมีอิทธิพลโดยตรงต่อสมบัติสุดท้ายของคอมโพสิต โดยทั่วไปสารที่ถูกเติมเข้ามาผสมนั้นจะทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง เช่น การผสมใยแก้ว และใยคาร์บอนเพื่อการเสริมแรงให้กับวัสดุ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ทดแทนสารที่เป็นส่วนประกอบหลักบางส่วนเพื่อเป็นการลดต้นทุนในกระบวนการผลิต

ไบโอคอมโพสิต คือคอมโพสิตที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ และเกิดจากการผสมระหว่างพลาสติกชีวภาพกับวัสดุชีวมวลที่มาจากธรรมชาติ อาจเป็นเส้นใยธรรมชาติ หรือวัสดุชีวมวล ซึ่งส่วนมากของวัสดุชีวมวลที่มาจากธรรมชาตินั้นมาจากพืช โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้แกลบเปลือกทุเรียน และใบสับปะรด เพื่อเป็นวัสดุชีวมวลในการลดต้นทุนของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด (Obasi, Igwe, & Madufor, 2013; Qasim, 2019)

2.4 สารเติมแต่ง

โดยปกติแล้วสารเติมแต่งเป็นสารที่ถูกเติมเข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่าง ๆ ของวัสดุช่วยให้สามารถขึ้นรูปได้ดีขึ้น หรือ ลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์ สารเติมแต่งบางชนิดสามารถใช้กับวัสดุได้หลายชนิด แต่บางชนิดอาจถูกสังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้กับวัสดุเพียงชนิดเดียว แต่เดิมนั้นสารเติมแต่งถูกนำมาใช้เพิ่มการปรับปรุงข้อจำกัดของวัสดุ เช่น สารต้านทานการเกิดเปลวไฟ,

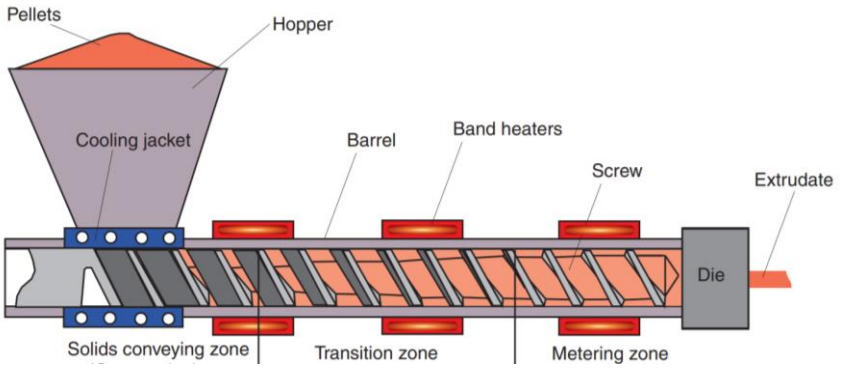
สารต้านทานการเสื่อมสภาพจากแสงยูวี, สารหล่อลื่นที่ช่วยในการลดความหนืดของวัสดุในขณะขึ้นรูป หรือ สารคู่ควบ เป็นต้น (Harper & Petrie, 2003)

สารคู่ควบถูกจัดให้เป็นสารเติมแต่งชนิดหนึ่งที่ใช้สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของสารเติม หรือ เส้นใยต่าง ๆ ที่ถูกผสมเข้าไปในวัสดุหลัก สารคู่ควบนั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวประสานระหว่างส่วนที่ไม่เข้ากัน โดยเพิ่มการเชื่อมโยง เกี่ยวพัน หรือ เกิดพันธะทางเคมีในคอมโพสิต ส่งผลให้คอมโพสิตมีความเข้ากันได้มากขึ้นสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้เพิ่มสูงขึ้นได้ ในงานวิจัยนี้ใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เพื่อเป็นสารคู่ควบระหว่างพลาสติกชีวภาพและสารชีวมวล

สารหล่อลื่น (Murphy, 2001) ทำหน้าที่ลดความหนืดของวัสดุขณะหลอมทำให้วัสดุมีความสามารถในการไหลของวัสดุในขณะหลอมเพิ่มสูงขึ้น และลดการเสียดสีที่เกลียวหนอน (Screw) และกระบอกหลอมอัดรัด (Barrel) ของเครื่องหลอมอัดรีด ทำให้สามารถผสมวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในงานวิจัยนี้ใช้กลีเซอรอล, แว๊กซ์อี และแคลเซียมสเตียเรท เป็นสารหล่อลื่น

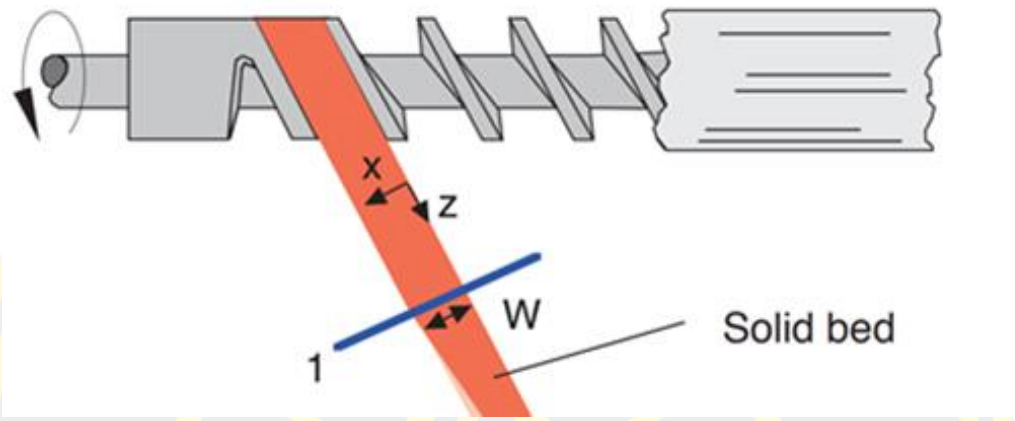
2.5 กระบวนการผสมด้วยเครื่องหลอมอัดรีด

(Osswald & Menges, 2012) คุณภาพการผสมของวัสดุมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติ และความสามารถในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ของคอมโพสิต กระบวนการผสมทำได้โดยการกระจายส่วนประกอบย่อยภายในส่วนประกอบหลักที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ ส่วนประกอบหลักสามารถพิจารณาได้ว่าเป็นเฟสต่อเนื่อง และส่วนประกอบย่อยเป็นเฟสแบบกระจาย เมื่อทำการผสมพอลิเมอร์ต้องคำนึงถึงเสมอว่าคอมโพสิตนั้นอาจถูกหลอมอีกครั้งจากกระบวนการขึ้นรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการถัดไป ในปัจจุบันการผสมแบบต่อเนื่องจะใช้เครื่องหลอมอัดรีดเป็นเครื่องจักรในการผสม โดยเครื่องหลอมอัดรีดมีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 เครื่องหลอมอัดรีด และส่วนประกอบที่สำคัญ (Osswald & Menges, 2012)

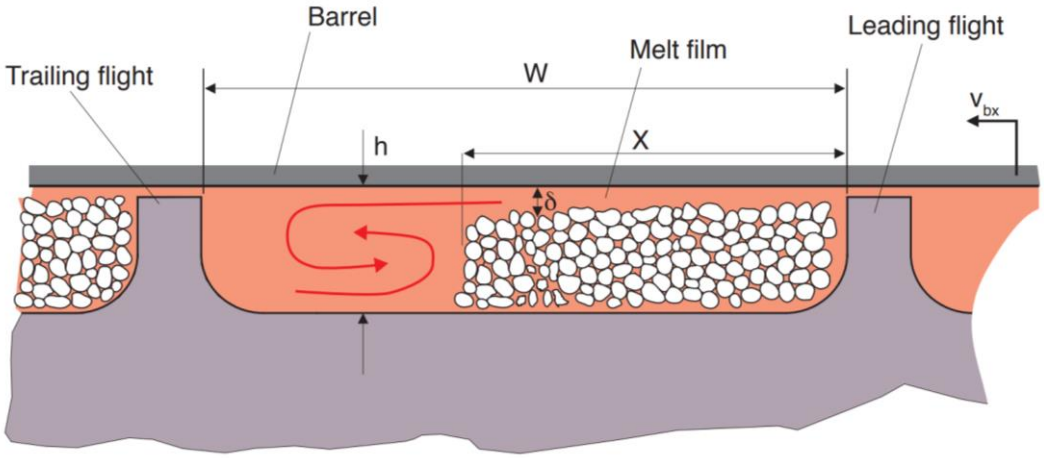
จากภาพที่ 4 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องหลอมอัดรีด และแสดงช่วงทั้ง 3 ช่วง ของเกลียวหนอน คือ ช่วงลำเลียงพลาสติก (Solids conveying zone), ช่วงการเปลี่ยนสถานะ (Transition zone) และ ช่วงการหลอมอัดรีด (Metering zone) ตามลำดับ



ภาพที่ 5 การบีบอัดพลาสติกให้แบนเรียบภายในกระบอก (Osswald & Menges, 2012)

ช่วงลำเลียงเม็ดพลาสติกในเกลียวหนอน (Solids conveying zone) ช่วงลำเลียงเม็ดพลาสติกเป็นช่วงการนำส่งเม็ด หรือ ผงพลาสติกจากกรวยเติมไปยังช่องเกลียวด้านในของเกลียวหนอน (Screw) การการลำเลียงพลาสติกเข้าสู่ด้านในของเกลียวหนอนเกิดจากความเร็วในการหมุนของเกลียวหนอนที่มากกว่าความเร็วในการหมุนของพลาสติก จากภาพที่ 5 ในการหมุนของเกลียวหนอนนี้จะสร้างแรงเสียดทานระหว่างพลาสติกกับกระบอกหลอมอัดรีด (Barrel) เกิดความดันบีบอัดเม็ดพลาสติกให้มีลักษณะเป็นแผ่นแบนเรียบ (Solid bed)

ช่วงการเปลี่ยนสถานะ (Transition zone) เป็นช่วงของสกรูที่ทำให้เกิดการหลอมของพลาสติกจากการเสียดสีแรงเสียดทานระหว่างพลาสติกกับกระบอกหลอมอัดรีด (Barrel) โดยขั้นแรกการหลอมจะเกิดเป็นชั้นของหลอมเหลวบาง ๆ (Melt film) ที่บริเวณผิวของกระบอกหลอมอัดรีดก่อนถูกดันให้ไหลเข้าด้านข้าง เกิดเป็นบ่อหลอม ดังภาพที่ 6

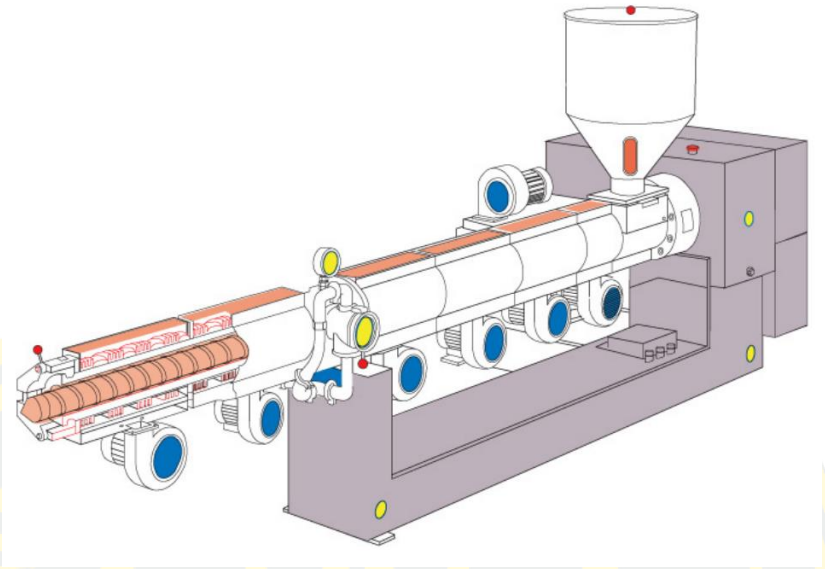


ภาพที่ 6 การหลอมพลาสติกในช่วงการเปลี่ยนสถานะ (Osswald & Menges, 2012)

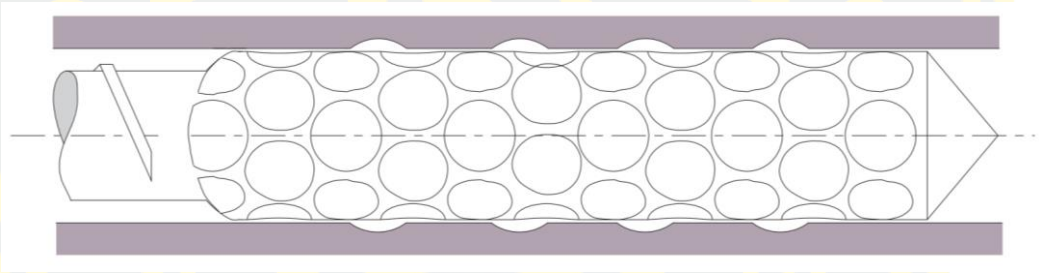
ช่วงการหลอมอัดรีด (Metering zone) เป็นช่วงที่สำคัญอย่างมาก เนื่องจากเป็นช่วงที่สร้างแรงดันให้เพียงพอต่อการดันพลาสติกออกจากกระบอกหลอมอัดรีดผ่านแม่พิมพ์ และสร้างรูปทรงให้กับชิ้นงานพลาสติก

การผสมด้วยเครื่องหลอมอัดรีดนั้นเป็นที่นิยมอย่างมากสำหรับการผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารเติมต่าง ๆ กระบวนการผสมเริ่มจากเม็ดพลาสติกเกิดการนิ่มตัวจากความร้อนของแผ่นให้ความร้อน (Band Heaters) และการปั่นเฉือนเม็ดพลาสติกของเกลียวหนอนทำให้รัศมีของเม็ดพลาสติกลดลง เม็ดพลาสติกจะถูกยืดออกจนกระทั่งเกิดแรงตึงผิวมากพอให้พลาสติกแตกตัว และหลอมไปผสมกับสารเติมที่เป็นส่วนประกอบย่อย

เครื่องหลอมอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดียว ดังภาพที่ 7 โดยทั่วใช้ในการขึ้นรูปพลาสติกชนิดต่าง ๆ ให้มีรูปร่าง และขนาดตามแบบของแม่พิมพ์หลอมอัดรีด แต่ไม่เป็นที่นิยมมากนักในการใช้ผสมวัสดุต่าง ๆ ให้เข้ากัน เนื่องจากแรงเฉือนของเครื่องหลอมอัดรีดแบบเกลียวหนอนดียวไม่เพียงพอให้เกิดการกระจายตัวที่ดี สำหรับการผสมวัสดุที่มีความหนืดค่อนข้างต่ำโดยเฉพาะกับวัสดุเทอร์โมพลาสติก จึงต้องใช้เกลียวหนอนชนิด cavity transfer mixing section ซึ่งเป็นอุปกรณ์พิเศษดังภาพที่ 8 ช่วยในการกระจายส่วนผสมต่าง ๆ ของคอมโพสิตจากการเฉือนที่เพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเกลียวหนอนชนิดพิเศษนั้นจะบังคับให้วัสดุไหลผ่านช่องแคบเล็ก ๆ ส่งผลให้เกิดความเค้นสูงในขณะหลอม

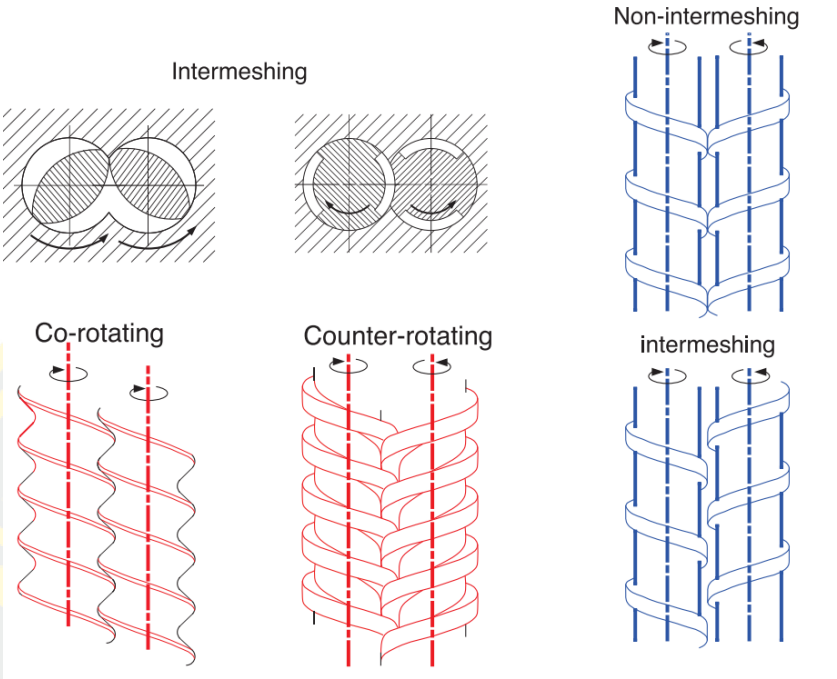


ภาพที่ 7 เครื่องหลอมอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดียว (Osswald & Menges, 2012)



ภาพที่ 8 เกลียวหนอนชนิด Cavity transfer mixing section (Osswald & Menges, 2012)

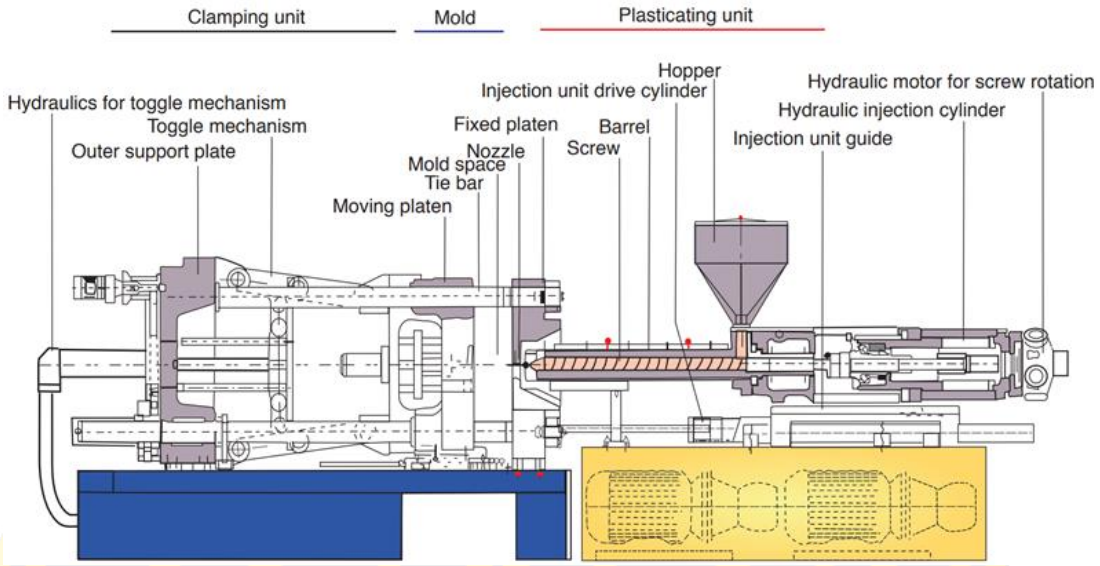
การผสมด้วยเครื่องหลอมอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่เป็นอุปกรณ์ในการผสมแบบต่อเนื่องที่ดีที่สุดในปัจจุบัน ซึ่งสามารถจำแนกประเภทการทำงานของเกลียวหนอนคู่ได้ ดังนี้ เกลียวหนอนหมุนแบบขบกัน (Intermeshing), เกลียวหนอนหมุนแบบไม่ขบกัน (Non-intermeshing), เกลียวหนอนหมุนทางเดียวกัน (Co-rotating), เกลียวหนอนหมุนสวนทางกัน (Counter-rotating) ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ประเภทการทำงานของเกลียวหนอนคู่ (Osswald & Menges, 2012)

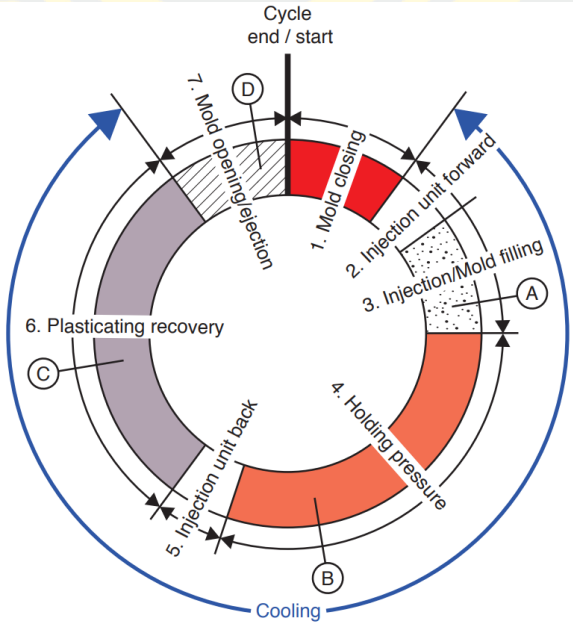
2.6 กระบวนการฉีดพลาสติก

(Osswald & Menges, 2012) กระบวนการฉีดพลาสติกมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการผลิต หรือ ขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกในปริมาณมาก ๆ รูปร่างที่มีความซับซ้อน และผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความเที่ยงตรงของขนาดสูง อย่างไรก็ตามกระบวนการฉีดพลาสติกนั้นอาศัยความร้อนจากแผ่นให้ความร้อน (Band heater) ที่ติดอยู่บริเวณกระบอกฉีด (Barrel) ในการหลอมพลาสติกให้นิ่มตัวแล้วจึงใช้เกลียวหนอน (Screw) ในการหมุนสร้างแรงเฉือนให้พลาสติกเหล่านั้นให้หลอมเหลวก่อนดันฉีดพลาสติกออกมาจากหัวฉีด (Nozzle) โดยส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องฉีดพลาสติกจะแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องฉีด (Osswald & Menges, 2012)

กระบวนการฉีดพลาสติกในหนึ่งรอบการผลิตมีขั้นตอนการทำงานแบ่งเป็น 7 ขั้นตอน ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 กระบวนการฉีดพลาสติกในหนึ่งรอบการผลิต (Osswald & Menges, 2012)

ขั้นตอนที่ 1 แม่พิมพ์ปิด (Mold closing) ขั้นตอนนี้ชุดเปิดปิดแม่พิมพ์ฝั่งเคลื่อนที่ (Moving platen) จะเคลื่อนที่เข้าหา ชุดเปิดปิดแม่พิมพ์ฝั่งอยู่กับที่ (Fixed platen) ด้วยแรงดัน และความเร็ว จนกระทั่งแม่พิมพ์ปิดจึงจะส่งแรงดันปิดแม่พิมพ์ (Clamping force) เพื่อต้านทานแรงดันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการฉีดเติมเต็มพลาสติก (Injection pressure) และการฉีดย้ำพลาสติก (Holding pressure)

ขั้นตอนที่ 2 ชุดฉีดพลาสติกเคลื่อนที่เข้า (Injection unit forward) ขั้นตอนนี้ชุดฉีดพลาสติกจะเคลื่อนที่เข้าหาแม่พิมพ์โดยปลายหัวฉีด (Nozzle) จะชนแนบกับปลอกรูฉีด (Sprue bush) ของแม่พิมพ์ด้วยแรงดัน

ขั้นตอนที่ 3 ฉีดเติมเต็มพลาสติก (Injection or Mold filling) ขั้นตอนนี้เกลียวหนอนจะเคลื่อนด้วยความเร็ว (Injection Speed) และแรงดัน (Injection Pressure) ดันให้พลาสติกเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์จนเต็มโพรงแบบ

ขั้นตอนที่ 4 ฉีดย้ำพลาสติก (Holding Pressure) หลังจากเสร็จสิ้นการฉีดเติมเต็มพลาสติกแล้วชุดฉีด (Injection unit) จะส่งแรงดัน และปริมาตรพลาสติกเข้าอัดย้ำชิ้นงานพลาสติกในโพรงแบบตามเวลาที่ได้กำหนดไว้เพื่อชดเชยการหดตัวของพลาสติกในโพรงแบบ

ขั้นตอนที่ 5 ชุดฉีดถอยหลังกลับ (Injection unit back) เมื่อเสร็จสิ้นการฉีดย้ำพลาสติกแล้วชุดฉีดจะทำการเคลื่อนที่ถอยหลังกลับ

ขั้นตอนที่ 6 ชาร์จปริมาตรพลาสติกเหลว (Plasticating recovery) ขั้นตอนนี้เป็นการชาร์จพลาสติกเพื่อเตรียมฉีดในรอบถัดไปด้วยความเร็วในการหมุนของเกลียวหนอน (Screw rotation speed), อุณหภูมิหลอมพลาสติก (Melt temperature), แรงดันต้านทานการถอยกลับของเกลียวหนอน (Back pressure) และระยะดึงเกลียวหนอนถอยหลัง (Suck back)

ขั้นตอนที่ 7 เปิดแม่พิมพ์ และดันปลดชิ้นงาน (Mold opening and Ejection) หลังจากชิ้นงานเย็นตัวเป็นที่เรียบร้อยแล้วจะทำการเปิดแม่พิมพ์ และดันปลดชิ้นงานพลาสติกออกจากแม่พิมพ์ด้วยความเร็ว และแรงดัน

การหล่อเย็น (Cooling) การหล่อเย็นแม่พิมพ์เป็นการรอคอยให้พลาสติกในโพรงแบบถ่ายเทความร้อนจนกระทั่งชิ้นงานพลาสติกแข็งตัวเพียงพอต่อการทำการเปิดแม่พิมพ์ และดันปลดชิ้นงานในขั้นตอนที่ 7 ขั้นตอนการหล่อเย็นนี้สามารถควบคุมตัวแปรอุณหภูมิแม่พิมพ์ และเวลาในการหล่อเย็น ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญอย่างยิ่งต่อคุณภาพของชิ้นงาน

2.7 การทดสอบ และการวิเคาะห์

2.7.1 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

สมบัติเชิงกลของวัสดุ หมายถึง ความสามารถในการรับภาระจากสภาวะเชิงกลต่าง ๆ ของวัสดุ ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุจะต้องพิจารณาสมบัติเชิงกล และเกรดของวัสดุชนิดนั้น ๆ ให้สอดคล้องไปกับความต้องการ โดยทั่วไปสมบัติเชิงกลของวัสดุมักถูกพิจารณาในรูปของ ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) (Shah, 2007)

ความเค้น (Stress)

ความเค้น คือ ภาระแรงที่มากระทำต่อวัสดุให้เกิดการเสียรูปบนพื้นที่ชิ้นงานทดสอบ ในรูปของอัตราส่วนระหว่างแรงที่มากระทำต่อหน่วยพื้นที่ตัดขวางของวัสดุ

$$\sigma = \frac{F}{A} \qquad 2.3$$

เมื่อ σ = ความเค้น มีหน่วยเป็นปาสคาล (Pa, 1Pa = 1 N/m^2)

F = แรงภายนอกที่มากระทำต่อชิ้นงานทดสอบ (N)

A = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ (m^2)

ความเครียด (Strain)

ความเครียด คือ ผลที่เกิดจากภาระแรงที่มากระทำต่อวัสดุทำให้เกิดการยุบเข้า หรือ ยืดออกตามแนวแรงที่กระทำต่อวัสดุ ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนของความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความยาวของวัสดุก่อนได้รับภาระแรง

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \qquad 2.4$$

เมื่อ ε = ความเครียด

ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนแปลงจากภาระแรงที่มากระทำของชิ้นงานทดสอบ ($L-L_0$)

L_0 = ความยาวของชิ้นงานทดสอบก่อนได้รับภาระแรง

สมบัติทางด้านแรงดึง คือ สมบัติเชิงกลที่ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความเค้นแรงดึง อัตราร้อยละ

การยืดตัว ดังสมการที่ 2.5 และค่ามอดูลัสของยัง ดังสมการที่ 2.6 โดยความทนต่อแรงดึงสามารถหาได้จากการคำนวณอัตราส่วนแรงดึงสูงสุดต่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน ดังสมการที่ 2.7

$$\text{อัตราร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด} = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \qquad 2.5$$

เมื่อ ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนแปลงจากภาระแรงที่มากระทำของชิ้นงานทดสอบ ($L-L_0$)

L_0 = ความยาวของชิ้นงานทดสอบก่อนได้รับภาระแรง

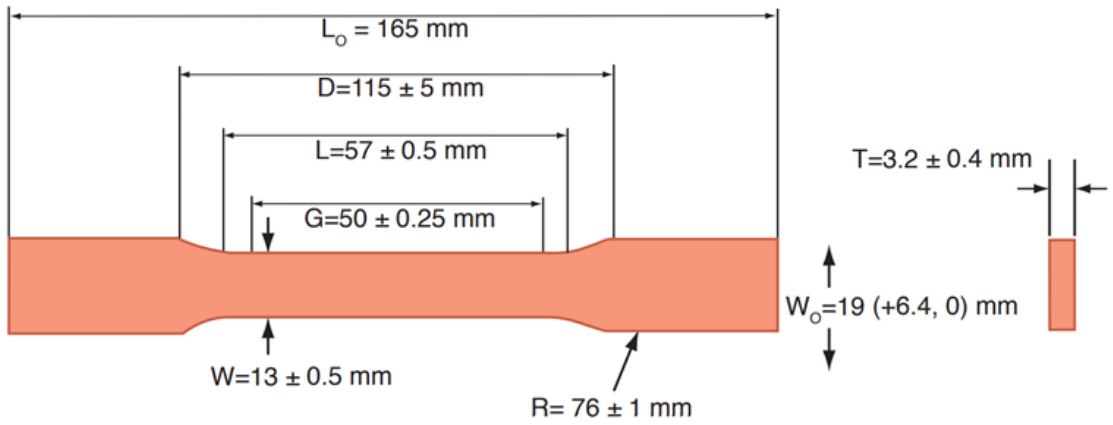
$$\text{มอดูลัสของยัง (E)} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \qquad 2.6$$

เมื่อ σ = ความเค้น มีหน่วยเป็นปาสคาล (Pa, 1 Pa = 1 N/m^2)

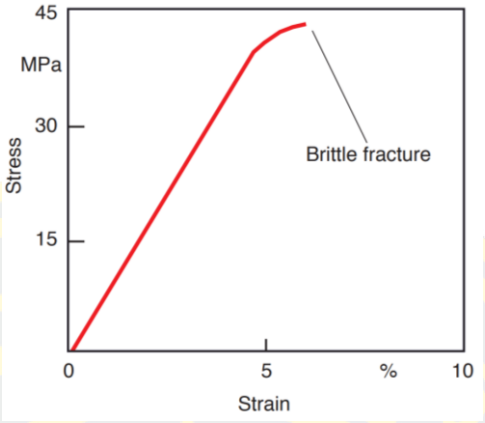
ε = ความเครียด

$$\text{ความทนต่อแรงดึง (Tensile strength)} = \frac{\text{แรงดึงสงสุดที่กระทำต่อชิ้งาน}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานทดสอบ}} \qquad 2.7$$

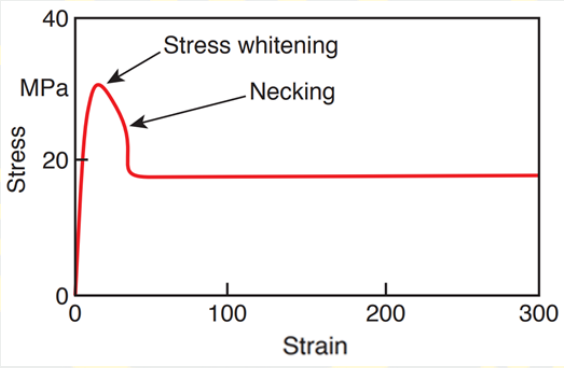
ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D 638 โดยชิ้นงานทดสอบมีรูปร่าง และขนาด ดังภาพที่ 12 โดยกราฟความสัมพันธ์การทดสอบวัสดุที่มีความเปราะ ดังภาพที่ 13 และกราฟความสัมพันธ์การทดสอบวัสดุที่มีความเหนียว ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 12 รูปร่าง และขนาดของชิ้นงานทดสอบ ASTM D 638 (Osswald & Menges, 2012)

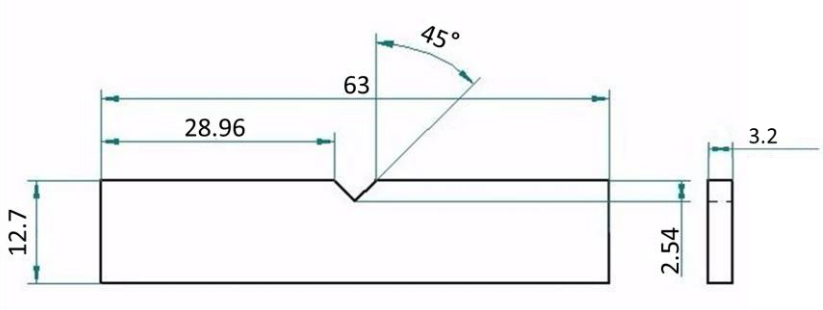


ภาพที่ 13 กราฟความเค้น และความเครียดของวัสดุที่มีความเปราะ (Osswald & Menges, 2012)



ภาพที่ 14 กราฟความเค้น-ความเครียดของวัสดุที่มีความเหนียว (สุจัยพรรณ เข็มแก้ว, 2559)

การทดสอบความแข็งแรงต่อแรงกระแทก โดยการตรวจสอบระดับของพลังงานที่เริ่มต้นทำให้วัสดุเกิดความเสียหาย หรือแรงกระแทกสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ โดยสามารถนำผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงกระแทกมาศึกษาการคอมโพสิตในเรื่องของการจัดเรียงตัวของเส้นใย หรือการกระจายตัวของวัสดุเติมในคอมโพสิต กล่าวคือการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงกระแทกเป็นการตรวจสอบสมบัติของวัสดุที่สำคัญต่อการพิจารณานำไปใช้งาน โดยในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256 – 10 โดยมีขนาด และรูปร่างดังภาพที่ 15

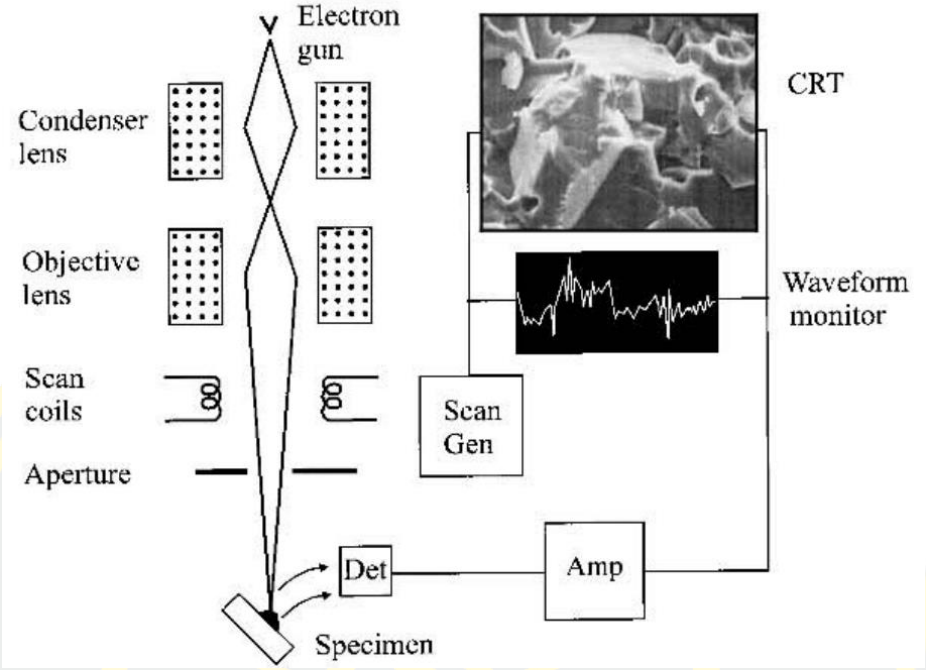


ภาพที่ 15 ชิ้นงานทดสอบแข็งแรงต่อแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256 – 10 (Sanjay, Arpitha, Laxmana Naik, Gopalakrishna, & Yogesh, 2016)

(Sanjay, Arpitha, Laxmana Naik, Gopalakrishna, & Yogesh, 2016)

2.7.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องส่องขยายสำหรับการศึกษาโครงสร้าง หรือ ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างในลักษณะภาพ 3 มิติ ลำอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะส่องไปบนผิวของชิ้นงานตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนมักมีพลังงานโดยปกติระหว่าง 1 keV และ 30 keV เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการควบคุมลำอิเล็กตรอน โดยเลนส์คอนเดนเซอร์จะทำการบีบอัดลำอิเล็กตรอนที่ถูกส่องลงมาให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-10 นาโนเมตรส่องผ่านไปยังส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมลำอิเล็กตรอนให้ส่องผ่านสแกนคอยล์ (Scan coil) สแกนคอยล์จะบังคับลำอิเล็กตรอนให้ส่องกราดไปกระทบบนพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างจนเกิดเป็นสัญญานต่าง ๆ ซึ่งถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์จับสัญญาน (Detector) ก่อนจะประมวลผลสัญญานให้เป็นภาพต่อไป ดังภาพที่ 16 โดยส่วนมากมักใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของวัสดุเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของการผสมวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปเข้าด้วยกัน หรือ การทำนายแรงยึดเหนี่ยวของคอมโพสิต โดยแน้วโน้มแรงยึดเหนี่ยวที่ดีมาจากการผสมที่ไม่เห็นการแยกส่วนกันของวัสดุต่าง ๆ ในคอมโพสิต (Goodhew & Humphreys, 2000)

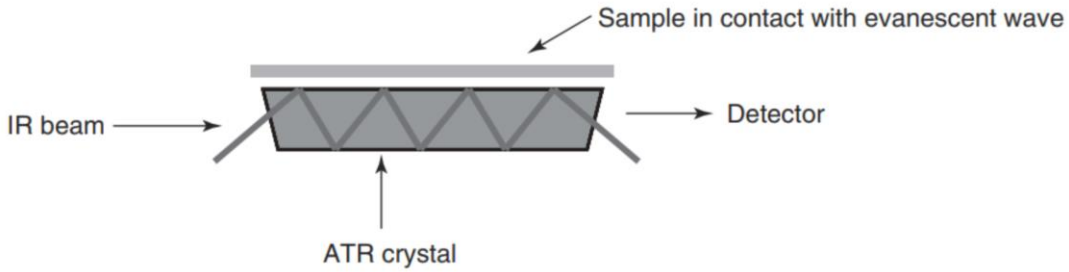


ภาพที่ 16 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Goodhew & Humphreys, 2000)

(Goodhew & Humphreys, 2000)

2.7.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิคอินฟาเรดสเปกโทรสโคปี (FTIR)

เทคนิคอินฟาเรดสเปกโทรสโคปี เป็นเทคนิคการประมวลผลคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 4000 cm^{-1} ถึง 400 cm^{-1} โดยมีความละเอียดในการวัดที่ 4 cm^{-1} เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิคอินฟาเรดสเปกโทรสโคปีมีการทำงานเริ่มต้นด้วยการนำเอาผลึก ATR กดทับชิ้นงานตัวอย่างที่แรงกดประมาณ 80 N รังสีอินฟาเรดจะตกกระทบกับชิ้นงานตัวอย่าง และถูกดูดซับจากโมเลกุลของชิ้นงานตัวอย่างที่มีความถี่เดียวกันกับความถี่ของคลื่นรังสีอินฟาเรด โมเลกุลจะเกิดการสั่น และเกิดการหมุนของพันธะเคมี เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิคอินฟาเรดสเปกโทรสโคปีจะทำการประมวลผลจากการดูดซับความถี่ของคลื่นรังสีอินฟาเรดให้แสดงเป็นจุดพีคบนกราฟเพื่อใช้ในการประกอบหาหมู่ฟังก์ชันเพื่อนำมาพิจารณาชนิดของสารตัวอย่าง ดังภาพภาพที่ 17 (Vivaldo-Lima & Saldívar-Guerra, 2013)



ภาพที่ 17 ลักษณะการทำงานของเครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิคอินฟเรดสเปกโทรสโคปี (FTIR) (Vivaldo-Lima & Saldívar-Guerra, 2013)

Souet al., 2014)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Candido, Castronuovo และ Miccolis (2009) ได้ศึกษาการการย่อยสลายในธรรมชาติของกระถางต้นไม้ที่ย่อยสลายได้สำหรับปลูกต้นคริสต์มาส (Poinsettia) โดยการนำเอาพลาสติกพอลิโพรพิลีน ผสมกับเส้นใยพืช พบว่ากระถางที่ได้จากการขึ้นรูปคอมโพสิตมีความแข็งแรงต่อแรงดึงก่อนการย่อยสลายในช่วง 20-30 MPa ซึ่งมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งาน และหลังจากฝังดินพบว่าความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงอย่างต่อเนื่อง ที่ระยะเวลา 6 เดือนความแข็งแรงต่อแรงดึงอยู่ในช่วง 10-20 MPa

A. Sreekumar, Leblanc และ Saiter (2012) ได้ศึกษาผลของการผสมกลีเซอรอลต่อเทอร์โมพลาสติกที่ย่อยสลายได้ 100% จากแป้งข้าวสาลีในอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก 20, 23, 25, 30 และ 35 พบว่าการผสมกลีเซอรอลจะปรับปรุงดัชนีการไหลของวัสดุให้ดีขึ้นตามอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของกลีเซอรอลที่สูงขึ้น ในอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักที่ 25 จะได้ค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกที่สูงที่สุด และในอัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนักที่ 30 จะได้อัตราร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดที่สูงที่สุด แต่ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของวัสดุจะลดน้อยลงเมื่อทำการผสมกลีเซอรอลตามปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้น กล่าวคือการผสมกลีเซอรอลในเทอร์โมพลาสติกที่ย่อยสลายได้สามารถปรับปรุงดัชนีการไหลของวัสดุ ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง และอัตราการยืดตัว ณ จุดขาดให้ดีขึ้น

Hongsriphan, Burirat, Niratsungnern, และ Trongteng (2013) ได้ศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยผสมอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 1 และ 5 phr ในพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราการผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่แตกต่างกัน พบว่าปริมาณของอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 1 phr สามารถปรับปรุงค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกได้มากกว่าการผสมอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ในปริมาณ 5 phr และการเพิ่ม

ปริมาณของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามารถปรับปรุงค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกของคอมโพสิตให้ดีขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง และค่ามอดูลัสนั้นลดลง กล่าวคืออนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีอิทธิพลต่อการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุในด้านค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทก และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ของคอมโพสิตให้ดีขึ้น (A. Sreekumar, Leblanc, & Sailer)

Kaewpirom และ Worrarat (2014) ได้ศึกษาการเตรียม และสมบัติของใยเสริมแรงจากใบสับปะรดในพอลิแลคติกแอซิดที่อัตราส่วน 10, 20, 30, 40 และ 50 wt% พบว่าเมื่อทำการผสมใยเสริมแรงจากใบสับปะรดที่ 50 wt% มีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุดที่ 20 MPa และเมื่อผสมใยเสริมแรงจากใบสับปะรดที่ 40 wt% มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด สูงสุดที่ 0.9% กล่าวคือใยเสริมแรงจากใบสับปะรดสามารถปรับปรุงค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ของพอลิแลคติกแอซิดให้ดีขึ้น (Kaewpirom & Worrarat, 2014)

Tsou และคณะ (2014) ได้ศึกษาอิทธิพลของสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในคอมโพสิต ระหว่างพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดกับแกลบ โดยงานวิจัยนี้ทำการผสมพลาสติกพอลิแลคติกแอซิด กับแกลบในอัตราส่วน 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40 และ 50 : 50 ตามลำดับ ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงลดต่ำลงจาก 58 MPa เมื่อไม่ผสมแกลบ เป็น 34, 32, 24, 20 และ 4 MPa ตามลำดับ แต่สามารถปรับปรุงค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของคอมโพสิตให้ดีขึ้นได้โดยการผสมสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณ 2.5 phr ซึ่งสามารถปรับปรุงค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเป็น 40, 33, 31, 25 และ 25 MPa ตามลำดับ กล่าวคือสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถปรับปรุงค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของคอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับแกลบให้ดีขึ้น

Yaacob, Diyana, Ismail และ Sam (2016) ได้ศึกษาการย่อยสลายโดยการฝังดินของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดกับฟางข้าว และมีรายงานว่าหลังการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินที่ระยะเวลา 6 เดือนพบรอยแตก และรูพรุนจำนวณมาก ผ่านการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า และพบปฏิกริยาไฮโดรไลซิสผ่านการศึกษาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier-transform infrared spectroscopy

Lee และคณะ (2018) ได้ศึกษาการเตรียม และการพิสูจน์เอกลักษณ์ของคอมโพสิตระหว่างพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดกับเส้นใยเปลือกทุเรียนในอัตราส่วน 15, 30, 45, 60 phr พบว่าเมื่อทำการผสมเส้นใยจากเปลือกทุเรียนในพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดจะทำให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงลดน้อยเหลือเพียง 4 MPa ที่อัตราส่วน 15 phr แต่การเพิ่มปริมาณอัตราส่วนการผสมของเส้นใยเปลือกทุเรียนสามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของคอมโพสิตได้ โดยการผสมที่อัตราส่วน

60 phr จะมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเป็น 11.8 MPa อุณหภูมิการสลายตัวของเส้นใยเปลือกทุเรียนเริ่มต้นที่ 250 องศาเซลเซียส กล่าวคือค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของคอมโพสิตจะลดน้อยลงจากการผสมระหว่างพลาสติกพอลิแลคติกแอซิดกับเส้นใยเปลือกทุเรียน แต่ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงยังคงแสดงการเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของเส้นใยเปลือกทุเรียนในอัตราส่วนที่มากขึ้น

Alison, Tao, Arturo, K. Armor และ Manjusri (2018) ได้ศึกษาไบโอคอมโพสิตจากพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต กับกากผลอุ่น ด้วยกระบวนการหลอมอัดรีดขึ้นรูป และกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยปรับปรุงกระบวนการผสมด้วยสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA-g-BioPBS) สามารถปรับปรุงความแข็งแรงต่อการดัดงอ และความแข็งแรงต่อแรงกระแทกให้เพิ่มสูงขึ้นได้ใน 28.4% และ 59% ตามลำดับ และผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของไบโอคอมโพสิตพบว่าผลของ MA-g-BioPBS สามารถเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างกากผลอุ่นกับพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตให้เพิ่มสูงขึ้น

Kumar, Venkatappa, Ray และ Ramana (2019) ได้รายงานว่าการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน ของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดกับลิกนินให้ดีขึ้นด้วยสารควบคู่ triallyl isocyanurate (TAIC) และย่อยสลายตัวของไบโอคอมโพสิตเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไบโอคอมโพสิตที่เกิดการผสมลิกนิน 5% และ 20% โดยพบร้อยละการลดลงของน้ำหนักไบโอคอมโพสิต 55.38% และ 68.67% ตามลำดับเมื่อเวลาผ่านไป 28 วัน

Rahman, Kareem, Salah, Khalil และ Sherif (2020) ได้ศึกษาอิทธิพลของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (1 % wt.) และแคลเซียมคาร์บอเนต (1 % wt.) ต่อความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงนาโนคอมโพสิต พบการสูญเสียน้ำหนักอย่างต่อเนื่องโดยช่วงปลายของการทดลอง (สัปดาห์ที่ 8) พบการสูญเสียน้ำหนัก 0.265% และยังพบอีกว่า การผสมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (1 % wt.) และแคลเซียมคาร์บอเนต (1 % wt.) สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นได้

2.9 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดพบว่าผู้วิจัยได้นำเอาวัสดุชีวมวลเช่น แกลบ เส้นใยจากเปลือกทุเรียน เส้นใยจากใบสับปะรด และแคลเซียมคาร์บอเนต มาเป็นวัสดุเติมด้วยการผสมกับพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด เพื่อลดต้นทุนผลิตภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด ในการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบ บางงานวิจัยได้นำเอากลีเซอรอลมาปรับปรุงดัชนีการไหลของ

พลาสติกชีวภาพ หรือนำเอาสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์มาปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดกับวัสดุชีวมวล

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยศึกษาความเป็นไปได้ในการผสมวัสดุชีวมวลเพื่อผลิตไบโอคอมโพสิตที่เป็นสารเชิงประกอบของชีวมวลกับพลาสติกที่ย่อยสลายได้พอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยวัสดุชีวมวลที่ได้นำมาวิจัยคือ แกลบ เปลือกทุเรียน และใบสับปะรด ซึ่งมีสารเติมแต่งที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติมาผสมเพื่อช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการผสม และควบคุมการไหลของไบโอคอมโพสิตที่เตรียมขึ้น

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกล, ศึกษาสัณฐานวิทยา, ศึกษากระบวนการขึ้นรูปคอมโพสิต, ศึกษากระบวนการย่อยสลายโดยการฝังดิน และศึกษากระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกชีวภาพและคอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับวัสดุชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ แกลบ, เปลือกทุเรียน และใบสับปะรด ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ซึ่งจะประกอบไปด้วยขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

3.1 สารเคมี และวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 สารเคมี

1. พลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิด Biopolymer 3251D,
บริษัท เนเจอร์เวิร์ค เอเชียแปซิฟิค จำกัด
2. พลาสติกชีวภาพชนิดพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS), FZ71PM
บริษัท พีทีที เอ็มซีซี ไบโอเคมจำกัด
3. สารเติมแต่ง กลีเซอรอล (Gly), เกรดอาหาร, CA0701-A
บริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด
4. สารเติมแต่ง มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA), 63200
บริษัท Sigma-Aldrich
5. สารเติมแต่ง แว๊กซ์อี (Wax-E), Erucylamide; (Z)-Docos-13-enamide
บริษัท Oleofine Organics (Thailand) Co, Ldt.
6. สารเติมแต่ง แคลเซียมสเตียเรท (Ca-st) เกรดอาหาร
บริษัท CT Chemical Co.,Ltd
7. แกลบ (Rice husk, RH) บดละเอียดขนาดอนุภาคเล็กกว่า 600 μm
8. เปลือกทุเรียน (Durian bark, DB) พันธุ์หมอนทองบดละเอียดขนาดอนุภาคเล็กกว่า 600 μm
9. ใบสับปะรด (Pineapple leaf, PL) พันธุ์ศรีราชาบดละเอียดขนาดอนุภาคเล็กกว่า 600 μm

3.1.2 อุปกรณ์

1. ตู้อบลมร้อน Binder โมเดล FED 240
2. ตู้อบลมร้อนสำหรับไล่ความชื้นเม็ดพลาสติก Arburg โมเดล Thermolift
3. เครื่องบดลดขนาด Dxfill Machine โมเดล OXM 1000
4. แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับฉีดชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน ASTM D638 – 02a
5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ Matsui โมเดล GMCA-25A-OP

3.1.3 เครื่องมือ

1. เครื่องทดสอบแรงดึง Zwick/Roell โมเดล Z100 load cell 100 kN
2. เครื่องทดสอบแรงกระแทก Chen Yen Testing Machine โมเดล CY-6346
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด LEO โมเดล LEO 1450 VP
4. เครื่องหลอมอัดรีดขึ้นรูปแบบเกลียวหนอนคู่ Labtech Engineering โมเดล Combi Twin Screw Extruders 26 mm (Modular Co-rotating Twin Screw Extruders)
5. เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก Arburg Allrounder โมเดล 370U 700-70 ขนาดแรงปิดแม่พิมพ์ 70 ตัน เส้นผ่านศูนย์กลางเกลียวหนอน 22 มิลลิเมตร
6. เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิคอินฟาเรดสเปกโทรสโคปี PerkinElmer โมเดล Frontier ATR-FTIR Spectrometer

3.2 การเตรียมไบโอคอมโพสิต

3.2.1 การเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ

นำแกลบ (อักษรย่อคือ RH) มาบดละเอียดด้วยเครื่องบดลดขนาด ให้มีลักษณะเป็นผงแป้ง ร่อนด้วยตะแกรงให้มีขนาดเล็กกว่า 600 μm อบไล่ความชื้นแกลบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 90-95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชม. จนกระทั่งแห้ง จากนั้นนำไปผสมกับพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิด (อักษรย่อคือ PLA), พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (อักษรย่อคือ PBS), สารเติมแต่งกลีเซอรอล 20% ของน้ำหนักแกลบ และสารเติมแต่งอีก 3 ชนิด คือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์, แว๊กซ์อี และแคลเซียมสเตียเรท อย่างละ 0.8% wt. ดังตารางที่ 1 ด้วยเครื่องหลอมอัดรีดขึ้นรูปแบบเกลียวหนอนคู่ โดยอัตราส่วนการผสมคำนวณจากสมการ ดังต่อไปนี้ (เมื่อ A คือร้อยละอัตราส่วนของน้ำหนักพลาสติกชีวภาพเมื่อเทียบกับน้ำหนักของทั้งหมด)

โดย PLARH 10 สมการ $A + (0.1 \times A) + (0.02 \times A) + 2.4 = 100$ 3.1

PLARH 20 สมการ $A + (0.2 \times A) + (0.04 \times A) + 2.4 = 100$ 3.2

PLARH 30 สมการ $A + (0.3 \times A) + (0.06 \times A) + 2.4 = 100$ 3.3

*โดย A ของสูตร PLARH10, PLARH20 และ PLARH30 คือ พลาสติกชีวภาพ PLA และของสูตร PLAPBSRH 30 ใช้สมการที่ 3.3 ในการคำนวณหาอัตราส่วนการผสม โดย A คือ พลาสติกพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด 60% และ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 40%

**สารเติมแต่ง 3 ชนิด มาเลอิกแอนไฮไดรด์, แว๊กซ์อี และแคลเซียมสเตียเรท รวมกันเป็น 2.4 % wt. ในสมการที่ 3.1 – 3.3

ตารางที่ 1 อัตราส่วนการผสมระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ

Item	% by weight						
	PLA	PBS	RH	Gly	MA	Ca-st	Wax-E
PLARH 10	87.14	-	8.71	1.75	0.8	0.8	0.8
PLARH 20	78.71	-	15.74	3.15	0.8	0.8	0.8
PLARH 30	71.76	-	21.53	4.31	0.8	0.8	0.8
PLAPBSRH 30	43.06	28.7	21.53	4.31	0.8	0.8	0.8

3.2.2 การเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียน

นำเปลือกทุเรียน (อักษรย่อคือ DB) มาบดหยาบด้วยเครื่องบดลดขนาด และอบไล่ความชื้นเปลือกทุเรียนด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 90-95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 ชม. จนกระทั่งแห้ง จากนั้นนำเปลือกทุเรียนมาบดละเอียดด้วยเครื่องบดลดขนาดอีกครั้งให้มีลักษณะเป็นผงแป้งร่อนด้วยตะแกรงให้มีขนาดเล็กกว่า 600 μm จากนั้นนำไปผสมกับพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิด, พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, สารเติมแต่งกลีเซอรอล 20% ของน้ำหนักเปลือกทุเรียน และสารเติมแต่งอีก 3 ชนิด คือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์, แว๊กซ์อี, แคลเซียมสเตียเรท อย่างละ 0.8% wt. ดังตารางที่ 3.2 ด้วยเครื่องหลอมอัดรีดขึ้นรูปแบบเกลียวหนอนคู่ โดยอัตราส่วนการผสมคำนวณจากสมการที่ 3.1, 3.2 และ 3.3

โดย สูตร PLADB 10 ใช้สมการที่ 3.1 ในการคำนวณหาอัตราส่วนการผสม
สูตร PLADB 20 ใช้สมการที่ 3.2 ในการคำนวณหาอัตราส่วนการผสม
สูตร PLADB 30 ใช้สมการที่ 3.3 ในการคำนวณหาอัตราส่วนการผสม
สูตร PLAPBSDB 30 ใช้สมการที่ 3.3 ในการคำนวณหาอัตราส่วนการผสม

*โดย A ของสูตร PLDB10, PLADB20 และ PLADB30 คือ พลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดและ ของสูตร PLAPBSDB 30 ใช้สมการที่ 3.3 ในการคำนวณหาอัตราส่วนการผสม โดย A คือ พลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด 60% และ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 40%

ตารางที่ 2 อัตราส่วนการผสมระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียน

Item	% by weight						
	PLA	PBS	DB	Gly	MA	Ca-st	Wax-E
PLADB 10	87.14	-	8.71	1.75	0.8	0.8	0.8
PLADB 20	78.71	-	15.74	3.15	0.8	0.8	0.8
PLADB 30	71.76	-	21.53	4.31	0.8	0.8	0.8
PLAPBSDB 30	43.06	28.7	21.53	4.31	0.8	0.8	0.8

3.2.3 การเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับใบสับปะรด

นำใบสับปะรด (อักษรย่อคือ PL) มาบดละเอียดด้วยเครื่องปั่นลดขนาดให้มีลักษณะเป็นผงแป้งร่อนด้วยตะแกรงให้มีขนาดเล็กกว่า 600 μm อบไล่ความชื้นใบสับปะรดด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 90-95 องศาเซลเซียสจนเป็นเวลา 4 ชม. จนกระทั่งแห้ง จากนั้นนำไปผสมกับพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิด, พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, สารเติมแต่งกลีเซอรอล 20% ของน้ำหนักใบสับปะรด และสารเติมแต่งอีก 3 ชนิด คือ มาเลอิกแอนไฮไดรด์, แว๊กซ์อี, แคลเซียมสเตียเรท อย่างละ 0.8% wt. ดังตารางที่ 3.2 ด้วยเครื่องหลอมอัดรีดขึ้นรูปแบบเกลียวหนอนคู่ โดยอัตราส่วนการผสมคำนวณจากสมการที่ 3.1, 3.2 และ 3.3

โดย สูตร PLAPL 10 ใช้สมการที่ 3.1 ในการคำนวณหาอัตราส่วนการผสม
สูตร PLAPL 20 ใช้สมการที่ 3.2 ในการคำนวณหาอัตราส่วนการผสม

สูตร PLAPL 30 ใช้สมการที่ 3.3 ในการคำนวณหาอัตราส่วนการผสม

สูตร PLAPBSPL 30 ใช้สมการที่ 3.3 ในการคำนวณหาอัตราส่วนการผสม

*โดย A ของสูตร PLAPL10, PLAPL20 และ PLAPL30 คือ พลาสติกชีวภาพ PLA และของสูตร PLAPBSPL 30 ใช้สมการที่ 3.3 ในการคำนวณหาอัตราส่วนการผสม โดย A คือ พลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด 60% และ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 40%

ตารางที่ 3 อัตราส่วนการผสมระหว่างพลาสติกชีวภาพกับใบสับปะรด

Item	% by weight						
	PLA	PBS	PL	Gly	MA	Ca-st	Wax-E
PLAPL 10	87.14	-	8.71	1.75	0.8	0.8	0.8
PLAPL 20	78.71	-	15.74	3.15	0.8	0.8	0.8
PLAPL 30	71.76	-	21.53	4.31	0.8	0.8	0.8
PLAPBSPL 30	43.06	28.7	21.53	4.31	0.8	0.8	0.8

3.2.4 การเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง

นำเม็ดไบโอคอมโพสิตทั้ง 3 ชนิด ในแต่ละอัตราส่วนไปอบไล่ความชื้นด้วยอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 – 02a ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก

3.2.5 การเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทก

นำเม็ดไบโอคอมโพสิตทั้ง 3 ชนิด ในแต่ละอัตราส่วนการผสมไปอบไล่ความชื้นด้วยอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการอัดขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D256-10 ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปพลาสติก

3.3 การศึกษาสมบัติของไบโอคอมโพสิต

3.3.1 สมบัติเชิงกล

วัดค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง, ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดต่อแรงดึง และมอดูลัสของยังของไบโอคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นในแต่ละสูตร ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยชิ้นงานทดสอบมี

ขนาด และรูปร่างตามมาตรฐาน ASTM D638 – 02a ดังภาพ 12 ส่วนวัดแรง (Load cell) 100 กิโลนิวตันที่อัตราเร็วในการดึงที่ 5 มิลลิเมตรต่อวินาที

วัดค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกของไบโอคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นในแต่ละสูตรด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก โดยชิ้นงานทดสอบมีขนาด และรูปร่างตามมาตรฐาน ASTM D256-10 ดังภาพที่ 15

3.3.2 การศึกษาสัณฐานวิทยา

ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ที่พื้นผิวรอยแตกจากการทดสอบแรงดึงของผลิตภัณฑ์ที่กำลังขยาย 100 เท่าของชิ้นงานตัวอย่างก่อน และกระบวนการการทดสอบด้วยกระบวนการฝังดิน

3.3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่างโดยใช้เทคนิคอินฟาเรดเสปกโทรสโครปี (FTIR) โดยการนำเอาตัวอย่างเม็ดของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากเครื่องหลอมอัดรีดขึ้นรูป โดยศึกษาหมู่ฟังก์ชันในช่วงเลขคลื่น 4000 – 400 cm^{-1}

3.3.4 การศึกษากระบวนการย่อยสลายโดยการฝังดิน

ศึกษากระบวนการย่อยสลายด้วยวิธีการการฝังดิน (Shinji, 2011) โดยนำชิ้นงานทดสอบของไบโอคอมโพสิตไปฝังดินลึก 10 เซนติเมตร เป็นเวลา 1, 2, 4 และ 6 เดือน จากนั้นชั่งน้ำหนักเพื่อวัดน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานทดสอบ โดยคำนวณเป็นอัตราส่วนร้อยละ ดังสมการที่ 3.1 และนำเอาชิ้นงานหลังจากผ่านกระบวนการย่อยสลายโดยการฝังดินตามเวลาที่กำหนดไปทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 – 02a, ภาพถ่ายดิจิตอล และ วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่างโดยใช้เทคนิคอินฟาเรดเสปกโทรสโครปี

$$\text{อัตราส่วนร้อยละของน้ำหนักชิ้นงานทดสอบที่หายไป} = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100 \qquad 3.4$$

เมื่อ W_0 = นำหนักตัวอย่างก่อนฝังดิน

W_1 = นำหนักตัวอย่างหลังฝังดิน

3.3.5 กระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุไบโอคอมโพสิต

การศึกษากระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุไบโอคอมโพสิตผู้วิจัยได้ใช้พลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดเป็นข้อมูลข้างต้นสำหรับอ้างอิงในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองการไหลของพลาสติก Moldex3D และการปรับตั้งค่าตัวแปรสำหรับการทดลองฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ตัวอย่างด้วยวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ได้จากพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และแกลบ ซึ่งเป็นวัสดุชีวมวล โดยดำเนินการตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. การออกแบบตัวอย่างผลิตภัณฑ์สำหรับทดลองฉีดขึ้นรูปด้วยวัสดุไบโอคอมโพสิต โดยวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองการไหลของพลาสติก Moldex3D เพื่อตรวจสอบรูปทรงของตัวอย่างผลิตภัณฑ์

2. หาค่าตัวแปรสำคัญสำหรับทดลองฉีดขึ้นรูปตัวอย่างผลิตภัณฑ์ด้วยวัสดุไบโอคอมโพสิต โดยวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองการไหลของพลาสติก Moldex3D

3. ทดลองฉีดขึ้นรูปตัวอย่างผลิตภัณฑ์ด้วยพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุไบโอคอมโพสิต

3.3.6 การวิเคราะห์ราคาของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างจากวัสดุไบโอคอมโพสิต

การศึกษาวิธีการลดต้นทุนของพลาสติกชีวภาพด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยผู้วิจัยมีตัวแปรในการคำนวณ คือ ราคาของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และราคาสารเติมแต่งทั้ง 4 ชนิด ได้แก่กลีเซอรอล, มาเลอิกแอนไฮไดรด์, แว๊กซ์อี และแคลเซียมสเตียเรท ทั้งนี้ในงานวิจัยจะไม่รวมต้นทุนการผสมเม็ดไบโอคอมโพสิตเนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ไม่แน่นอน และส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของต้นทุน เช่น ค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักร, ค่าเสื่อมราคาของอุปกรณ์ และขนาดของเครื่องหลอมอัดรีดขึ้นรูปแบบเกลียวหนอนคู่ เป็นต้น

บทที่ 4
ผลการวิจัย

4.1 ผลการเตรียมไบโอคอมโพสิต

4.1.1 การเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ

การเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบได้ผลเป็นที่น่าพึงพอใจ เนื่องจากสามารถผสม และตัดขึ้นรูปเม็ดได้ครบทุกอัตราส่วนของแกลบ ดังตารางที่ 4 โดยตั้งค่าอุณหภูมิผสมในช่วง 90-180 °C ในเครื่องหลอมอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ ดังนี้

Barrel temperature zone 1	90	°C
Barrel temperature zone 2	100	°C
Barrel temperature zone 3	110	°C
Barrel temperature zone 4	120	°C
Barrel temperature zone 5	130	°C
Barrel temperature zone 6	130-140	°C
Barrel temperature zone 7	140-150	°C
Barrel temperature zone 8	150-160	°C
Barrel temperature zone 9	160-170	°C
Barrel temperature zone 10 (nozzle)	170-180	°C
Screw Speed	100-200	rpm

ตารางที่ 4 ผลการเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ

ชื่อตัวอย่าง	ลักษณะ	รูปถ่าย
PLA	ทรงกลม	

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ลักษณะ	รูปถ่าย
PLARH10	ทรงกลม	
PLARH20	ทรงกลม	
PLARH30	ทรงกลม	
PLAPBSRH30	เม็ดทรงรีขนาดเล็กและแบน	
PBS	ทรงรี	

4.1.2 การเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียน

ผลการเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียนไม่สามารถผสมสูตร PLADB30 เมื่อใช้เงื่อนไขการผสมเดียวกันกับ PLARH30 โดยพบการอุดตันในเครื่องหลอมอัดรีดขึ้นรูป และการเสื่อมสภาพทางความร้อนเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหลอมที่ช่วง 180-200 °C ส่วนไบโอคอมโพสิตสูตรอื่น ๆ ที่มาจากเปลือกทุเรียนสามารถผสมได้ แต่ไม่สามารถตัดเป็นเม็ดได้จำเป็นต้อง

ผ่านรางน้ำ และนำเข้าเครื่องบดเม็ด ดังตารางที่ 5 โดยตั้งค่าอุณหภูมิผสมในช่วง 90-180 °C ในเครื่องหลอมอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ ดังนี้

Barrel temperature zone 1	90	°C
Barrel temperature zone 2	100	°C
Barrel temperature zone 3	110	°C
Barrel temperature zone 4	120	°C
Barrel temperature zone 5	130	°C
Barrel temperature zone 6	130-140	°C
Barrel temperature zone 7	140-150	°C
Barrel temperature zone 8	150-160	°C
Barrel temperature zone 9	160-170	°C
Barrel temperature zone 10 (nozzle)	170-180	°C
Screw Speed	100-200	rpm

ตารางที่ 5 ผลการเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียน

ชื่อตัวอย่าง	ลักษณะ	รูปถ่าย
PLA	ทรงกลม	
PLADB20	คล้ายเศษไม้บด	

ตารางที่ 5 (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	ลักษณะ	รูปถ่าย
PLADB20	คล้ายเศษไม้บด	
PLAPBSDB30	คล้ายเศษไม้บด	
PBS	ทรงรี	

4.1.3 การเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับใบสับปะรด

ผลการเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับใบสับปะรดไม่สามารถผสมสูตร PLAPL30 เมื่อใช้เงื่อนไขการผสมเดียวกันกับ PLARH30 โดยพบการอุดตันในเครื่องหลอมอัดรีดขึ้นรูป และการเสื่อมสภาพทางความร้อนเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหลอมเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหลอมที่ช่วง 180-200 °C ส่วนไบโอคอมโพสิตสูตรอื่น ๆ ที่มาจากใบสับปะรดสามารถผสมได้ แต่ไม่สามารถตัดเป็นเม็ดได้ จำเป็นต้องผ่านรางน้ำ และนำเข้าเครื่องบดเม็ด ดังตารางที่ 6 โดยตั้งค่าอุณหภูมิผสมในช่วง 90-180 °C ในเครื่องหลอมอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ ดังนี้

Barrel temperature zone 1	90	°C
Barrel temperature zone 2	100	°C
Barrel temperature zone 3	110	°C
Barrel temperature zone 4	120	°C
Barrel temperature zone 5	130	°C
Barrel temperature zone 6	130-140	°C

Barrel temperature zone 7	140-150	°C
Barrel temperature zone 8	150-160	°C
Barrel temperature zone 9	160-170	°C
Barrel temperature zone 10 (nozzle)	170-180	°C
Screw Speed	100-200	rpm

ตารางที่ 6 ผลการเตรียมไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับใบสับปะรด

ชื่อตัวอย่าง	ลักษณะ	รูปถ่าย
PLA	คล้ายทางกลม	
PLAPL10	คล้ายเศษไม้บด	
PLAPL20	คล้ายเศษไม้บด	
PLAPBSPL30	คล้ายเศษไม้บด	
PBS	ทรงรี	

ภาพที่ 18 ลักษณะการอุดตันในเครื่องหลอมอัดรีดของคอมโพสิต PLADB30 และ PLAPL30

ภาพที่ 19 ลักษณะการไหม้ในเครื่องหลอมอัดรีดของไบโอคอมโพสิต PLADB30 และ PLAPL30

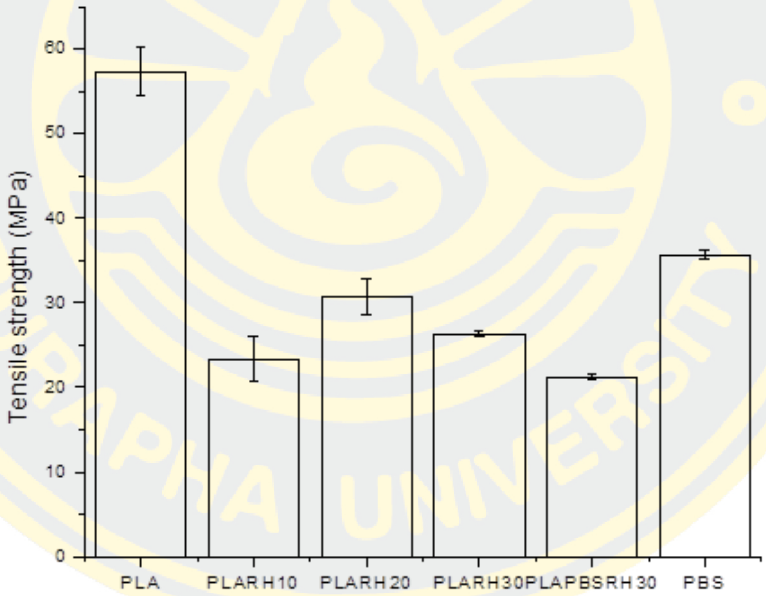
ผลทดสอบความสามารถการไหลของไบโอคอมโพสิตด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลของพอลิเมอร์ (Melt flow indexer) ที่อุณหภูมิ 190 °C พบว่าไบโอคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นในทุกอัตราส่วนมีค่าอัตราการไหลมากกว่า 70 g/10min ซึ่งเป็นผลจากสารเติมแต่ง กลีเซอรอล, มาเลอิกแอนไฮไดรด์ และแว๊กซ์อี

4.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของไบโอคอมโพสิต

4.2.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลความแข็งแรงต่อแรงดึงของชิ้นงานทดสอบวัสดุพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, PLARH10, PLARH20,

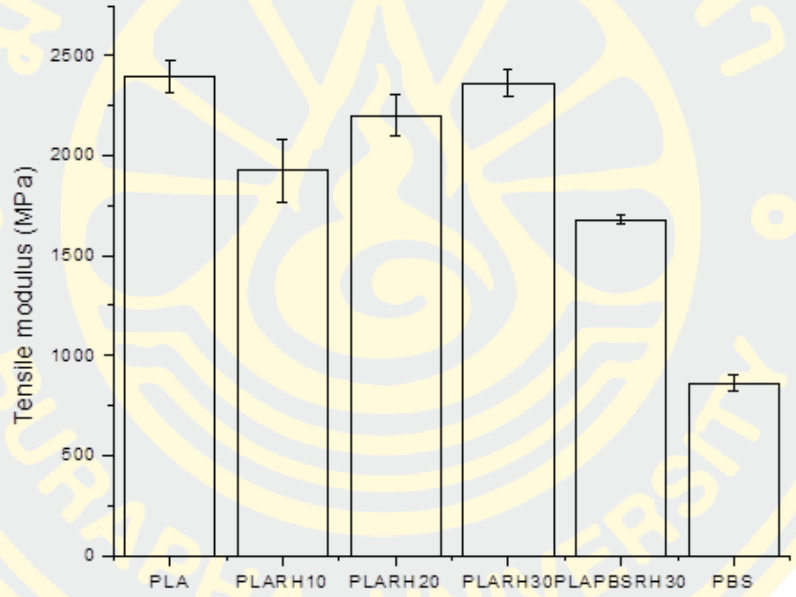
PLARH30 และ PLAPBSRH30 ตามมาตรฐาน ASTM D638 – 02a ได้ผล ดังภาพที่ 20 พบว่าพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความแข็งแรงต่อแรงดึงเท่ากับ 57.3 และ 37.5 MPa ตามลำดับ เมื่อเติมแกลบลงในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดในปริมาณ 10% wt. พบว่าไบโอคอมโพสิต PLARH10 มีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงเป็น 23.3 MPa ซึ่งคิดเป็นการลดลงร้อยละ 59.3% และเมื่อเพิ่มปริมาณแกลบไปที่ 20% wt. พบว่า PLARH20 มีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นเป็น 30.6 MPa ซึ่งคิดเป็นการเพิ่มขึ้นร้อยละ 31.3% ของ PLARH10 และเมื่อเพิ่มปริมาณแกลบเป็น 30% wt. พบว่า PLARH30 ลดลงเป็น 26.3 MPa ซึ่งคิดเป็นการลดลงร้อยละ 14% ของ PLARH20 แต่หากเติมพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปในอัตราส่วนร้อยละ 40% จากน้ำหนักทั้งหมดของพลาสติกชีวภาพพบว่า PLAPBSRH30 มีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงเป็น 21.2 MPa ซึ่งคิดเป็นการลดลงร้อยละ 19.4% ของ PLARH30



ภาพที่ 20 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากแกลบ

การศึกษาสมบัติเชิงกลค่ามอดูลัสของแรงดึงของชิ้นงานทดสอบวัสดุพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, PLARH10, PLARH20, PLARH30 และ PLAPBSRH30 ตามมาตรฐาน ASTM D638 – 02a ได้ผลดังภาพที่ 21 พบว่าพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีมอดูลัสของแรงดึงเท่ากับ 2395 และ 862 MPa ตามลำดับ เมื่อเติมแกลบลงในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดในปริมาณ 10% wt.

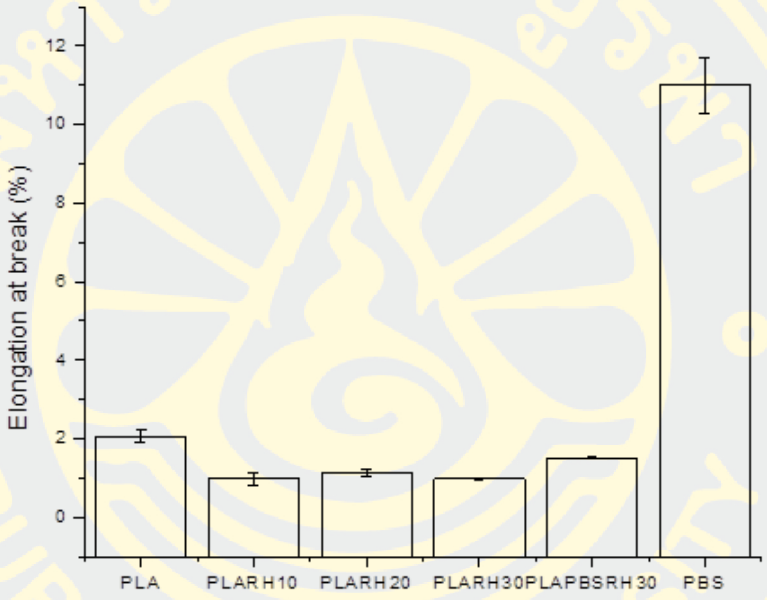
พบว่าไบโอคอมโพสิต PLARH10 มีมอดูลัสของแรงดึงลดลงเป็น 1924 MPa ซึ่งคิดเป็นการลดลงร้อยละ 19.7% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแกลบพบว่ามอดูลัสเพิ่มสูงขึ้นต่อเนื่อง โดยแกลบที่ 20% wt. และ 30% wt. พบว่า PLARH20 และ PLARH30 มีมอดูลัสของแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นเป็น 2202 MPa และ 2362 MPa ตามลำดับ ซึ่ง PLARH20 เพิ่มขึ้นร้อยละ 14.5% ของ PLARH10 และ PLARH30 เพิ่มขึ้นร้อยละ 7.3% ของ PLARH20 แต่หากเติมพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปในอัตราส่วนร้อยละ 40% จากน้ำหนักทั้งหมดของพลาสติกชีวภาพ พบว่าที่ปริมาณแกลบ 30% wt. PLAPBSRH30 มีค่ามอดูลัสของแรงดึงลดลงเป็น 1680 MPa ซึ่งคิดเป็นการลดลงร้อยละ 28.9% เมื่อเทียบกับ PLARH30



ภาพที่ 21 ผลการทดสอบค่ามอดูลัสของแรงดึงของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากแกลบ

การศึกษาค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงานทดสอบพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, PLARH10, PLARH20, PLARH30 และ PLAPBSRH30 ตามมาตรฐาน ASTM D638 – 02a ได้ผล ดังภาพที่ 22 พบว่าพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ2.06 % และ 11% ตามลำดับ เมื่อเติมแกลบลงในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดในปริมาณ 10% wt. พบว่าไบโอคอมโพสิต PLARH10 มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเป็น 0.99 % ซึ่งคิดเป็นการลดลงร้อยละ 51.9% แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแกลบ 20% wt. ในไบโอคอมโพสิต

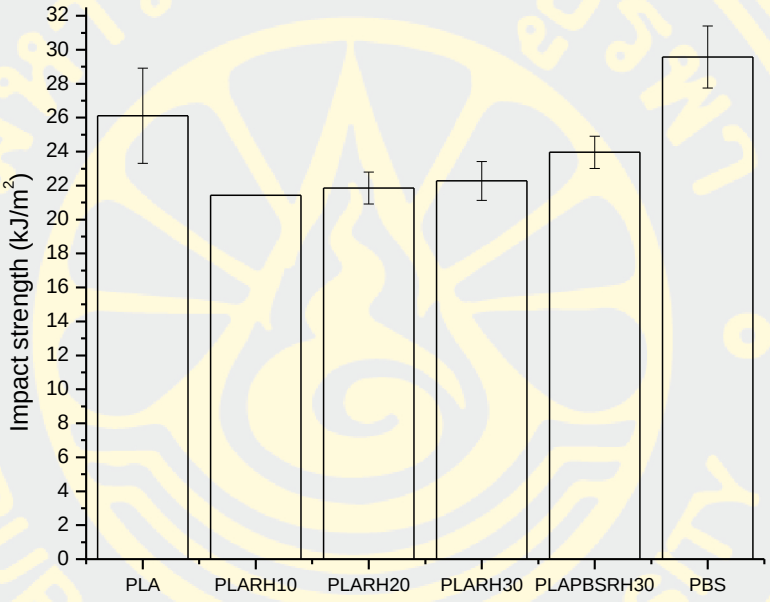
PLARH20 พบว่าค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเป็น 1.14% ซึ่งคิดเป็นการเพิ่มขึ้นร้อยละ 15.1% และเมื่อเพิ่มปริมาณแกลบที่ 30% wt. PLARH30 พบค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเป็น 0.97% ซึ่งคิดเป็นการลดลงร้อยละ 14.9% แต่หากเติมพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปในอัตราส่วนร้อยละ 40% จากน้ำหนักทั้งหมดของพลาสติกชีวภาพพบว่า PLAPBSRH30 มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มสูงขึ้นจาก PLARH30 เป็น 1.52% ซึ่งคิดเป็นการเพิ่มขึ้นร้อยละ 56.7% เมื่อเทียบกับ PLARH30



ภาพที่ 22 ผลการทดสอบค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากแกลบ

การศึกษาความแข็งแรงต่อแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบวัสดุพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, PLARH10, PLARH20, PLARH30 และ PLAPBSRH30 ตามมาตรฐาน ASTM D638 – 02a ได้ผลดังภาพที่ 23 พบว่าพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความแข็งแรงต่อแรงกระแทกเท่ากับ 26.1 และ 29.5 KJ/m^2 ตามลำดับ เมื่อเติมแกลบลงในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดที่ปริมาณ 10% wt. พบว่าไบโอคอมโพสิต PLARH10 มีความแข็งแรงต่อแรงกระแทกลดลงเป็น 21.4 KJ/m^2 ซึ่งคิดเป็นการลดลงร้อยละ 18% และยังพบอีกว่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณแกลบมากขึ้น ที่แกลบ 20% wt. และ 30% wt. PLARH20 และ PLARH30 พบความแข็งแรงต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเป็น 21.8 KJ/m^2 และ 22.8 KJ/m^2 ตามลำดับ ซึ่ง

PLARH20 คิดเป็นเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.8% ของ PLARH10 และ PLARH30 คิดเป็นเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.4% ของ PLARH20 แต่หากเติมพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปในอัตราส่วนร้อยละ 40% จากน้ำหนักทั้งหมดของพลาสติกชีวภาพพบว่า PLAPBSRH30 มีค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้นจาก PLARH30 เป็น 23.9 KJ/m^2 ซึ่งคิดเป็นการเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.6% เมื่อเทียบกับ PLARH30

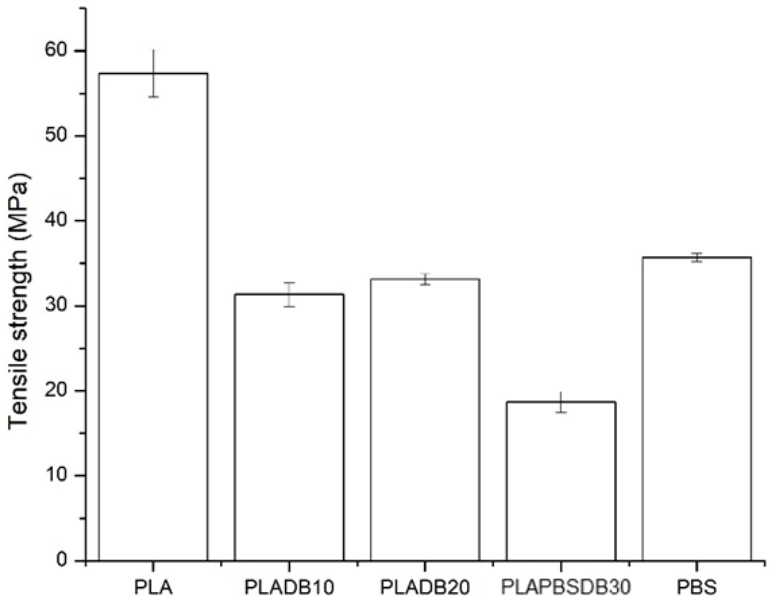


ภาพที่ 23 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากแกลบ

4.2.2 ผลการทดสอบผลสมบัติเชิงกลของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียน

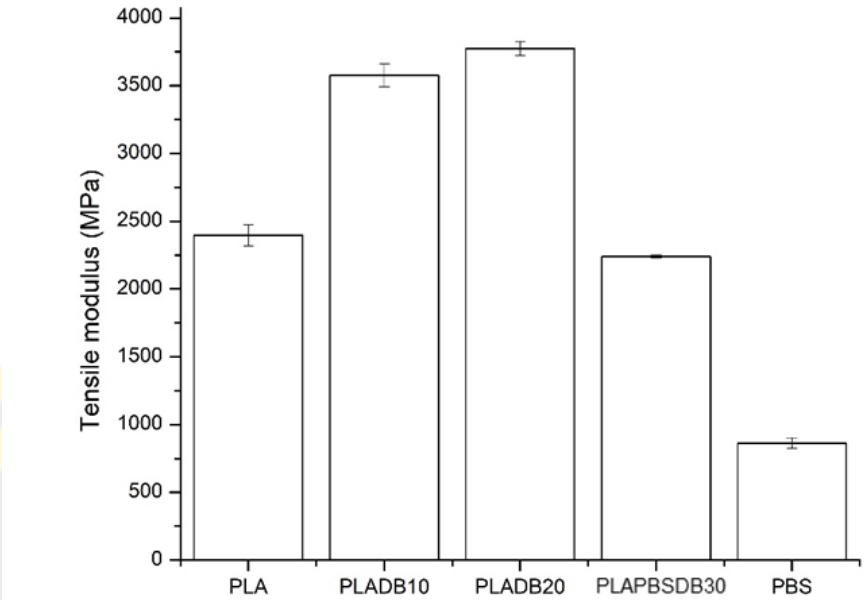
จากการศึกษาสมบัติเชิงกลความแข็งแรงต่อแรงดึงของชิ้นงานทดสอบวัสดุพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, PLADB10, PLADB20 และ PLAPBSDB30 ตามมาตรฐาน ASTM D638 – 02a ได้ผล ดังภาพที่ 24 พบว่าพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความแข็งแรงดึงเท่ากับ 57.3 และ 35.7 MPa ตามลำดับ เมื่อเติมเปลือกทุเรียนลงในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดในปริมาณ 10% wt. พบว่าไบโอคอมโพสิต PLADB10 มีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงเป็น 31.6 MPa ซึ่งคิดเป็นการลดลงร้อยละ 44.8% และเมื่อเพิ่มปริมาณเปลือกทุเรียนไปที่ 20% wt. พบว่า PLADB20 มีความ

แข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นเป็น 33.1 MPa ซึ่งคิดเป็นการเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.5% ของ PLADB10 แต่หากเติมพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปในอัตราส่วนร้อยละ 40% จากน้ำหนักทั้งหมดของพลาสติกชีวภาพ และปริมาณเปลือกทุเรียนเพิ่มขึ้นเป็น 30% wt. พบว่า PLAPBSDB30 มีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงเป็น 18.6 MPa



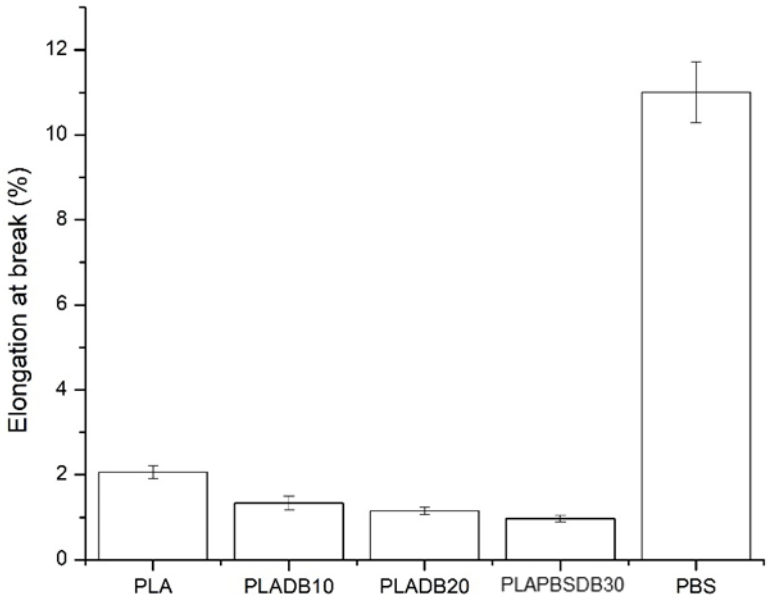
ภาพที่ 24 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากเปลือกทุเรียน

การศึกษาค่ามอดูลัสของแรงดึงของชิ้นงานทดสอบวัสดุพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, PLADB10, PLADB20 และ PLAPBSDB30 ตามมาตรฐาน ASTM D638 – 02a ได้ผลดังภาพที่ 25 พบว่าพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีมอดูลัสของแรงดึงเท่ากับ 2395 และ 862 MPa ตามลำดับ เมื่อเติมเปลือกทุเรียนลงในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดพบว่าค่ามอดูลัสของแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อปริมาณเปลือกทุเรียนเพิ่มขึ้นที่ 10% wt. พบว่าไบโอคอมโพสิต PLADB10 มีมอดูลัสของแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 3575 MPa ซึ่งคิดเป็นการเพิ่มร้อยละ 49% และเมื่อเพิ่มปริมาณเปลือกทุเรียนที่ 20% wt. พบว่า PLADB20 มีค่ามอดูลัสของแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นเป็น 3773 MPa ซึ่งคิดเป็นการเพิ่มร้อยละ 5.5% ของ PLADB10 แต่หากเติมพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปในอัตราส่วนร้อยละ 40% จากน้ำหนักทั้งหมดของพลาสติกชีวภาพ และปริมาณเปลือกทุเรียนเพิ่มขึ้นเป็น 30% wt. พบว่า PLAPBSDB30 มีค่ามอดูลัสของแรงดึงลดลงเป็น 2239 MPa



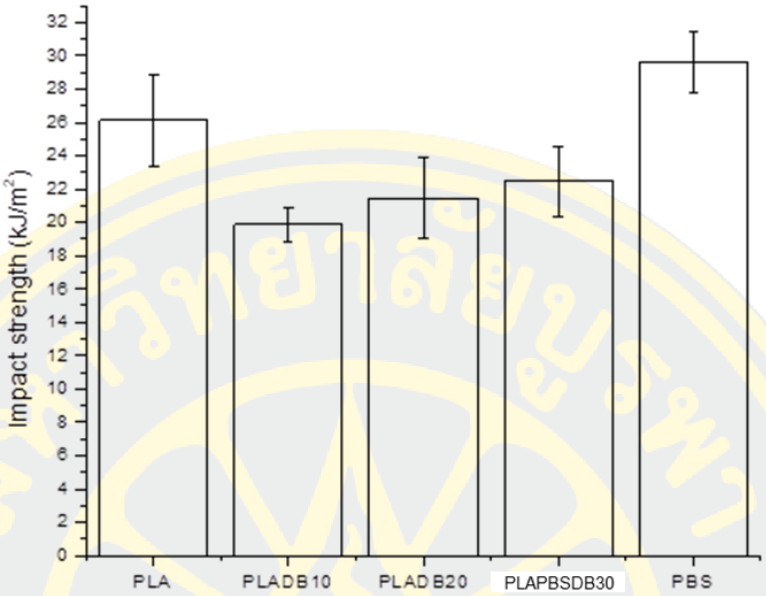
ภาพที่ 25 ผลการทดสอบค่ามอดูลัสของแรงดึงของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากเปลือกทุเรียน

การศึกษาค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, PLADB10, PLADB20 และ PLAPBSDB30 ตามมาตรฐาน ASTM D638 – 02a ได้ผลดังภาพที่ 26 พบว่า พลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ 2.06 และ 11 % ตามลำดับ เมื่อเติมเปลือกทุเรียนลงในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดในปริมาณ 10% wt. พบว่าไบโอคอมโพสิต PLADB10 มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเป็น 1.33% ซึ่งคิดเป็นการลดลงร้อยละ 35.4% และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดที่ปริมาณเปลือกทุเรียน 20% wt. พบว่า PLADB20 มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเป็น 1.15% ซึ่งคิดเป็นการลดลงร้อยละ 13.5% ของ PLADB10 แต่หากเติมพลาสติกชีวภาพพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปในอัตราส่วนร้อยละ 40% จากน้ำหนักทั้งหมดของพลาสติกชีวภาพ และเพิ่มเปลือกทุเรียน 30% wt. พบว่า PLAPBSDB30 มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเป็น 0.96%



ภาพที่ 26 ผลการทดสอบค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากเปลือกทุเรียน

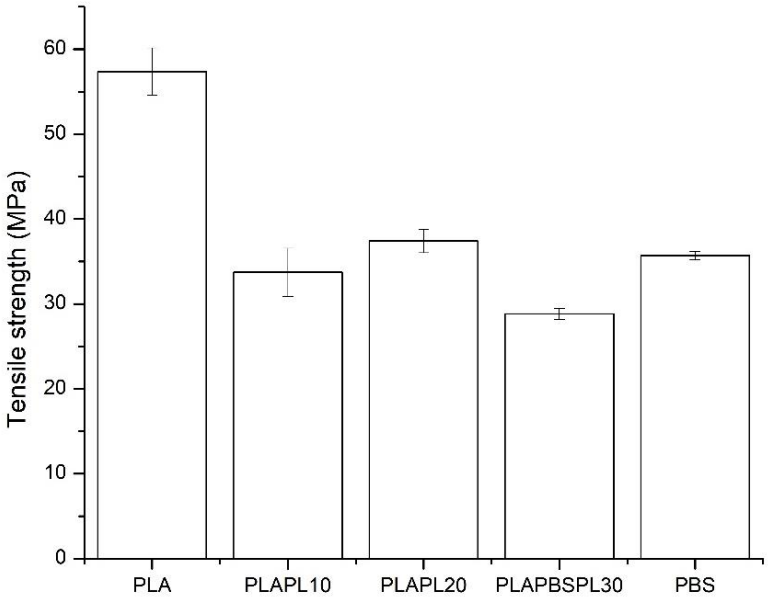
การศึกษาสมบัติเชิงกลความแข็งแรงต่อแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบวัสดุพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, PLADB10, PLADB20 และ PLAPBSDB30 ตามมาตรฐาน ASTM D638 – 02a ได้ผลดังภาพที่ 27 พบว่าพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความแข็งแรงต่อแรงกระแทกเท่ากับ 26.1 และ 29.5 KJ/m^2 ตามลำดับ เมื่อเติมเปลือกทุเรียนลงในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดในปริมาณ 10% wt. พบว่าไบโอคอมโพสิต PLADB10 มีความแข็งแรงต่อแรงกระแทกลดลงเป็น 19.8 KJ/m^2 ซึ่งคิดเป็นการลดลงร้อยละ 21.14% แต่กลับพบว่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเปลือกทุเรียนมากขึ้น โดยที่เปลือกทุเรียน 20% wt. พบว่า PLADB20 มีความแข็งแรงต่อแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้นเป็น 21.4 KJ/m^2 ซึ่งคิดเป็นการเพิ่มขึ้นอัตราร้อยละ 8.1% ของ PLADB10 แต่หากเติมพลาสติกชีวภาพพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปในอัตราส่วนร้อยละ 40% จากน้ำหนักทั้งหมดของพลาสติกชีวภาพ และเพิ่มปริมาณของเปลือกทุเรียนเป็น 30% wt. พบว่า PLAPBSDB30 มีค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้นเป็น 22.4 KJ/m^2



ภาพที่ 27 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากเปลือกทุเรียน

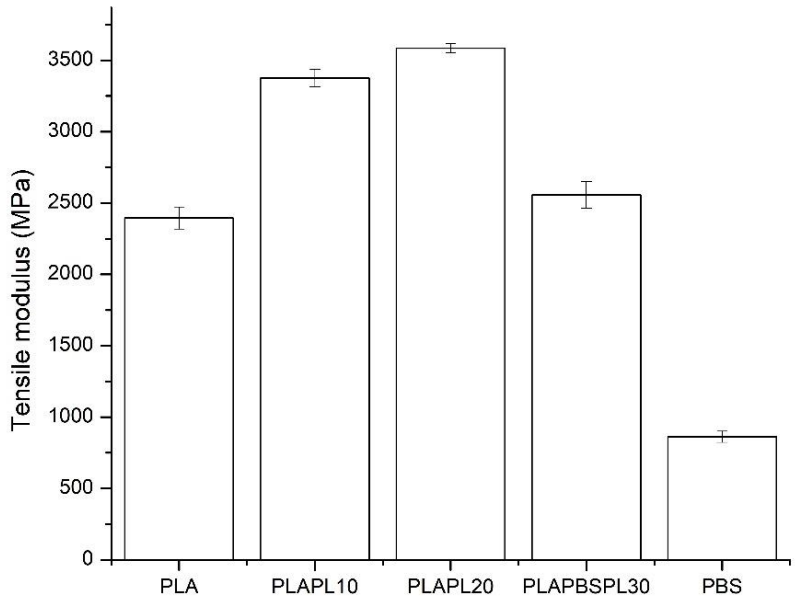
4.2.3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับใบสับปะรด

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลความแข็งแรงต่อแรงดึงของชิ้นงานทดสอบวัสดุพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, PLAPL10, PLAPL20 และ PLAPBSPL30 ตามมาตรฐาน ASTM D638 – 02a ได้ผลดังภาพที่ 28 พบว่าพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความแข็งแรงต่อแรงดึงเท่ากับ 57.3 และ 37.5 MPa ตามลำดับ เมื่อเติมใบสับปะรดลงในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดในปริมาณ 10% wt. พบว่าไบโอคอมโพสิต PLAPL10 มีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงเป็น 33.7 MPa ซึ่งคิดเป็นการลดลงร้อยละ 41.2% และเมื่อเพิ่มปริมาณใบสับปะรดไปที่ 20% wt. พบว่า PLAPL20 มีความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นเป็น 35.7 MPa ซึ่งคิดเป็นการเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.1% ของ PLAPL10 แต่หากเติมพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปในอัตราส่วนร้อยละ 40% จากน้ำหนักทั้งหมดของพลาสติกชีวภาพและปริมาณใบสับปะรดเพิ่มขึ้นเป็น 30% wt. พบว่า PLAPBSPL30 มีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง เป็น 28.8 MPa



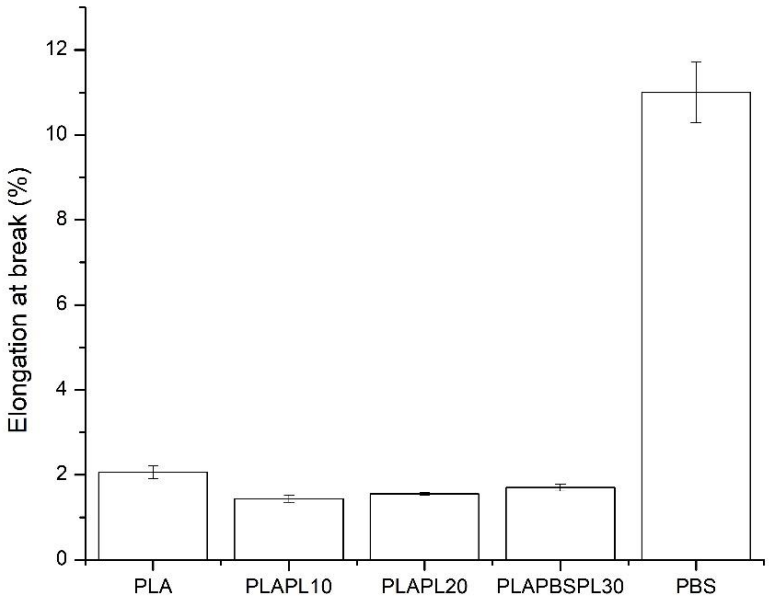
ภาพที่ 28 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากใบสับปะรด

การศึกษาสมบัติเชิงกลค่ามอดูลัสของแรงดึงของชิ้นงานทดสอบวัสดุพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, PLAPL10, PLAPL20 และ PLAPBSPL30 ตามมาตรฐาน ASTM D638 – 02a ได้ผลดังรูป 29 พบว่าพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีมอดูลัสของแรงดึงเท่ากับ 2395 และ 862 MPa ตามลำดับ เมื่อเติมใบสับปะรดลงในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดพบว่าค่ามอดูลัสของแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณใบสับปะรดเพิ่มขึ้น โดยที่ 10% wt. พบว่าไบโอคอมโพสิต PLAPL10 มีค่ามอดูลัสของแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 3376 MPa ซึ่งคิดเป็นการเพิ่มร้อยละ 49.2% และเมื่อเพิ่มปริมาณใบสับปะรดที่ 20% wt. พบว่า PLAPL20 พบค่ามอดูลัสของแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นเป็น 3583 MPa ซึ่งคิดเป็นการเพิ่มร้อยละ 5.5% ของ PLAPL10 แต่หากเติมพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปในอัตราส่วนร้อยละ 40% จากน้ำหนักทั้งหมดของพลาสติกชีวภาพ และปริมาณใบสับปะรดเพิ่มขึ้นเป็น 30% wt. พบว่า PLAPBSPL30 มีค่ามอดูลัสของแรงดึงลดลงเป็น 2557 MPa



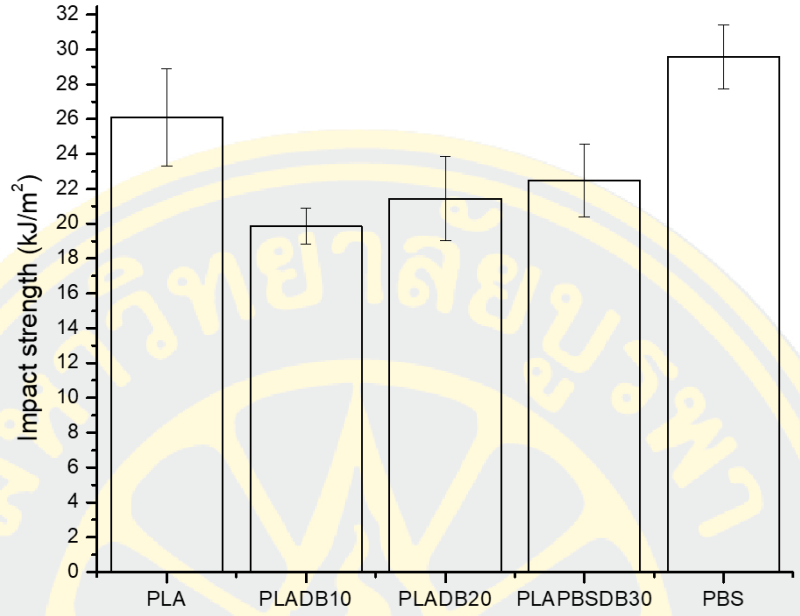
ภาพที่ 29 ผลการทดสอบค่ามอดูลัสของแรงดึงของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากใบสับปะรด

การศึกษาค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงานทดสอบวัสดุพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, PLAPL10, PLAPL20 และ PLAPBSPL30 ตามมาตรฐาน ASTM D638 – 02a ได้ผลดังภาพที่ 30 พบว่า พลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเท่ากับ 2.06 และ 11% ตามลำดับ เมื่อเติมใบสับปะรดลงในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดในปริมาณ 10% wt. พบว่าไบโอคอมโพสิต PLAPL10 มีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเป็น 1.43% ซึ่งคิดเป็นการลดลงร้อยละ 30.6% และยังพบอีกว่าค่าร้อยละการยืดตัว ณ เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณใบสับปะรดมากขึ้น ที่ 20% wt. พบว่า PLAPL20 ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเป็น 1.55% ซึ่งคิดเป็นการเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.4% ของ PLAPL10 แต่หากเติมพลาสติกชีวภาพพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปในอัตราส่วนร้อยละ 40% จากน้ำหนักทั้งหมดของพลาสติกชีวภาพพบว่า PLAPBSDB30 พบว่าค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มสูงขึ้นเป็น 1.7%



ภาพที่ 30 ผลการทดสอบค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากใบสับปะรด

การศึกษาสมบัติเชิงกลความแข็งแรงต่อแรงกระแทกของชิ้นงานทดสอบวัสดุพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, PLAPL10, PLAPL20 และ PLAPBSPL30 ตามมาตรฐาน ASTM D638 – 02a ได้ผลดังภาพที่ 31 พบว่าพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความแข็งแรงต่อแรงกระแทกเท่ากับ 26.1 และ 29.5 KJ/m^2 ตามลำดับ เมื่อเติมใบสับปะรดลงในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดในปริมาณ 10% wt. พบว่าไบโอคอมโพสิต PLAPL10 มีความแข็งแรงต่อแรงกระแทกลดลงเป็น 20 KJ/m^2 ซึ่งคิดเป็นการลดลงร้อยละ 23.4% และเมื่อเพิ่มปริมาณของใบสับปะรดที่ 20% wt. พบว่า PLAPL20 มีความแข็งแรงต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเป็น 21.9 KJ/m^2 ซึ่งคิดเป็นการเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.5% ของ PLAPL10 แต่หากเติมพลาสติกชีวภาพพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตลงไปในอัตราส่วนร้อยละ 40% จากน้ำหนักทั้งหมดของพลาสติกชีวภาพพบว่า PLAPBSDB30 มีค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกเพิ่มสูงขึ้นเป็น 23.1 KJ/m^2



ภาพที่ 31 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากใบสับปะรด

จากผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดกับวัสดุชีวมวลมีผลลัพธ์สอดคล้องกับผลวิจัยของ (Bisht, Gope, & Rani, 2020) ว่าการใช้วัสดุชีวมวลเป็นสารเติมแต่งในพลาสติกชีวภาพส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดในวัสดุไบโอคอมโพสิตลดลง เนื่องจากวัสดุชีวมวลมีลักษณะเป็น hydrophilic ที่มีความชอบน้ำผสมกับพอลิเมอร์แบบ hydrophobic ที่มีความไม่ชอบน้ำ จึงเกิดการผสมที่ไม่เข้ากันระหว่างพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดกับวัสดุชีวมวลทั้ง 3 ชนิด เป็นเหตุให้ไม่เกิดการยึดเกาะระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์กับวัสดุชีวมวล อีกทั้งไม่สามารถควบคุมขนาดอนุภาคของวัสดุชีวมวลให้มีขนาดเท่ากันได้จึงเกิดการกระจายตัวของวัสดุชีวมวลในพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ไม่ดีนัก และเมื่อมีแรงเค้นที่มากระทำจากภายนอกวัสดุชีวมวลจึงเป็นอุปสรรคต่อการกระจายแรงในส่วนของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Dimzoski et al., 2008)

ผลการลดลงของความแข็งแรงต่อแรงดึงในไบโอคอมโพสิตที่มีพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตผสมอยู่ เกิดจากพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความแข็งแรงต่อแรงดึงน้อยเป็นเหตุให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงเมื่อนำไปผสมกับพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดที่มีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่า อีกทั้งการผสมระหว่างพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดไม่สามารถผสมเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์จึงก่อให้เกิดการยึดเกาะ

ระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่ไม่ดี ส่งผลให้ไบโอคอมสิตคอมโพสิตสามารถ การกระจายแรงเค้นระหว่างเฟสของพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดได้ไม่ดี (Hongsriphan, Burirat, Niratsungnern, & Trongteng, 2013; Phasawat et al., 2014; Qiu, Song, & Zhao, 2016)

จากผลการทดสอบค่ามอดูลัสของแรงดึงลดลงมีสาเหตุจากการผสมที่ไม่เข้ากันระหว่างวัสดุชีวมวลที่เป็น hydrophilic มีความชอบน้ำสูง กับพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด ที่เป็น hydrophobic ที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งผลลัพธ์การลดลงของมอดูลัสเมื่อเติมวัสดุชีวมวลสอดคลองกับงานวิจัยของ Kumar และคณะ (2019) ส่วนการเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัสเมื่อปริมาณวัสดุชีวมวลเพิ่มมากขึ้น (Ashish Kumar, Tumu, Chowdhury, & SVS, 2019) เป็นเพราะวัสดุชีวมวลที่มีลักษณะแข็งถูกใช้เป็นสารเติมแต่งในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดที่มีลักษณะแข็งเปราะ กล่าวคือค่ามอดูลัสที่เพิ่มสูงขึ้นเป็นเพราะความแข็งของวัสดุชีวมวล (Dimzoski et al., 2008)

ผลการลดลงของค่ามอดูลัสของแรงดึงเมื่อเติมพลาสติกชีวภาพ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เกิดจากพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีโมดูลัสของแรงดึงน้อยเป็นเหตุให้โมดูลัสของแรงดึงลดลงเมื่อนำไปผสมกับพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และวัสดุชีวมวลที่มีความแข็งสูง ซึ่งมีค่าโมดูลัสของแรงดึงที่มากกว่า (Hongsriphan et al., 2013; Phasawat et al., 2014; Qiu et al., 2016)

จากผลการทดสอบค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดกับวัสดุชีวมวลมีผลลัพธ์สอดคล้องกับผลวิจัยของ Dimzoski และคณะ (2008) ว่าการใช้วัสดุชีวมวลเป็นสารเติมแต่งในพลาสติกชีวภาพส่งผลค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดในวัสดุไบโอคอมโพสิตลดลง เนื่องจากวัสดุชีวมวลมีลักษณะเป็น hydrophilic ที่มีความชอบน้ำผสมกับพอลิเมอร์แบบ hydrophobic ที่มีความไม่ชอบน้ำ จึงเกิดการผสมที่ไม่เข้ากันระหว่างพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดกับวัสดุชีวมวลเป็นเหตุให้ไม่เกิดการยึดเกาะระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์กับวัสดุชีวมวล อีกทั้งไม่สามารถควบคุมขนาดอนุภาคของวัสดุชีวมวลให้มีขนาดเท่ากันได้จึงเกิดการกระจายตัวของวัสดุชีวมวลในพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ไม่ดีนัก และเมื่อมีแรงเค้นที่มากระทำจากภายนอกจึงเป็นอุปสรรคต่อการกระจายแรงในส่วนของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (Dimzoski et al., 2008)

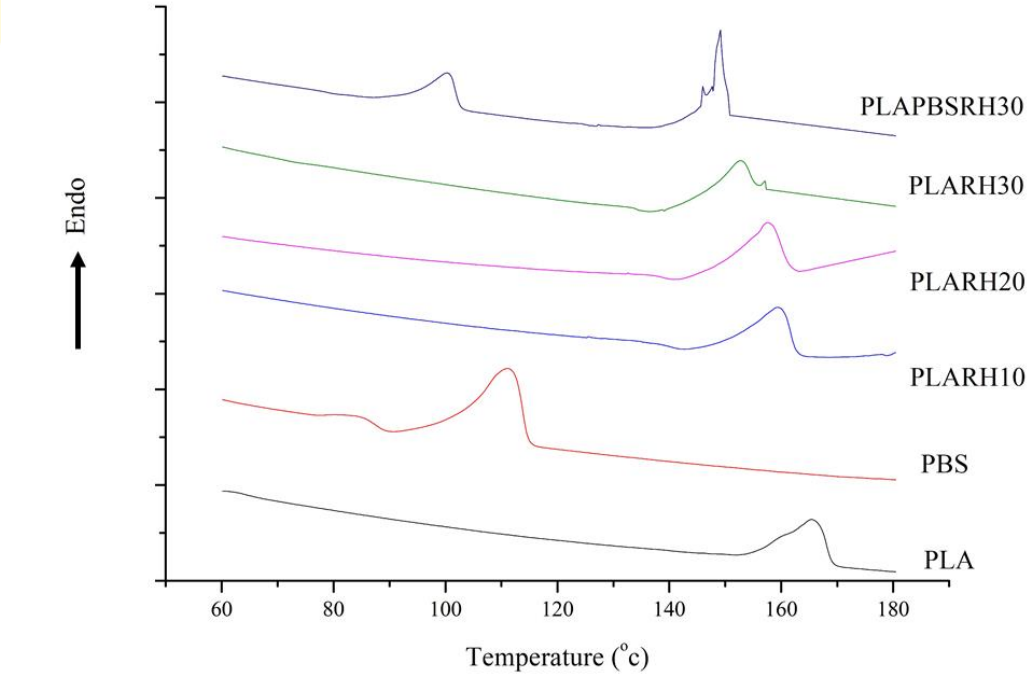
การเพิ่มขึ้นของค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดในไบโอคอมโพสิตเมื่อเติมพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เกิดจากพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความเหนียว และยืดหยุ่นสูงรองรับแรงเค้นจากการดึงได้ดี เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้สามารถปรับปรุงค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับวัสดุชีวมวลให้สูงขึ้นได้ (Hongsriphan et al., 2013; Phasawat et al., 2014; Qiu et al., 2016)

4.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของไบโอคอมโพสิต

จากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตพบว่าอุณหภูมิหลอมของพลาสติกชีวภาพทั้ง 2 ชนิด สอดคล้องกับผลการทดลองของนักวิจัยหลายท่าน โดยช่วงอุณหภูมิหลอมของพลาสติกชีวภาพ PLA อยู่ในช่วง 109-117 °C (Arjmandi, Hassan, Majeed, & Zakaria, 2015; Deng & Thomas, 2015; Jia, Gong, & Hogg, 2014; Ashish Kumar et al., 2019) และช่วงอุณหภูมิหลอมของพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอยู่ที่ในช่วง 154–171 °C (Deng & Thomas, 2015; Jia et al., 2014; Zhan et al., 2014)

4.3.1 สมบัติทางความร้อนของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ

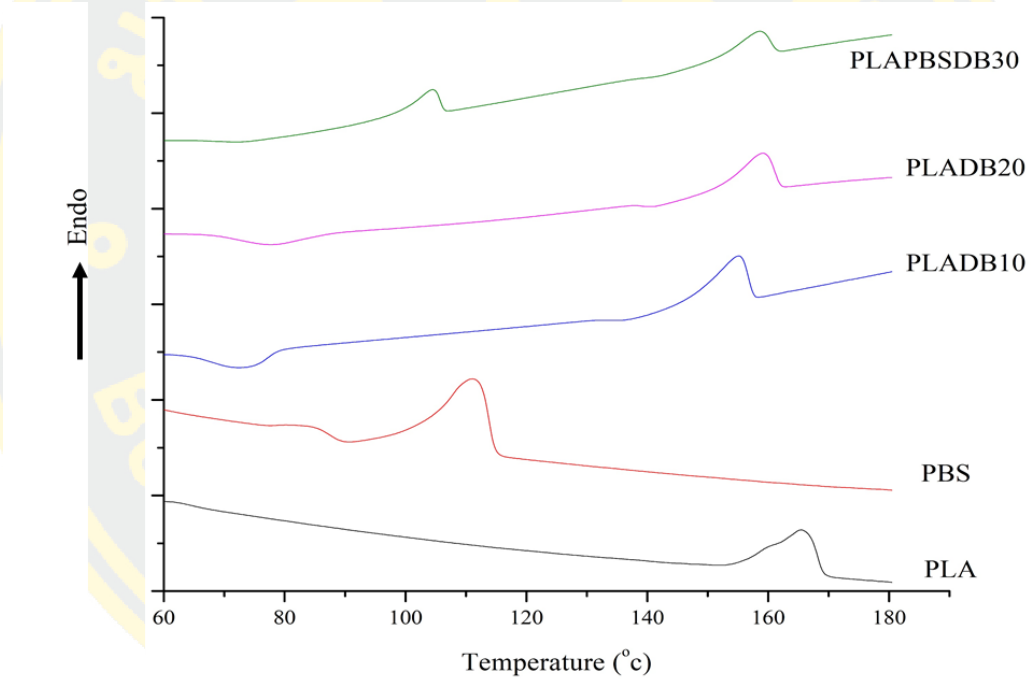
การทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบด้วยเทคนิค DSC ดังภาพที่ 32 พบว่าพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์แสดงอุณหภูมิหลอมที่ 165 °C, พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์แสดงอุณหภูมิหลอมที่ 111 °C, ไบโอคอมโพสิต PLARH10 แสดงอุณหภูมิหลอมที่ 159 °C, ไบโอคอมโพสิต PLARH20 แสดงอุณหภูมิหลอมที่ 157 °C, ไบโอคอมโพสิต PLARH30 แสดงอุณหภูมิหลอมที่ 152 °C และไบโอคอมโพสิต PLAPBSRH30 แสดงอุณหภูมิหลอม 2 จุดที่ 100 และ 149 °C



ภาพที่ 32 ผล DSC ของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ

4.3.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียน

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียนด้วยเทคนิค DSC ดังภาพที่ 33 พบว่าพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์แสดงอุณหภูมิหลอมที่ 165 °C, พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์แสดงอุณหภูมิหลอมที่ 111 °C, ไบโอคอมโพสิต PLADB10 แสดงอุณหภูมิหลอมที่ 155 °C, ไบโอคอมโพสิต PLADB20 แสดงอุณหภูมิหลอมที่ 160 °C, ไบโอคอมโพสิต และไบโอคอมโพสิต PLAPBSDB30 แสดงอุณหภูมิหลอม 2 จุด ที่ 108 และ 159 °C

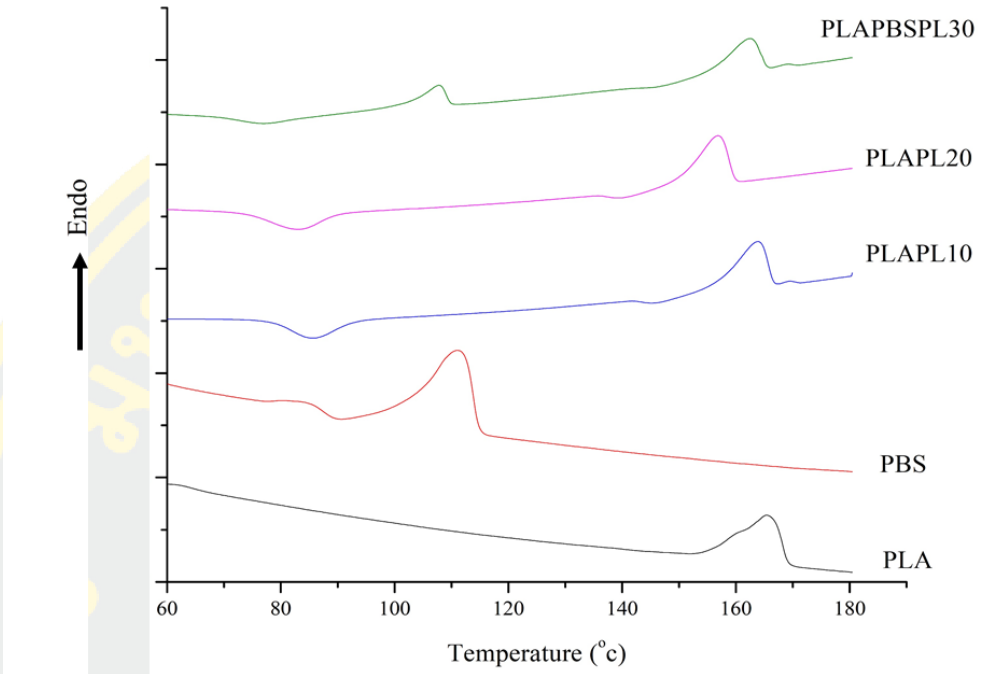


ภาพที่ 33 ผล DSC ของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียน

4.3.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับใบสับปะรด

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของวัสดุไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับใบสับปะรดด้วยเทคนิค DSC ดังภาพที่ 34 พบว่าพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์แสดงอุณหภูมิหลอมที่ 165 °C, พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์แสดงอุณหภูมิหลอมที่ 111 °C, ไบโอคอมโพสิต PLAPL10 แสดงอุณหภูมิหลอมที่ 164 °C, ไบโอคอมโพสิต PLAPL20 แสดงอุณหภูมิหลอม

ที่ 157 °C, ไบโอคอมโพสิต และไบโอคอมโพสิต PLAPBSPL30 แสดงอุณหภูมิหลอม 2 จุดที่ 108 และ 162 °C



ภาพที่ 34 ผล DSC ของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับใบสับปะรด

การใช้วัสดุชีวมวลเป็นสารเติมแต่งสำหรับการลดต้นทุนในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดส่งผลให้อุณหภูมิหลอมลดลง เป็นผลจากอนุภาคของวัสดุชีวมวลเข้าไปกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งเป็นการขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล ส่งผลรบกวนการเกิดผลึกของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดขณะกำลังแข็งตัวหลังผ่านกระบวนการผสมด้วยเครื่องหลอมอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Arjmandi et al., 2015; Deng & Thomas, 2015; Jia et al., 2014; Ashish Kumar et al., 2019) ในลักษณะเดียวกันนี้ไบโอคอมโพสิต PLAPBSRH30 ที่แสดงอุณหภูมิหลอม 2 ค่า ซึ่งเป็นอุณหภูมิของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดและพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต พบว่ามีอุณหภูมิหลอมทั้ง 2 ค่า ลดลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิหลอมของพลาสติกชีวภาพบริสุทธิ์ทั้ง 2 ชนิด นอกจากนี้ยังพบว่าอิทธิพลของการผสมที่ไม่สามารถเข้ากันอย่างสมบูรณ์ระหว่างพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดกับพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ส่งผลให้พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไปรบกวนการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดมากขึ้นเป็นสาเหตุที่ไบโอคอมโพสิต

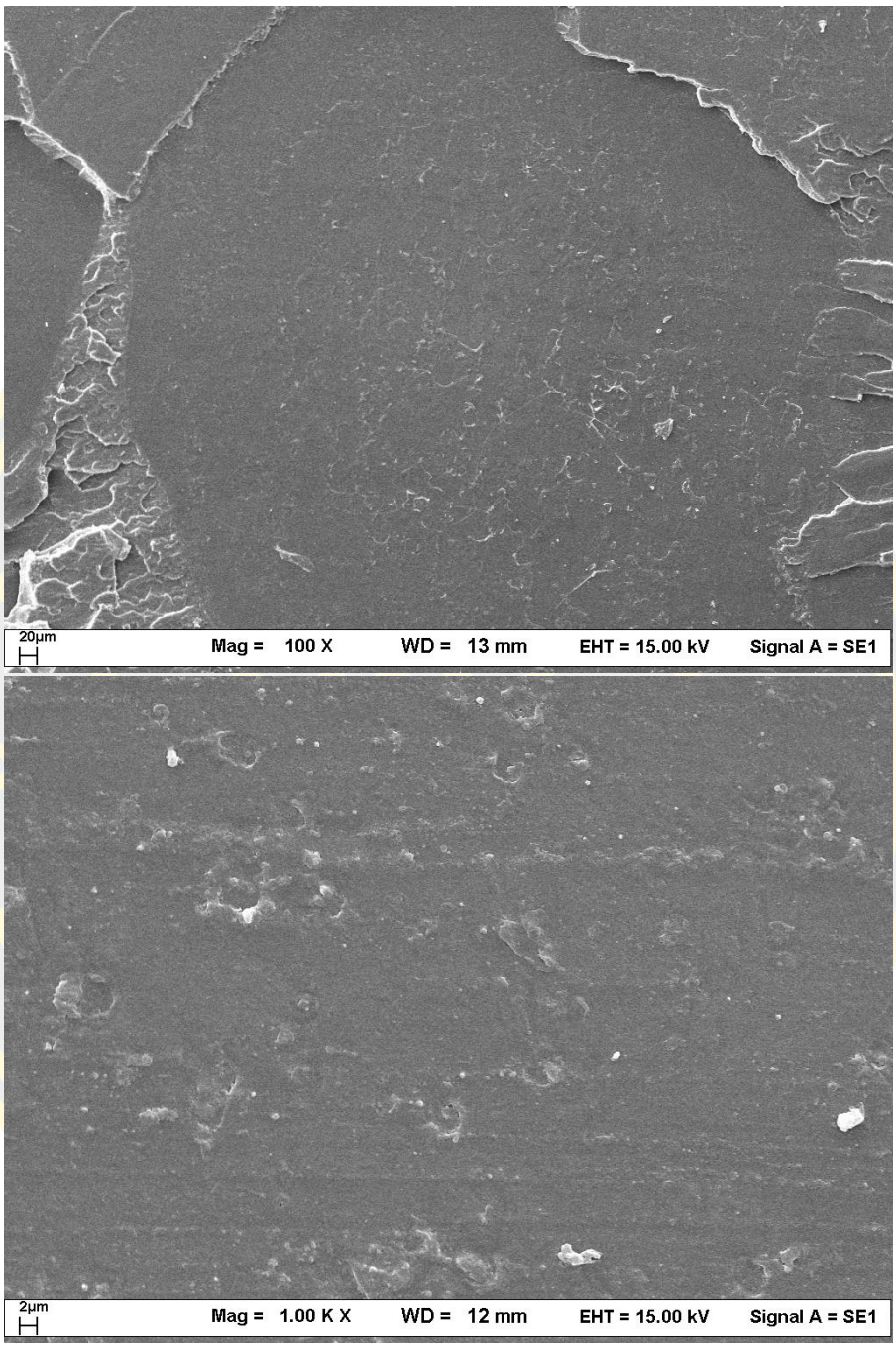
PLAPBSRH30 มีอุณหภูมิหลอมของพอลิแลคติกแอซิดลดลง และน้อยกว่าไบโอคอมโพสิต PLARH30 (Deng & Thomas, 2015; Jia et al., 2014; Zhan et al., 2014)

4.4 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา

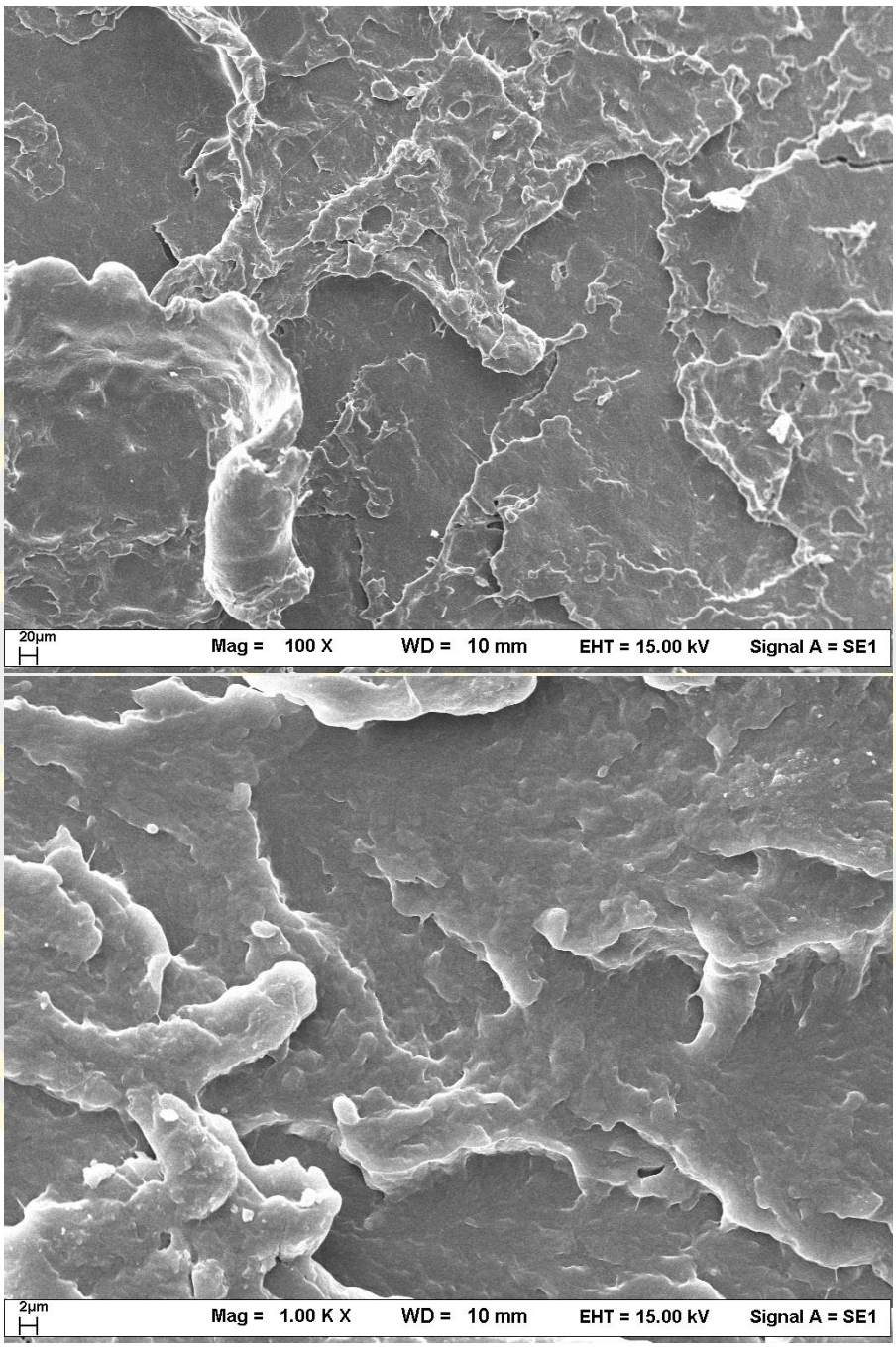
4.4.1 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

การศึกษาพื้นผิวบริเวณรอยแตกของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตของชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงด้วยเทคนิค SEM พบว่ารอยแตกของชิ้นงานทดสอบพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์มีลักษณะเป็นรอยแตกผิวเรียบเป็นเนื้อเดียวกันที่บริเวณรอยแตก ดังภาพที่ 35 และพลาสติกชีวภาพพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์พบรอยแตกในลักษณะถูกดึงยืดจนฉีกขาดที่บริเวณรอยแตกจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ ดังภาพที่ 36

การศึกษาพื้นผิวบริเวณรอยแตกของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดที่มีลักษณะผิวเรียบ ไม่พบรอยฉีกในลักษณะถูกดึงยืดออก เรียบเนียนเป็นเนื้อเดียวกัน จึงสามารถกล่าวได้ว่าพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดเป็นวัสดุที่มีความเปราะ (Sharma, Singh, Majumdar, & Butola, 2019) และจากที่พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตพบรอยแตกในลักษณะถูกดึงยืดจนฉีกขาด จึงสามารถกล่าวได้ว่าพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเป็นวัสดุที่มีความเหนียว (Hongsriphan et al., 2013)



ภาพที่ 35 ลักษณะผิวรอยแตกจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์



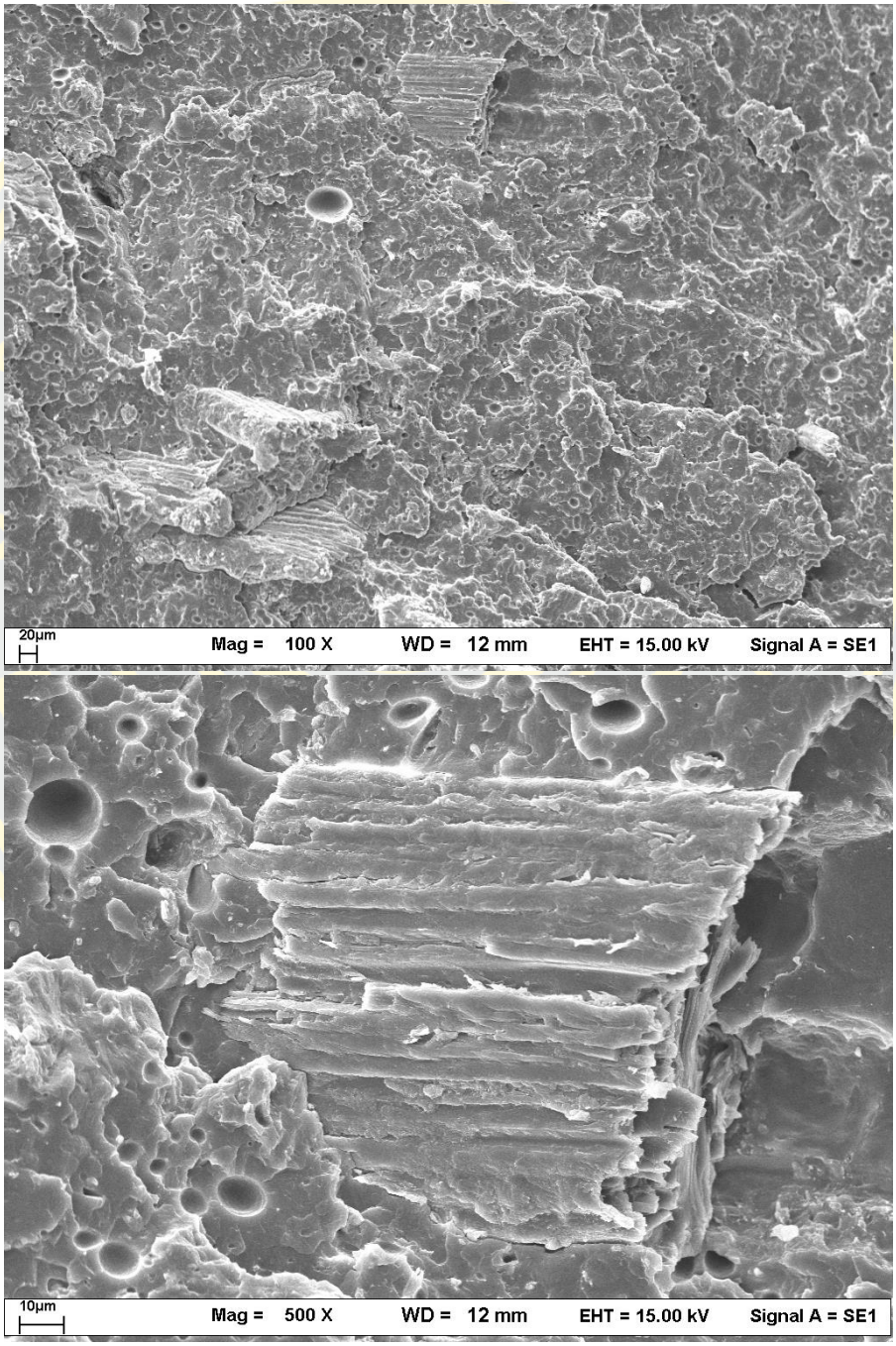
ภาพที่ 36 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์

4.4.2 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับวัสดุชีวมวล

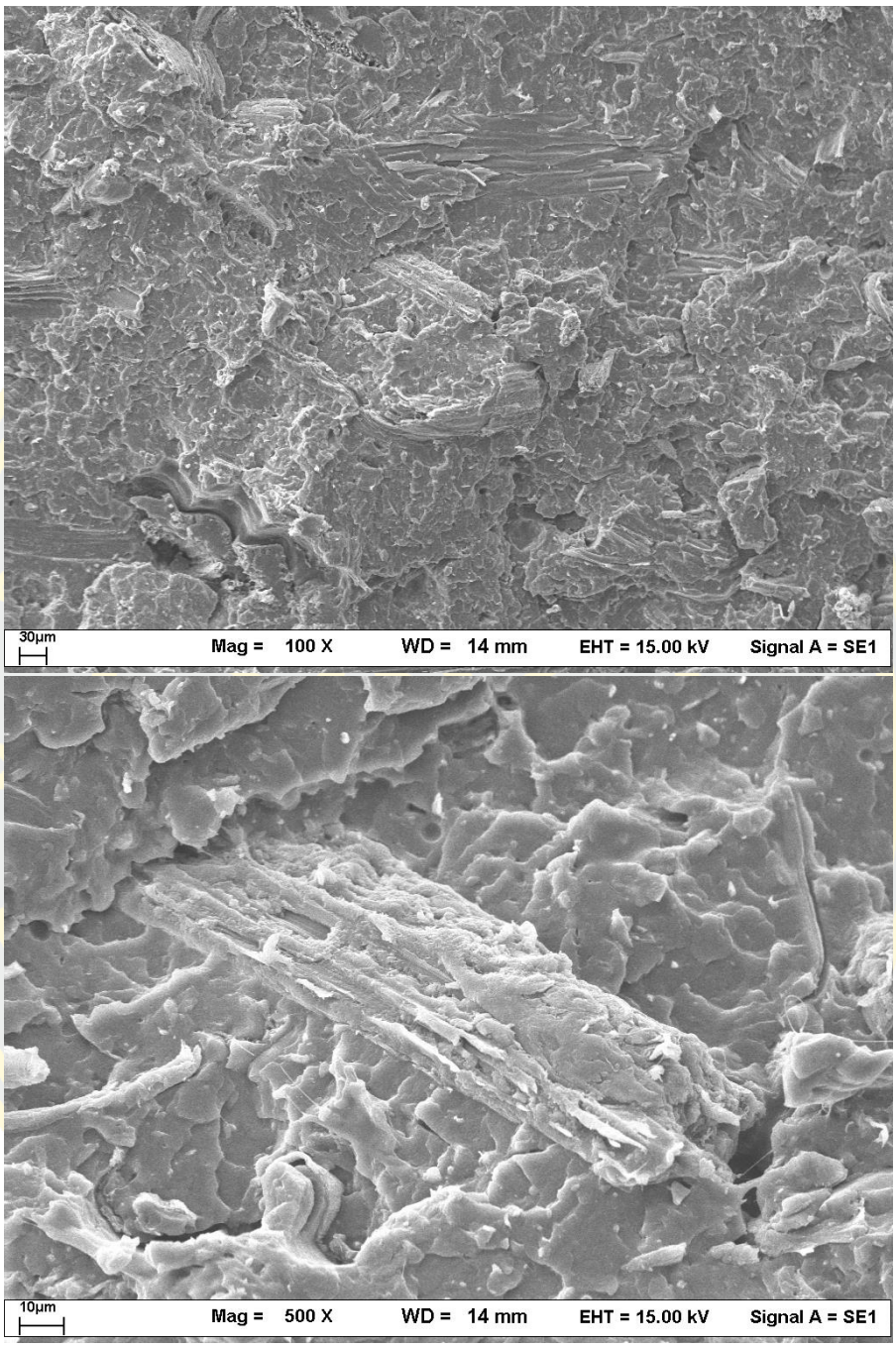
การศึกษาไบโอคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, พอลิบิวทิลันซัคซิเนต และวัสดุชีวมวลด้วยเทคนิค SEM พบว่าเมื่อเติมวัสดุชีวมวลที่ 10% wt. ไบโอคอมโพสิตที่มีการผสมของวัสดุชีวมวล 10% wt. มีการกระจายตัว และการยึดเกาะระหว่างพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดกับวัสดุชีวมวล ในขณะเดียวกันพบหลุม และรอยแตกระหว่างอนุภาคของวัสดุชีวมวลกับเมทริกซ์ของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งเป็นรอยแตกที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต อีกทั้งยังพบว่าการกระจายตัวของวัสดุชีวมวลสูงขึ้น, รอยแตกระหว่างอนุภาคของวัสดุชีวมวลในเมทริกซ์ของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณวัสดุชีวมวลเพิ่มสูงขึ้นที่ 20% wt. และ 30% wt. (เฉพาะในระบบของแกลบ) ตามลำดับ แต่เมื่อเติมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเข้าไปในวัสดุไบโอคอมโพสิตในอัตราส่วน 40% จากน้ำหนักของพลาสติกชีวภาพพบว่ารอยแตกที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง มีความคมลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับคอมโพสิตที่ได้จากพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดผสมอยู่เพียงชนิดเดียว ทั้งนี้ยังคงพบอีกว่ารอยแตกระหว่างวัสดุชีวมวลกับเมทริกซ์ของพลาสติกชีวภาพลดลง และการกระจายตัวของวัสดุชีวมวลดีขึ้น

ผิวขรุขระ และรอยแตกของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากการศึกษาพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดกับวัสดุชีวมวลแสดงให้เห็นว่าวัสดุไบโอคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นนี้เป็นการผสมที่ไม่สมบูรณ์เกิดการแยกเฟสระหว่างวัสดุชีวมวลกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลการยึดเกาะกันระหว่างวัสดุชีวมวลกับพลาสติกชีวภาพไม่ดี อย่างไรก็ตามการยึดเกาะระหว่างพลาสติกชีวภาพกับวัสดุชีวมวลสามารถปรับปรุงได้ด้วยการเติมสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Dimzoski et al., 2008; Lee et al., 2018; Yordem, Simanke, & Lesser, 2011) ที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างหมู่ OH ของเซลลูโลสกับหมู่ C-H_2 ของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด โดยพบรอยแตกระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับวัสดุชีวมวลเพียงเล็กน้อยในบางพื้นที่ ส่วนกรณีที่พบรอยแตกมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุชีวมวลในวัสดุไบโอคอมโพสิตสูงขึ้นแสดงให้เห็นถึงสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ 0.8% wt. ส่งผลต่อการยึดเกาะระหว่างพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดกับวัสดุชีวมวลในอัตราคงที่ อย่างไรก็ตามผลของการเติมพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตแสดงให้เห็นว่าสามารถลดความเปราะของวัสดุไบโอคอมโพสิตจากสมบัติเชิงกลด้านความเหนียวในเมทริกซ์ของพลาสติกชีวภาพ (Hongsriphan et al., 2013; Sharma et al., 2019) ทั้งนี้ตามการรายงานของ Liminana และคณะ (2018) ที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงต่อแรงดึง และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดด้วยการเติมสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในวัสดุคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับ

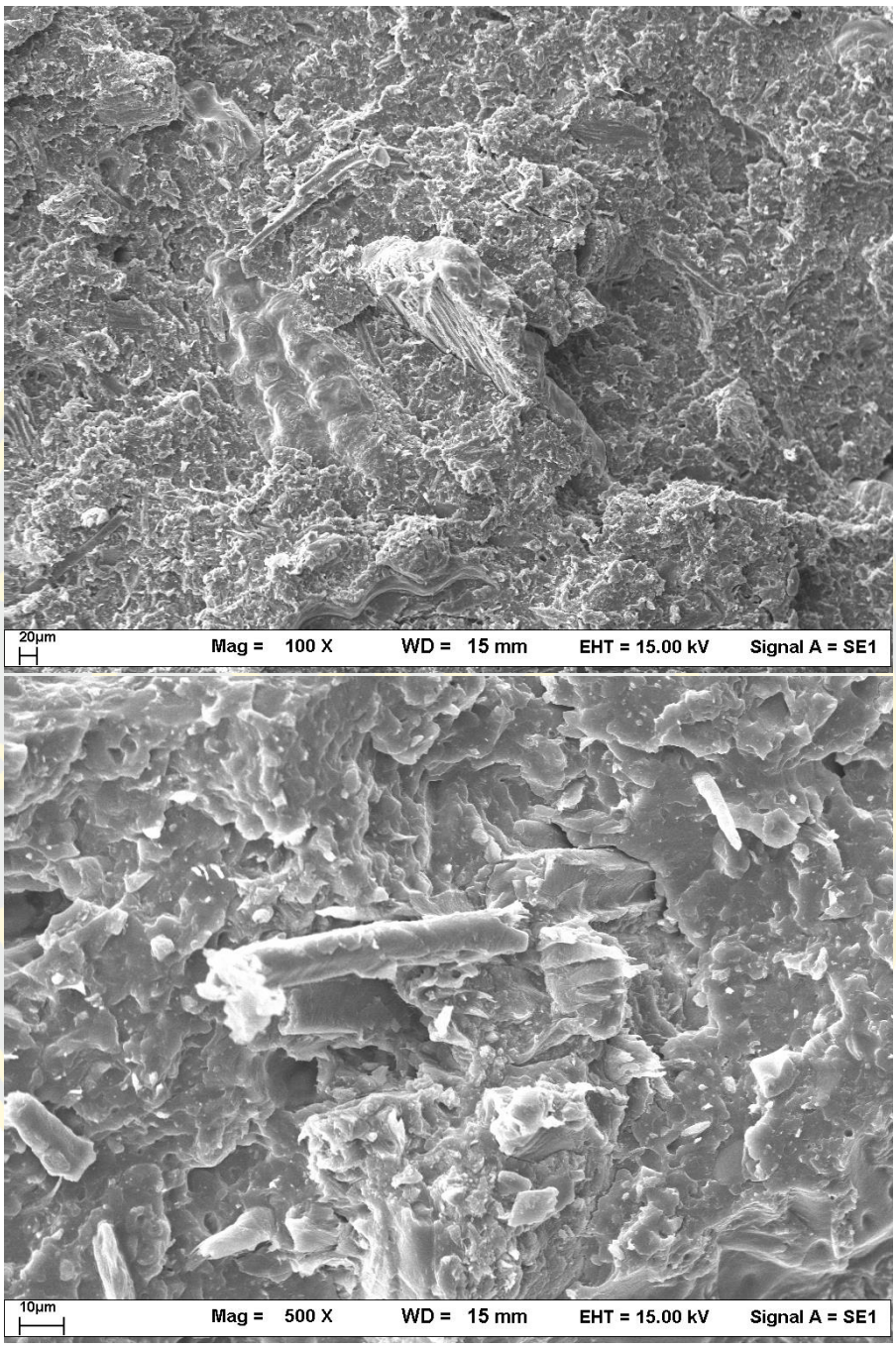
เปลือกอัลมอนด์ โดยเชื่อมประสานระหว่างหมู่ CH stretching ของพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับหมู่ OH ของเซลลูโลส (Liminana, Garcia-Sanoguera, Quiles-Carrillo, Balart, & Montanes, 2018; Phua, Chow, & Mohd Ishak, 2013)



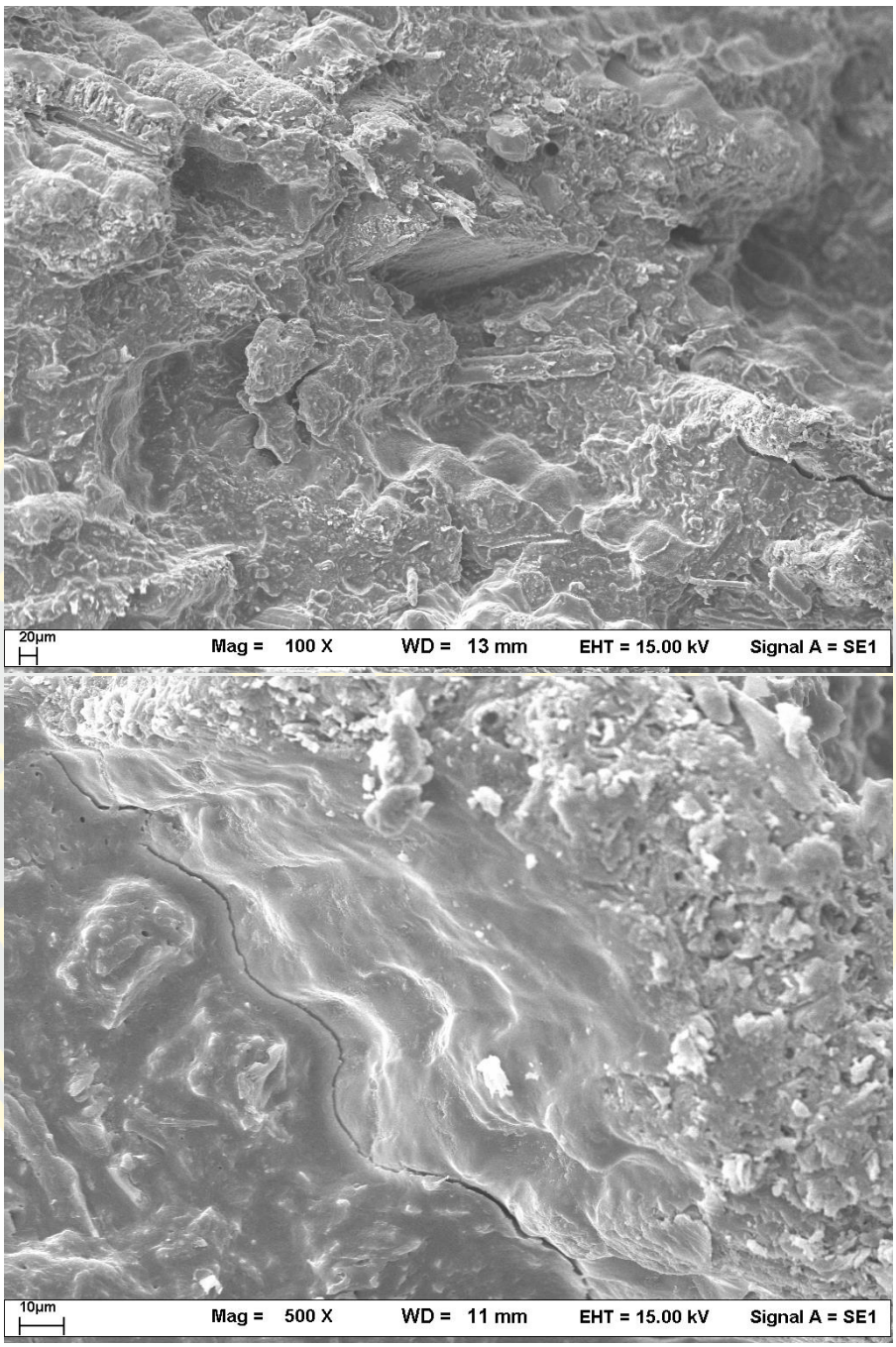
ภาพที่ 37 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLARH10



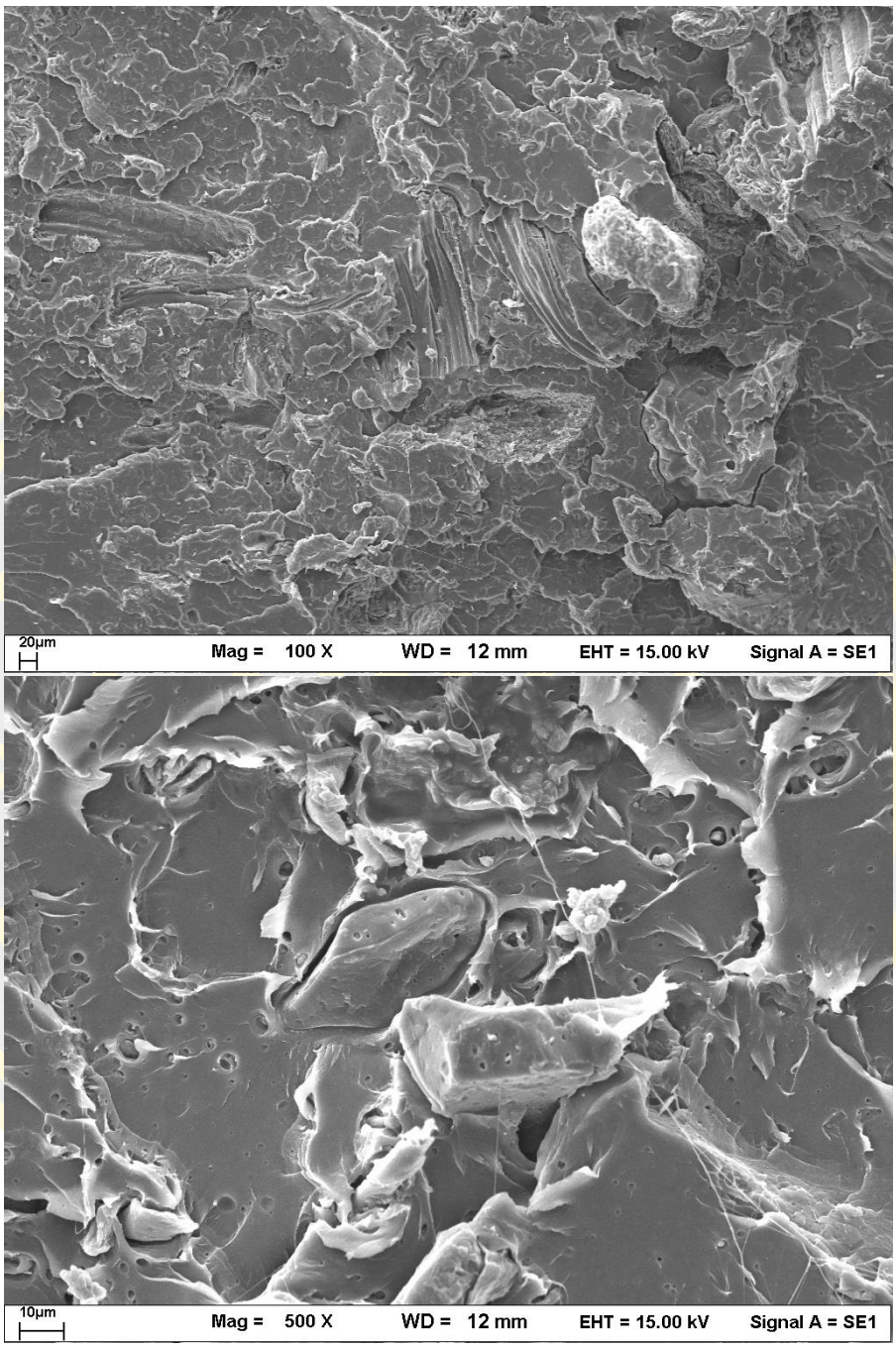
ภาพที่ 38 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLARH20



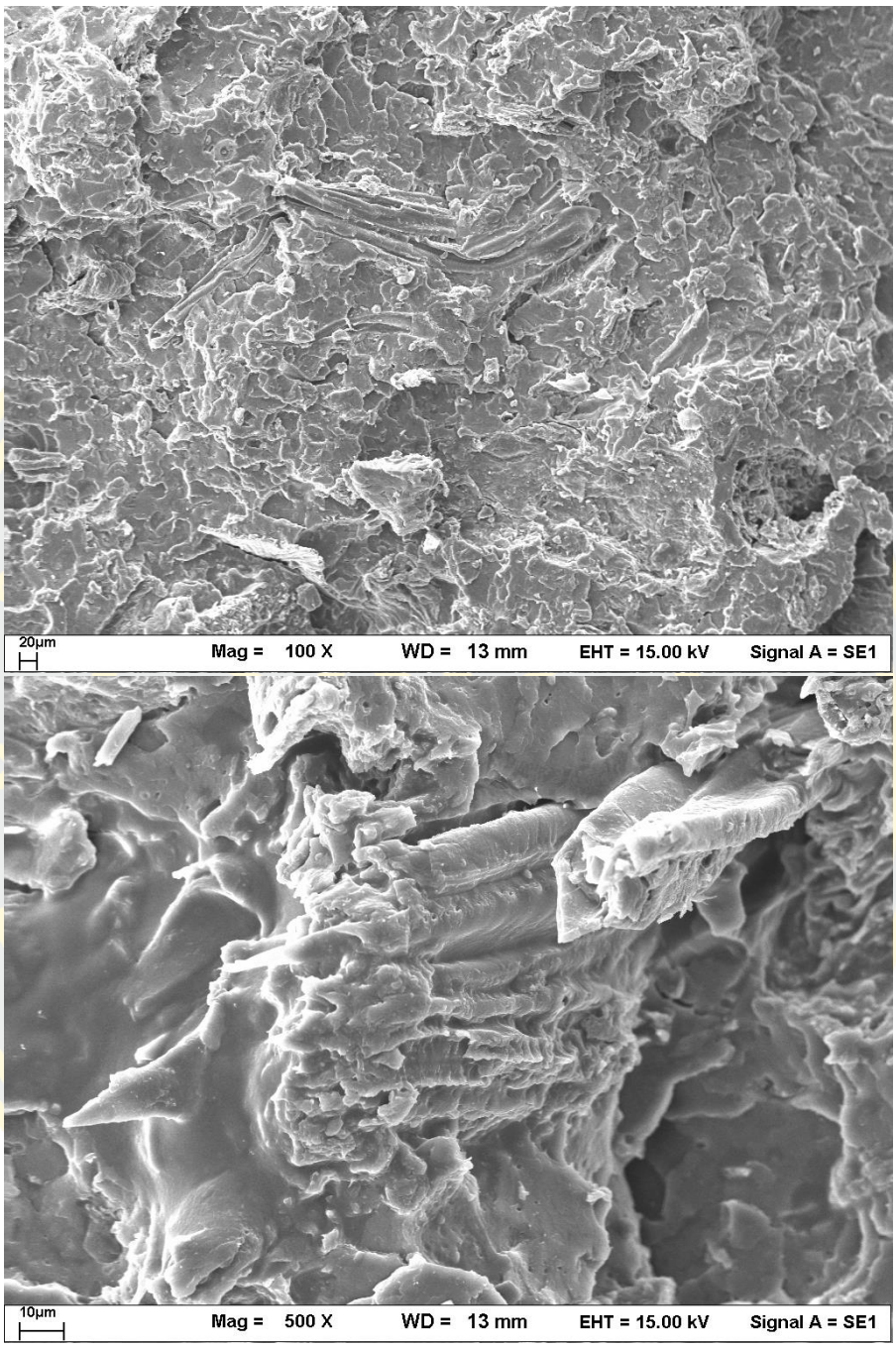
ภาพที่ 39 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLARH30



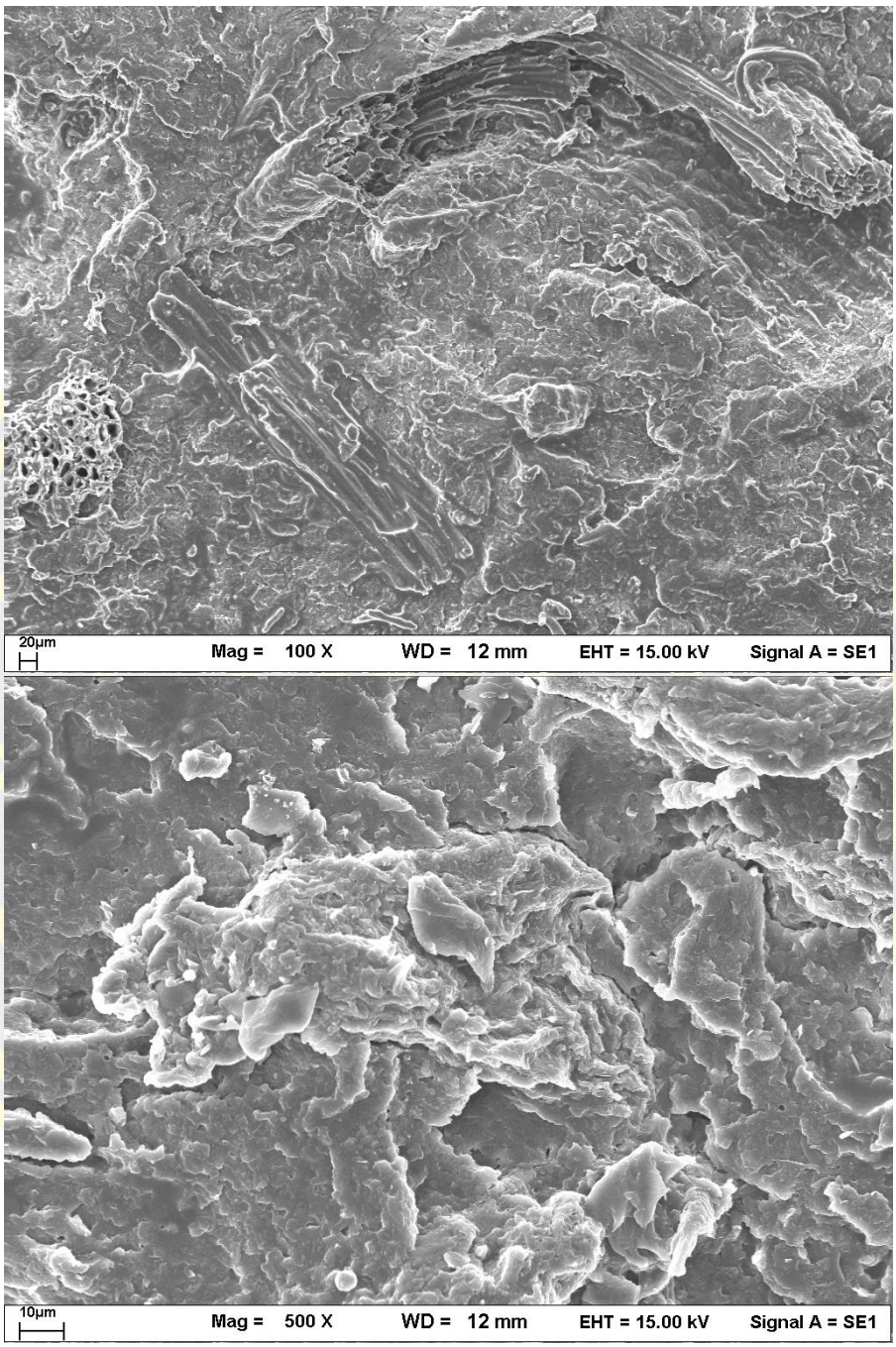
ภาพที่ 40 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLAPBSRH30



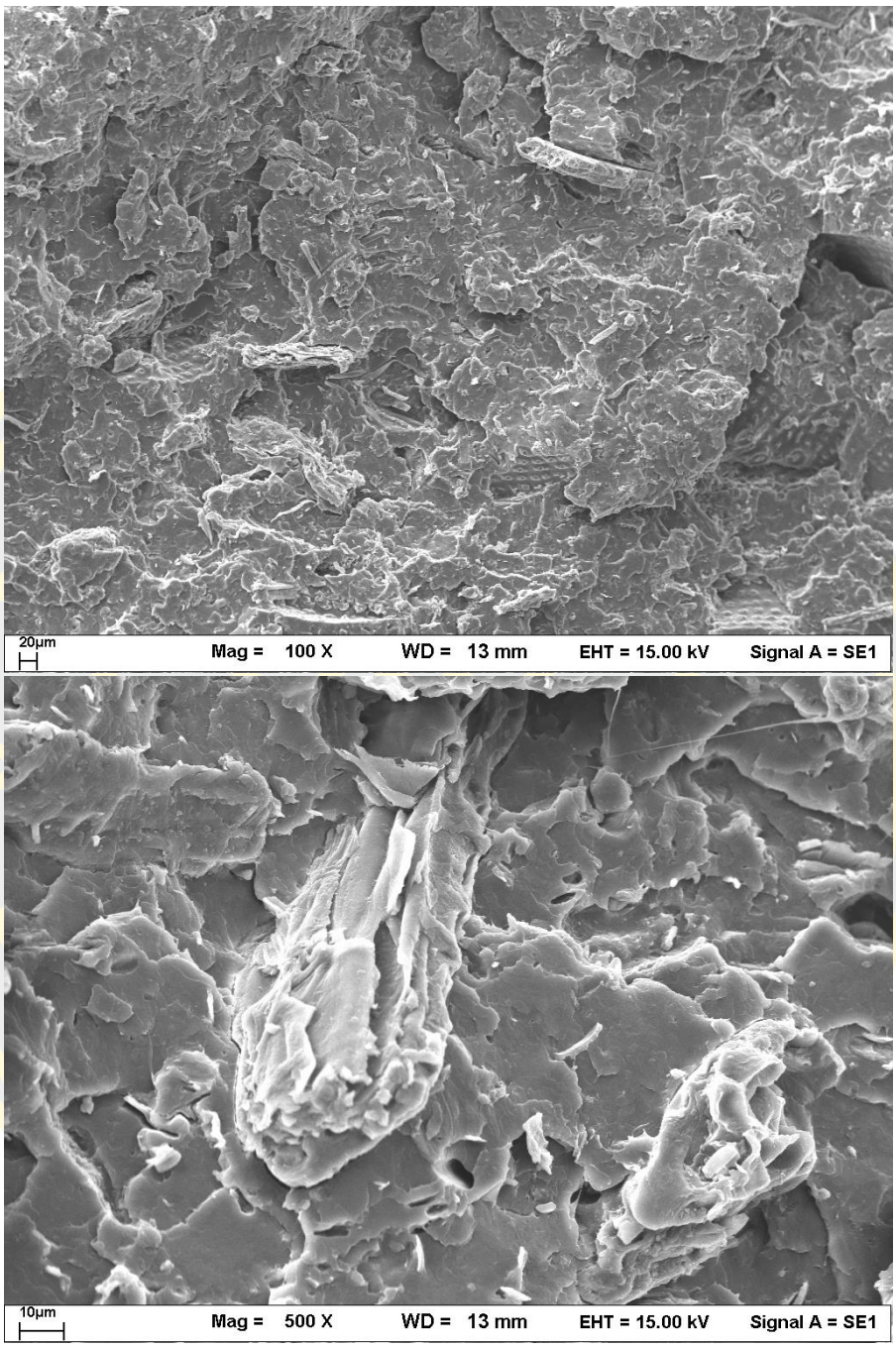
ภาพที่ 41 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLADB10



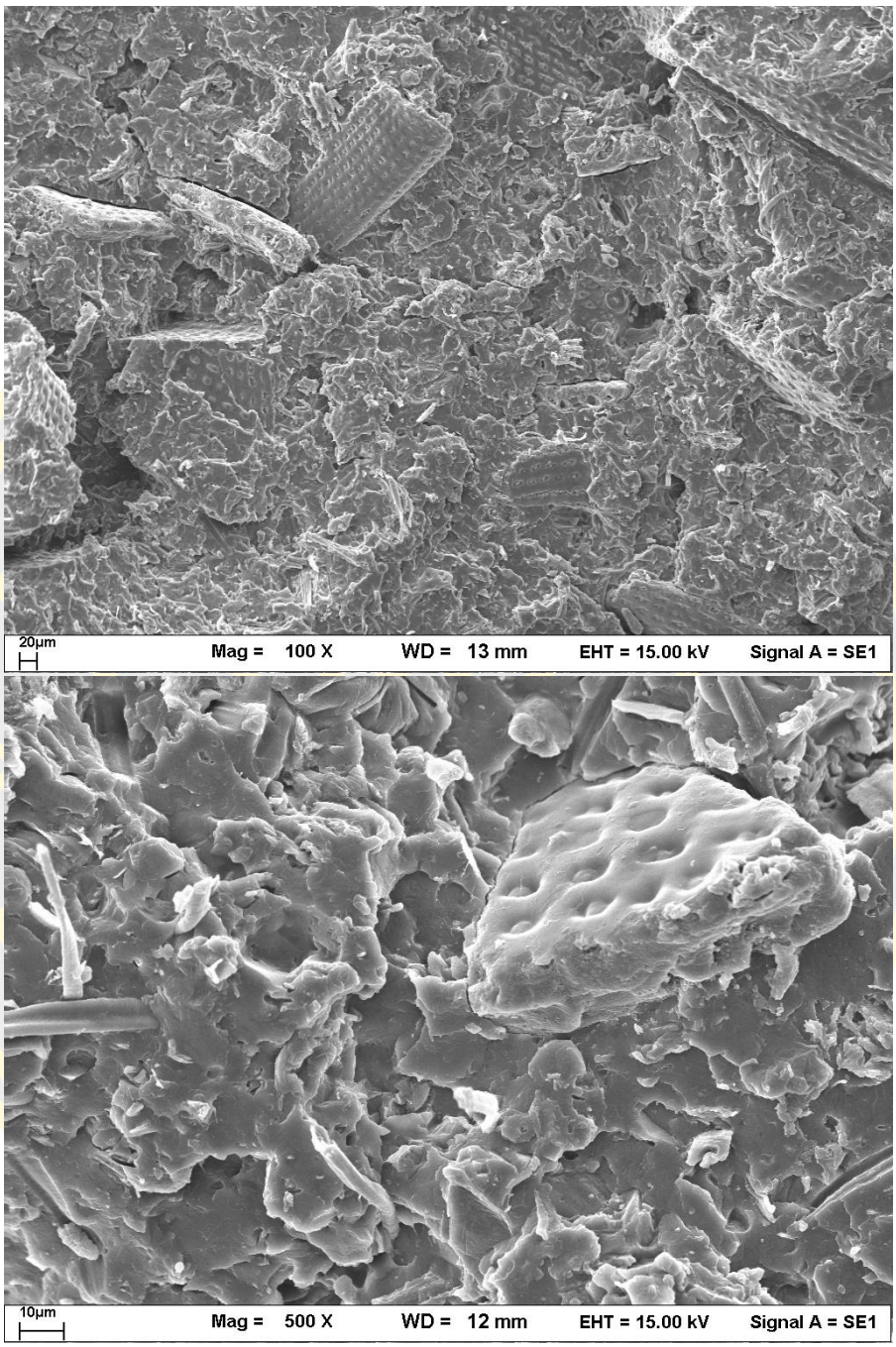
ภาพที่ 42 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLADB20



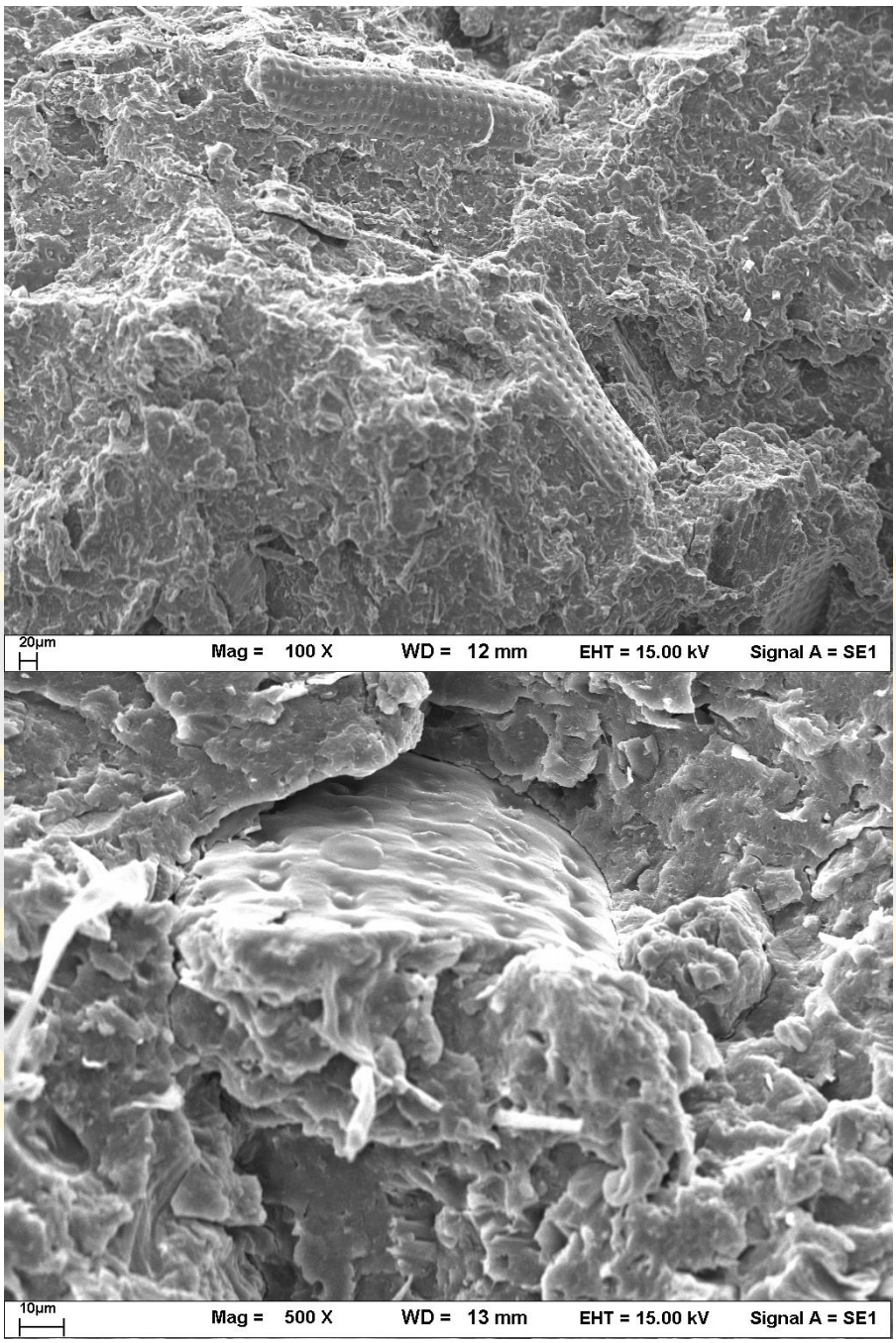
ภาพที่ 43 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLAPBSDB30



ภาพที่ 44 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLAPL10



ภาพที่ 45 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLAPL20



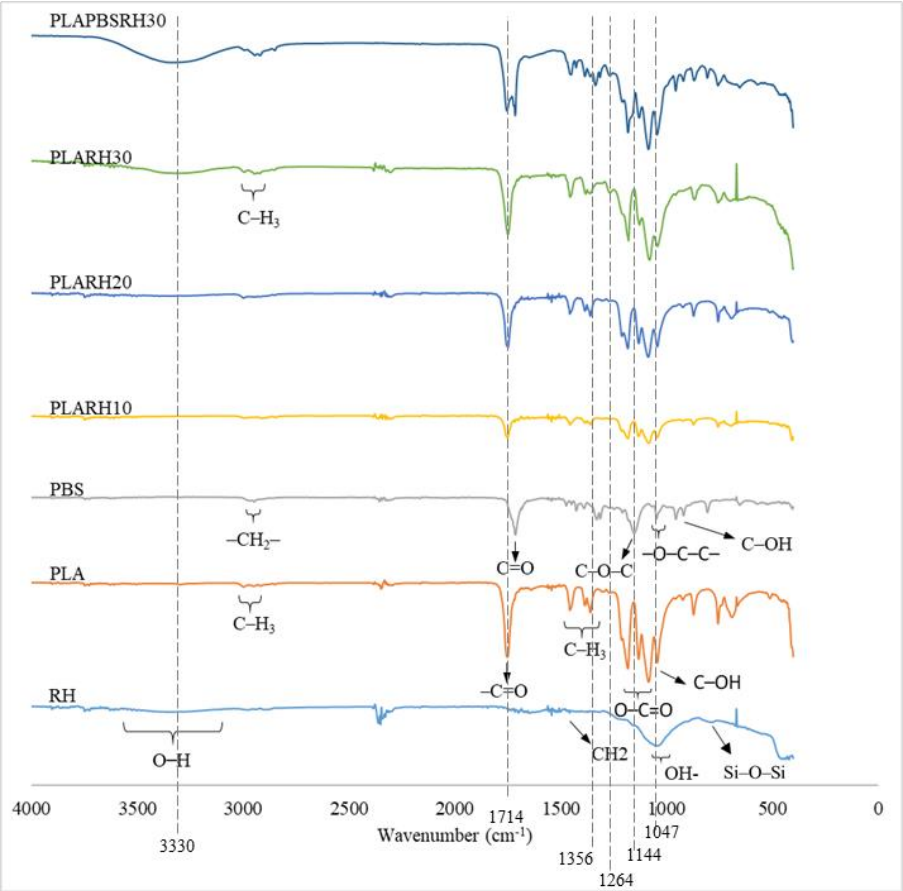
ภาพที่ 46 ลักษณะผิวแตกขาดจากการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิต PLAPBSPL30

4.5 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของพลาสติกชีวภาพ PLA บริสุทธิ์พบพีคที่ 2999 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ asymmetric stretching vibration of C–H from $–CH_3$, พีคที่ 1752 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ –C=O stretching of aliphatic ester, พีคที่ 1541 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ asymmetric and symmetric bending vibration of C–H from $–CH_3$, พีคที่ 1386 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ asymmetric and symmetric bending vibration of C–H from $–CH_3$, พีคที่ 1356 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ bending vibration of –CH , พีคที่ 1182 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ asymmetric and symmetric stretching of C–O–C, พีคที่ 1082 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ asymmetric and symmetric stretching of C–O–C และพีคที่ 1043 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ stretching of C–OH (Chaiwutthinan, Pimpan, Chuayjuljit, & Leejarkpai, 2015) และพลาสติกชีวภาพ PBS บริสุทธิ์พบพีคที่ 2947 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ asymmetric stretching vibrations of $–CH_2–$, พีคที่ 1714 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ C=O stretching vibrations of ester groups, พีคที่ 1330 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ symmetric stretching vibrations of $–CH_2–$ groups, พีคที่ 1150 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ stretching of the –C–O–C–, พีคที่ 1046 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ –O–C–C– stretching vibrations และพีคที่ 918 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ C–OH in carboxylic acid groups (Phua et al., 2013) ดังภาพที่ 47

4.5.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของแกลบพบพีคที่ 3330 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ stretching vibration of OH, พีคที่ 2947 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ C–H vibration, พีคที่ 2890 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ C–H vibration, พีคที่ 1047 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ C–OH stretching และพีคที่ 780 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ Si–O–Si stretching (Lazzari, Perondi, Zampieri, Zattera, & Santana, 2019) และผลวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของไบโอคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากแกลบ PLARH10, PLARH20, PLARH30 พบว่าพีคที่เกิดขึ้นเป็นหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดกับแกลบ ดังตารางที่ 7 อีกทั้งพบพีคที่ 1356 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C-H ของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพีคที่ 3330 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ OH และตำแหน่งพีคที่ 1047 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C-OH ของแกลบมีความเข้มลดลง แต่ความเข้มพีคที่ตำแหน่ง 3330 cm^{-1} เพิ่มสูงขึ้นต่อเนื่องเมื่อปริมาณแกลบสูงขึ้น ไบโอคอมโพสิต PLAPBSRH30 พบว่าพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในช่วงพีคที่ 1144-1264 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ –C–O–C– และความเข้มพีคที่ 1714 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C=O และ 3330 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ OH ของวัสดุชีวมวลมีความเข้มลดลง (Liminana et al., 2018; Phua et al., 2013)



ภาพที่ 47 อินฟาเรดสเปกตรัมของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ

ตารางที่ 7 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิตจากพอลิแลคติกแอซิดกับแกลบ

พีค (cm^{-1})			หมู่ฟังก์ชันทางเคมี
PLARH10	PLARH20	PLARH30	
1043	1043	1043	stretching of C–OH
1082	1082	1082	asymmetric and symmetric stretching of C–O–C
1182	1182	1182	asymmetric and symmetric stretching of C–O–C
1356	1356	1356	bending vibration of –CH
1386	1386	1386	asymmetric and symmetric bending vibration of C–H from $–CH_3$

ตารางที่ 7 (ต่อ)

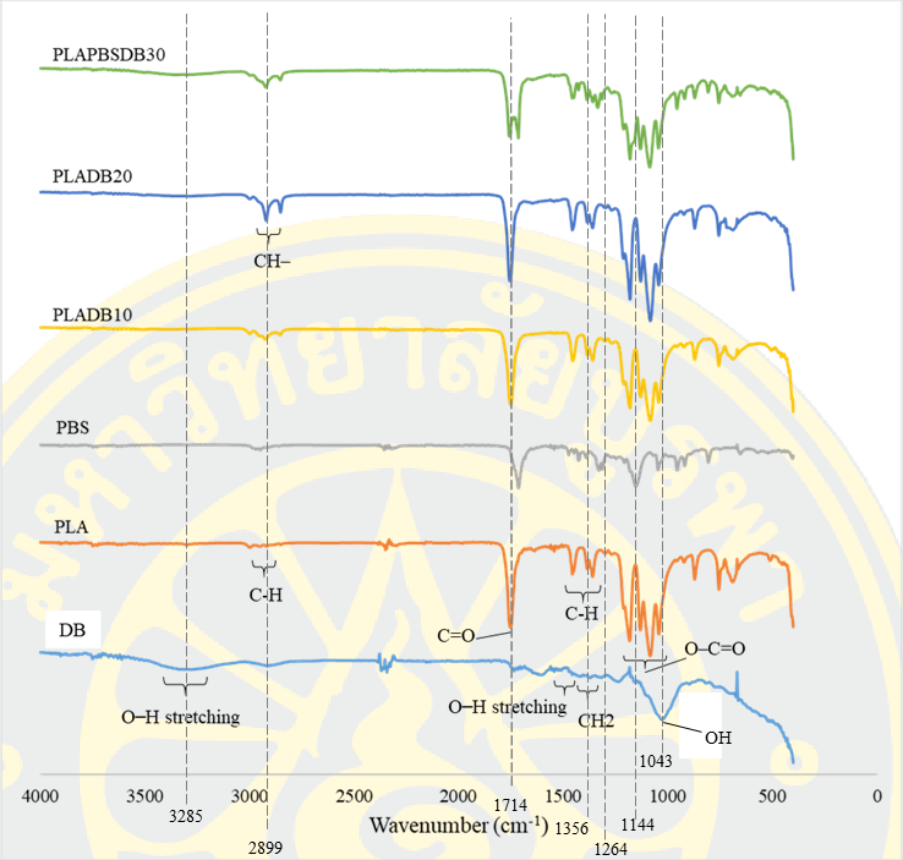
พีค (cm^{-1})			หมู่ฟังก์ชันทางเคมี
PLARH10	PLARH20	PLARH30	
1454	1454	1454	asymmetric and symmetric bending vibration of C–H from $–CH_3$
1752	1752	1752	–C=O stretching of aliphatic ester
-	2999	2999	–C=O stretching of aliphatic ester
-	3330	3330	stretching vibration of OH

ตารางที่ 8 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิตจากพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับแกลบ

พีค (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชันทางเคมี
PLAPBSRH30	
918	C–OH in carboxylic acid groups
1043	stretching of C–OH
1082	asymmetric and symmetric stretching of C–O–C
1150	stretching of the –C–O–C–
1182	asymmetric and symmetric stretching of C–O–C
1330	symmetric stretching vibrations of –CH2– groups
1356	bending vibration of –CH
1386	asymmetric and symmetric bending vibration of C–H from $–CH_3$
1454	asymmetric and symmetric bending vibration of C–H from $–CH_3$
1714	C=O stretching vibrations of ester groups
1752	–C=O stretching of aliphatic ester
2947	C–H vibration
2999	–C=O stretching of aliphatic ester
3330	stretching vibration of OH

4.5.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียน

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของเปลือกทุเรียนแสดงพีคที่ 3285 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ stretching vibration of OH, พีคที่ 2899 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ C–H vibration, พีคที่ 1607 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ C=O, พีคที่ 1447 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ C–O, พีคที่ 1024 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ C–OH stretching (Thuong et al., 2019) และผลวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของไบโอคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากเปลือกทุเรียน PLADB10 และ PLADB20 พบว่าพีคที่เกิดขึ้นเป็นหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดกับเปลือกทุเรียน ดังตารางที่ 9 อีกทั้งพบความเข้มของพีคที่ 1359 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพีคที่ 3285 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของเปลือกทุเรียนลดลง และยังพบอีกว่าพีคที่ 3285 cm^{-1} เข้มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณเปลือกทุเรียนเพิ่มสูงขึ้น ดังภาพที่ 48 (González-López, Robledo-Ortíz, Manríquez-González, Silva-Guzmán, & Pérez-Fonseca, 2018; González-López et al., 2019; Kaewpirom & Worrarat, 2014; Khan, Khan, Asiri, & Alamry, 2015) ไบโอคอมโพสิต PLAPBSRH30 พบว่าพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในช่วงพีคที่ 1144-1264 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ –C–O–C– และความเข้มพีคที่ 1714 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C=O และพีคที่ 3330 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ OH ของวัสดุชีวมวลมีความเข้มลดลง (Liminana et al., 2018; Phua et al., 2013)



ภาพที่ 48 อินฟาเรดสเปกตรัมของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับเปลือกทุเรียน

ตารางที่ 9 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิตจากพอลิแลคติกแอซิด กับเปลือกทุเรียน

พีค (cm^{-1})		หมู่ฟังก์ชันทางเคมี
PLADB10	PLADB20	
1042	1042	stretching of C–OH
1083	1083	asymmetric and symmetric stretching of C–O–C
1180	1180	asymmetric and symmetric stretching of C–O–C
1359	1359	bending vibration of –CH
1382	1382	asymmetric and symmetric bending vibration of C–H from –CH3
1454	1454	asymmetric and symmetric bending vibration of C–H from –CH3
1751	1752	–C=O stretching of aliphatic ester
-	2999	asymmetric stretching vibration of C–H from –CH3
-	3285	stretching vibration of OH

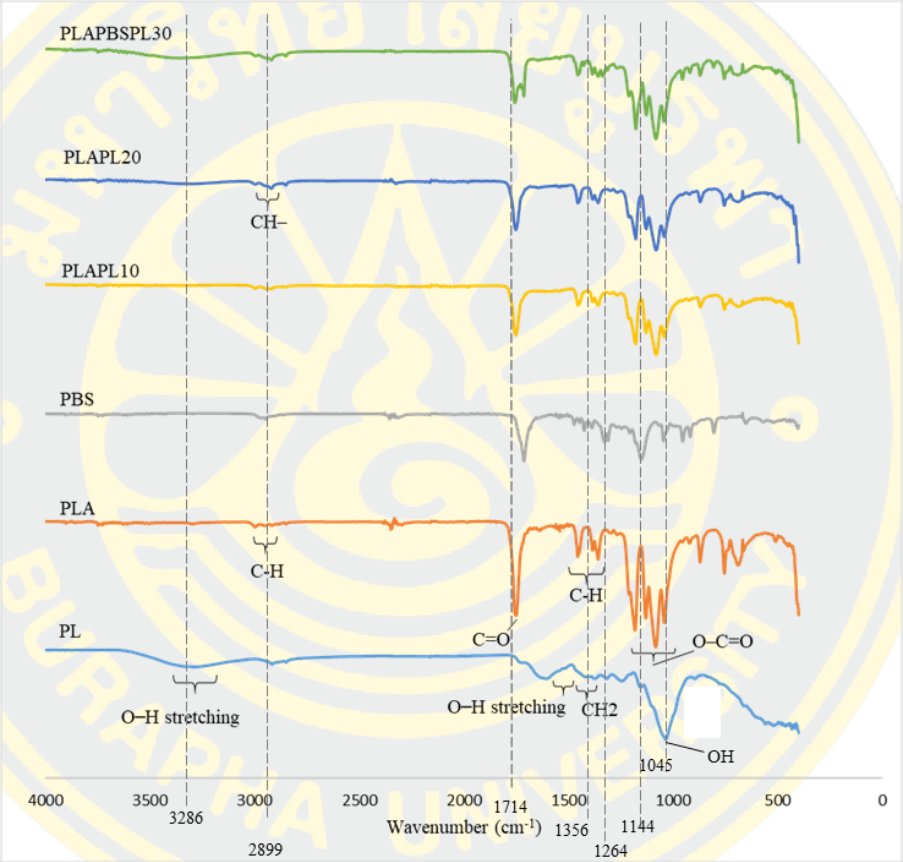
ตารางที่ 10 อินฟาเรดสเปกตรัมของไบโอคอมโพสิตจากพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับเปลือกทุเรียน

พีค (cm^{-1}) PLAPBSDB30	หมู่ฟังก์ชันทางเคมี
920	C–OH in carboxylic acid groups
1044	stretching of C–OH
1084	asymmetric and symmetric stretching of C–O–C
1160	stretching of the –C–O–C–
1180	asymmetric and symmetric stretching of C–O–C
1335	symmetric stretching vibrations of –CH2– groups
1357	bending vibration of –CH
1386	asymmetric and symmetric bending vibration of C–H from $–CH_3$
1453	asymmetric and symmetric bending vibration of C–H from $–CH_3$
1714	C=O stretching vibrations of ester groups
1755	–C=O stretching of aliphatic ester
2947	C–H vibration
2996	asymmetric stretching vibration of C–H from $–CH_3$
3325	stretching vibration of OH

4.5.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับใบสับปะรด

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของ ใบสับปะรดแสดงพีคที่ 3286 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ stretching vibration of OH, พีคที่ 2917 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ C–H vibration, พีคที่ 1734 แสดงถึงหมู่, 1603 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ C=O และพีคที่ 1033 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ C–OH stretching (Rahmat et al., 2016) และผลวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของไบโอคอมโพสิตที่เตรียมขึ้นจากใบสับปะรด PLAPL10 และ PLAPL20 พบว่าพีคที่เกิดขึ้นเป็นหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดกับใบสับปะรดดังตารางที่ 11 อีกทั้งพบความเข้มของพีคที่ 1357 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพีคที่ 3286 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของใบสับปะรดลดลง และ

ยังพบอีกว่าพีคที่ 3286 cm^{-1} เข้มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณใบสับปะรดเพิ่มสูงขึ้น ดังภาพที่ 49 ไบโอคอมโพสิต PLAPBSRH30 พบว่าพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในช่วงพีคที่ 1144-1264 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ –C–O–C– และความเข้มพีคที่ 1714 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C=O และพีคที่ 3286 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ OH ของวัสดุชีวมวลมีความเข้มลดลง (Liminana et al., 2018; Phua et al., 2013)



ภาพที่ 49 อินฟาเรดสเปกตรัมของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพ PLA กับใบสับปะรด

ตารางที่ 11 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิตจากพอลิแลคติกแอซิดกับใบสับปะรด

พีค (cm^{-1})		หมู่ฟังก์ชันทางเคมี
PLAPL10	PLAPL20	
1041	1041	stretching of C–OH
1080	1080	asymmetric and symmetric stretching of C–O–C
1179	1179	asymmetric and symmetric stretching of C–O–C
1358	1358	bending vibration of –CH
1384	1384	asymmetric and symmetric bending vibration of C–H from –CH3
1454	1454	asymmetric and symmetric bending vibration of C–H from –CH3
-	2994	asymmetric stretching vibration of C–H from $–CH_3$
-	3323	stretching vibration of OH

ตารางที่ 12 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิตจากพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับใบสับปะรด

พีค (cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชันทางเคมี
PLAPBSPL30	
920	C–OH in carboxylic acid groups
1045	stretching of C–OH
1082	asymmetric and symmetric stretching of C–O–C
1162	stretching of the –C–O–C–
1179	asymmetric and symmetric stretching of C–O–C
1335	symmetric stretching vibrations of $–CH_2–$ groups
1358	bending vibration of –CH
1385	asymmetric and symmetric bending vibration of C–H from $–CH_3$
1457	asymmetric and symmetric bending vibration of C–H from $–CH_3$
1714	C=O stretching vibrations of ester groups

ตารางที่ 12 (ต่อ)

พีค (cm^{-1}) PLAPBSPL30	หมู่ฟังก์ชันทางเคมี
1756	–C=O stretching of aliphatic ester
2947	C–H vibration
2994	asymmetric stretching vibration of C–H from –CH3
3328	stretching vibration of OH

จากผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีพบว่าพีคที่ 1356 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C-H ของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, พีคที่ 1144-1264 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ –C–O–C– และพีคที่ 1714 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C=O ของพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และพีคที่ 3285-3330 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ OH และพีคที่ 1042-1047 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C-OH ของวัสดุชีวมวลมีความเข้มพีคลดลงเป็นผลจากหมู่ C=C ของสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์เชื่อมประสานกับพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดที่หมู่ CH และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่หมู่ CH_2 และหมู่ –C–O–C– ของสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์เชื่อมประสานกับหมู่ OH ของวัสดุชีวมวล (Liminana et al., 2018; Phua et al., 2013)

4.6 การศึกษากระบวนการย่อยสลายโดยการฝังดิน

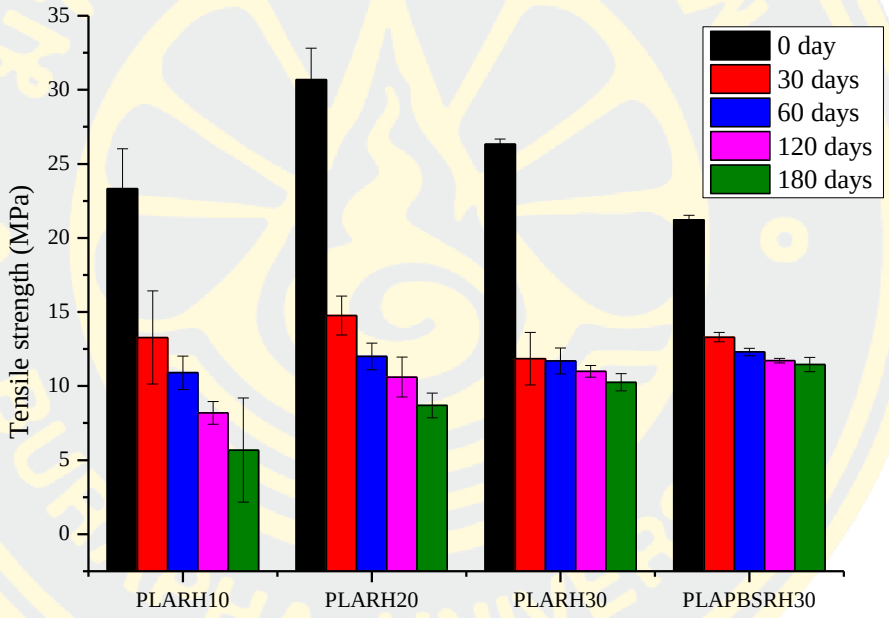
การศึกษากระบวนการย่อยสลายโดยการฝังดินด้วยการทดสอบแรงดึง, รูปถ่ายดิจิตอล, กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และเปรียบเทียบน้ำหนักก่อน-หลังการฝังดิน ผู้วิจัยได้เลือกไบโอคอมโพสิตที่ได้จากการผสมระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบเป็นตัวอย่างศึกษาการย่อยสลาย เนื่องจากเป็นวัสดุชนิดเดียวที่สามารถผสมได้ครบทุกอัตราส่วนตามแผนการดำเนินงานวิจัย

4.6.1 สมบัติเชิงกลของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ

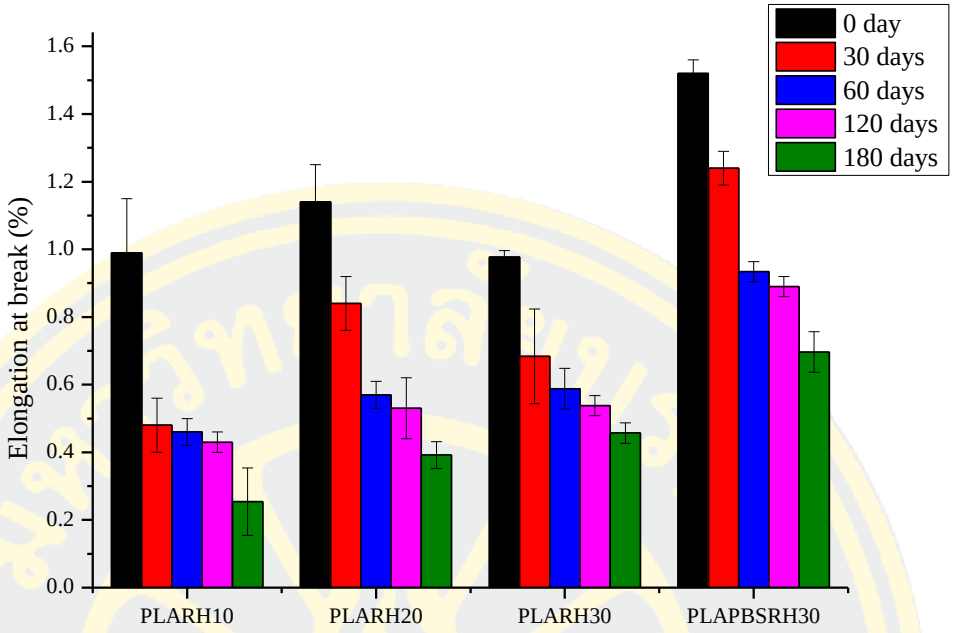
จากการศึกษาความแข็งแรงต่อแรงดึง และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 – 02a ของไบโอคอมโพสิต PLARH10, PLARH20, PLARH30 และ PLAPBSRH30 ได้ผลการทดสอบ ดังภาพที่ 50 และภาพที่ 51 ตามลำดับ ซึ่งเป็นการลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มระยะเวลาการทดสอบด้วยการฝังดิน ทั้งนี้สามารถคิดเป็นร้อยละการลดลงของความแข็งแรงต่อแรงดึงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการทดสอบ ดังตารางที่ 13 และคิดอัตราการลดลงของค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของไบโอคอมโพสิต ดังตารางที่ 14 ซึ่งสอดคล้องกับผลวิจัยของ Yu และคณะ (2020) ซึ่งวิจัยการย่อยสลายโดยการฝังดินที่ 30 วันของไบโอคอมโพสิตที่ได้

จากพอลิแลคติกแอซิด กับแกลบพบว่าความแข็งแรงต่อแรงดึง และความแข็งแรงต่อการดัดงอลดลง 12.7% และ 12.16% ตามลำดับ (Yu, Dong, Lei, & Shi, 2020)

ความแข็งแรงต่อแรงดึง และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของไบโอคอมโพสิตลดลงหลังทำการทดสอบฝังดินเป็นระยะเวลา 30–120 วัน เป็นเพราะการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยน้ำและความชื้นในดินซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ จากผลการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินพบว่าการนำวัสดุที่มีความชอบน้ำสูงเช่น แกลบ มาผสมกับพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดสามารถปรับปรุงอัตราการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดให้เกิดเร็วขึ้น (Terzopoulou et al., 2016; Then et al., 2015)



ภาพที่ 50 ความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 30, 60, 120 และ 180 วัน



ภาพที่ 51 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดหลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 0, 30, 60, 120 และ 180 วัน

ตารางที่ 13 การลดลงของความแข็งแรงต่อแรงดึงหลังทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน

ความแข็งแรงต่อแรงดึงจากการทดสอบย่อยสลายด้วยการฝังดิน						
ไบโอคอมโพสิต	ระยะเวลาการทดสอบด้วยการฝังดิน					หน่วย
	0 วัน	30 วัน	60 วัน	120 วัน	180 วัน	
PLARH10	23.3	13.2	10.9	8.2	5.6	Mpa
ลดลงต่อเนื่องในอัตราร้อยละ	-	43.3	17.4	24.8	31.7	%
PLARH20	30.6	14.7	12	10.6	8.6	Mpa
ลดลงต่อเนื่องในอัตราร้อยละ	-	52.0	18.4	11.7	18.9	%
PLARH30	26.3	11.8	11.7	10.9	10.2	Mpa
ลดลงต่อเนื่องในอัตราร้อยละ	-	55.1	0.8	6.8	6.4	%
PLAPBSRH30	21.2	13.3	12.3	11.7	11.4	Mpa
ลดลงต่อเนื่องในอัตราร้อยละ	-	37.3	7.5	4.9	2.6	%

*การลดลงต่อเนื่องในอัตราร้อยละคิดเทียบจากระยะเวลาการทดสอบด้วยฝังดินก่อนหน้า

ตารางที่ 14 การลดลงของค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดหลังทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน

ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดจากการทดสอบย่อยสลายด้วยการฝังดิน						
ไบโอคอมโพสิต	ระยะเวลาการทดสอบด้วยการฝังดิน					หน่วย
	0 วัน	30 วัน	60 วัน	120 วัน	180 วัน	
PLARH10	0.99	0.48	0.46	0.43	0.25	%
ลดลงต่อเนื่องในอัตราร้อยละ	-	51.5	4.2	6.5	41.9	%
PLARH20	1.14	0.84	0.57	0.53	0.39	%
ลดลงต่อเนื่องในอัตราร้อยละ	-	26.3	32.1	7.0	26.4	%
PLARH30	0.97	0.68	0.58	0.53	0.45	%
ลดลงต่อเนื่องในอัตราร้อยละ	-	29.9	14.7	8.6	15.1	%
PLAPBSRH30	1.52	1.24	0.93	0.89	0.69	%
ลดลงต่อเนื่องในอัตราร้อยละ	-	18.4	25.0	4.3	22.5	%

*การลดลงต่อเนื่องในอัตราร้อยละคิดเทียบจากระยะเวลาการทดสอบด้วยฝังดินก่อนหน้า

4.6.2 การลดลงของน้ำหนักของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบ

ผลการศึกษาน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 – 02a หลังการฝังดินเป็นระยะเวลา 0 วัน, 30 วัน, 60 วัน, 120 วัน และ 180 วัน พบว่าน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบเปลี่ยนแปลง ดังตารางที่ 15 และภาพที่ 52 ซึ่งพบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักชิ้นงานทดสอบหลังฝังดินเป็นระยะเวลา 30 วัน และพบอัตราการลดลงของน้ำหนักชิ้นงานหลังฝังดินที่ระยะเวลา 30 วัน มากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณแกลบสูงขึ้น ดังภาพที่ 53 หลังจากระยะเวลาการทดลองดำเนินผ่านไปที่ 60 วัน, 120 วัน และ 180 วัน พบว่าน้ำหนักชิ้นงานทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญในช่วงเวลาดังกล่าว ส่วนตัวอย่าง PLAPBSRH30 ซึ่งมีการนำพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตเข้าไปผสมอยู่ในไบโอคอมโพสิตพบว่าอัตราร้อยละการลดลงของน้ำหนักชิ้นงานทดสอบเพิ่มสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kumar และคณะ (2019) ที่ได้ผลวิจัยการย่อยสลายของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดกับลิกนิน 5% และ 20% โดยพบร้อยละการลดลงของน้ำหนักของไบโอคอมโพสิตที่ 55.38% และ 68.67% ตามลำดับเมื่อเวลาผ่านไป 28 วัน (Ashish Kumar et al., 2019)

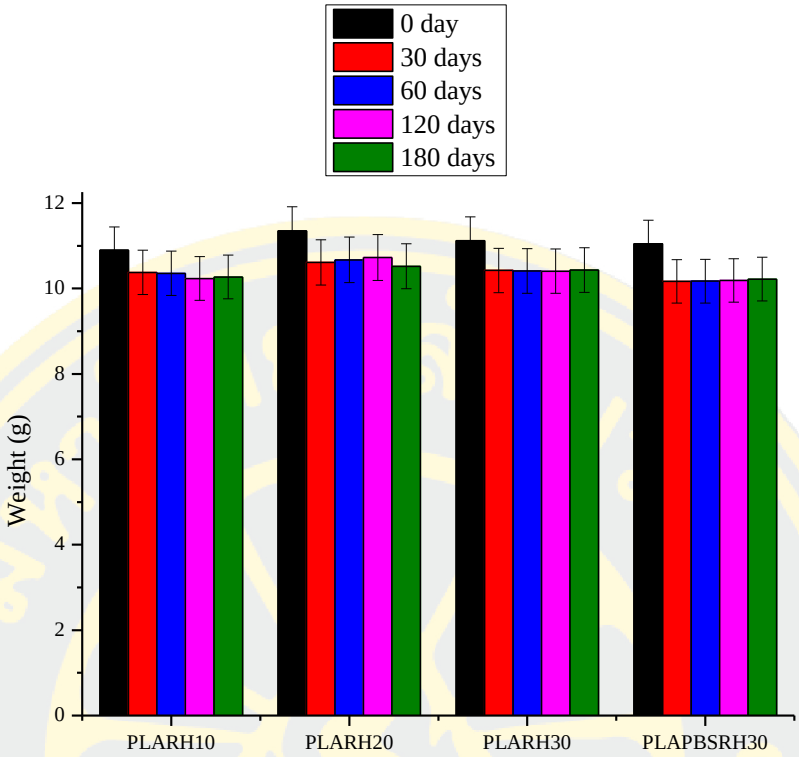
การลดลงของน้ำหนักของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และแกลบเกิดการการย่อยสลายในดินจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และ

เอนไซม์ของแบคทีเรียในดิน อย่างไรก็ตามที่ช่วงเวลาการทดสอบ 30 – 180 วัน นั้นมีน้ำหนักคงที่แต่ก็ยังเกิดการย่อยสลายอย่างต่อเนื่อง ซึ่งยืนยันจากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลในหัวข้อที่ 4.6.1 ซึ่งพบว่าความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อให้เวลาในการทดสอบการย่อยสลายในดินมากกว่า 30 วัน (30-180 วัน) (Abd El-Rahman, Ali, Khalil, & Kandil, 2020)

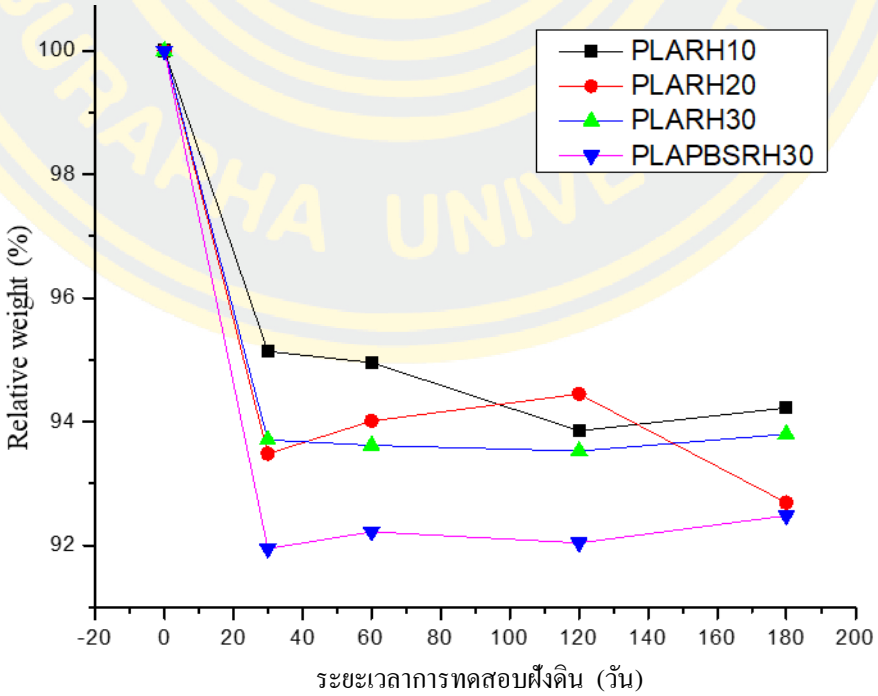
ตารางที่ 15 น้ำหนักชิ้นงานทดสอบหลังผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยการฝังดิน

น้ำหนักจากการทดสอบย่อยสลายด้วยการฝังดิน						
ไบโอคอมโพสิต	ระยะเวลาการทดสอบด้วยการฝังดิน					หน่วย
	0 วัน	30 วัน	60 วัน	120 วัน	180 วัน	
PLARH10	10.9	10.37	10.35	10.23	10.27	g
ร้อยละการลดลงของน้ำหนัก	-	4.9	0.2	1.2	-0.4	%
PLARH20	11.35	10.61	10.67	10.72	10.52	g
ร้อยละการลดลงของน้ำหนัก	-	6.5	-0.6	-0.5	1.9	%
PLARH30	11.12	10.42	10.41	10.4	10.43	g
ร้อยละการลดลงของน้ำหนัก	-	6.3	0.1	0.1	-0.3	%
PLAPBSRH30	11.05	10.16	10.19	10.17	10.2	g
ร้อยละการลดลงของน้ำหนัก	-	8.1	-0.3	0.2	-0.3	%

*การลดลงในอัตราร้อยละคิดเทียบจากระยะเวลาการทดสอบด้วยฝังดินก่อนหน้า



ภาพที่ 52 น้ำหนักของชิ้นงานทดสอบหลังการฝังดินที่ระยะเวลา 180 วัน



ภาพที่ 53 ร้อยละของน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบหลังการฝังดินที่ระยะเวลา 180 วัน

4.6.3 ลักษณะพื้นผิวของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบศึกษาด้วยภาพถ่ายดิจิตอลและภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

จากการศึกษาการย่อยสลายโดยการฝังดิน ดังภาพที่ 54 โดยภาพ a - j เป็นการศึกษาพลาสติกชีวภาพ PLA บริสุทธิ์ และไบโอคอมโพสิตที่ได้จากแกลบด้วยภาพถ่ายดิจิตอล และภาพ k – t เป็นการศึกษาด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่าพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์มีสีเปลี่ยนไปเป็นสีเหลืองอ่อนหลังจากฝังดินที่ระยะเวลา 180 วัน ภาพ k และ l แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่าพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์มีรอยร้าวและการหลุดร่อนของพลาสติกที่พื้นผิวของชิ้นงานเล็กน้อย, จากภาพถ่ายดิจิตอลพบว่าพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ PLARH10 และ PLARH20 ปรากฏรูพรุนจำนวณมาก, สีของชิ้นงานทดสอบซีดลง, ความมันวาวบนผิวชิ้นงานเปลี่ยนไปเป็นความสาก และเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงตรวจสอบพบว่าผิวของชิ้นงานทดสอบถูกกัดกร่อนหายไปอาจเกิดจากการย่อยสลาย หรือแตกหลุดร่อนออกไป แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแกลบเป็น 30% wt. รูพรุนที่ผิวชิ้นงานกลับลดน้อยลงเมื่อตรวจสอบด้วยภาพถ่ายดิจิตอล และหากตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่าเกิดการกัดกร่อนลักษณะคล้ายคลึงกับชิ้นงานทดสอบของ PLARH10 และ PLARH20 แต่รอยกัดกร่อนเกิดขึ้นน้อยกว่ามาก และยังพบอีกว่าผิวของชิ้นงานมีลักษณะเปื่อยยุ่ยความมันวาวหายไป และเมื่อทดสอบไบโอคอมโพสิตที่มีพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีซัคซิเนตผสมอยู่ด้วยภาพถ่ายดิจิตอลพบว่ามีรูพรุนที่ผิวชิ้นงานทดสอบเล็กน้อย, ความมันวาว และสีเปลี่ยนไป, ผิวมีลักษณะสาก ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่พบว่าผิวของชิ้นงานทดสอบเปื่อยยุ่ย

รอยมลทิลต่าง ๆ ที่ปรากฏขึ้นบนผิวของชิ้นงานทดสอบ ของไบโอคอมโพสิต PLARH10, PLARH20 และ PLARH30 และ PLAPBSRH30 คือลักษณะการถูกกรัดกร่อนทางธรรมชาติของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต โดยการถูกกัดกร่อนที่ชั้นผิวของชิ้นงานทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าพลาสติกชีวภาพถูกจุลินทรีย์ที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของดินกัดกร่อน อีกทั้งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยน้ำ และความชื้นในดินเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพมากขึ้น จากผลการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินพบว่าการนำวัสดุชีวมวลที่มีความชอบน้ำสูงเช่น แกลบ มาผสมกับพลาสติกชีวภาพสามารถปรับปรุงการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดให้ดีขึ้นได้ (Terzopoulou et al., 2016; Then et al., 2015) โดยชนิด และสายพันธุ์ของจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดได้ (Butbunchu & Pathom-Aree, 2019) มีดังต่อไปนี้

ชนิด Micromonosporaceae (Micromonospora)

สายพันธุ์ Micromonospora echinospora B12-1

สายพันธุ์ Micromonospora viridifaciens B7-3

ชนิด Pseudonocardiaceae (Amycolatopsis)

สายพันธุ์ Amycolatopsis sp. HT-32

สายพันธุ์ Amycolatopsis sp. K104-1

สายพันธุ์ Amycolatopsis oliviviridis SCM_MK2-4

สายพันธุ์ Amycolatopsis thailandensis CMU-PLA07^{T}

ชนิด Streptomycetaceae (Streptomyces)

สายพันธุ์ Streptomyces sp. APL3

สายพันธุ์ Streptomyces sp. KKU215

ชนิด Streptosporangiaceae (Nonomuraea)

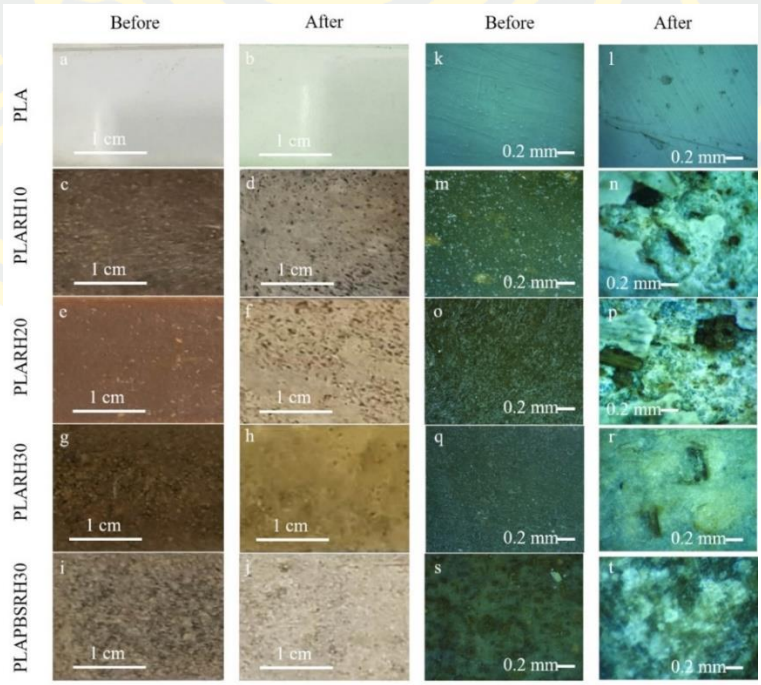
สายพันธุ์ Nonomuraea terrinata L44-1

สายพันธุ์ Nonomuraea fastidiosa T9-1

ชนิด Thermomonosporaceae (Actinomadura)

สายพันธุ์ Actinomadura keratinilytica T16-1

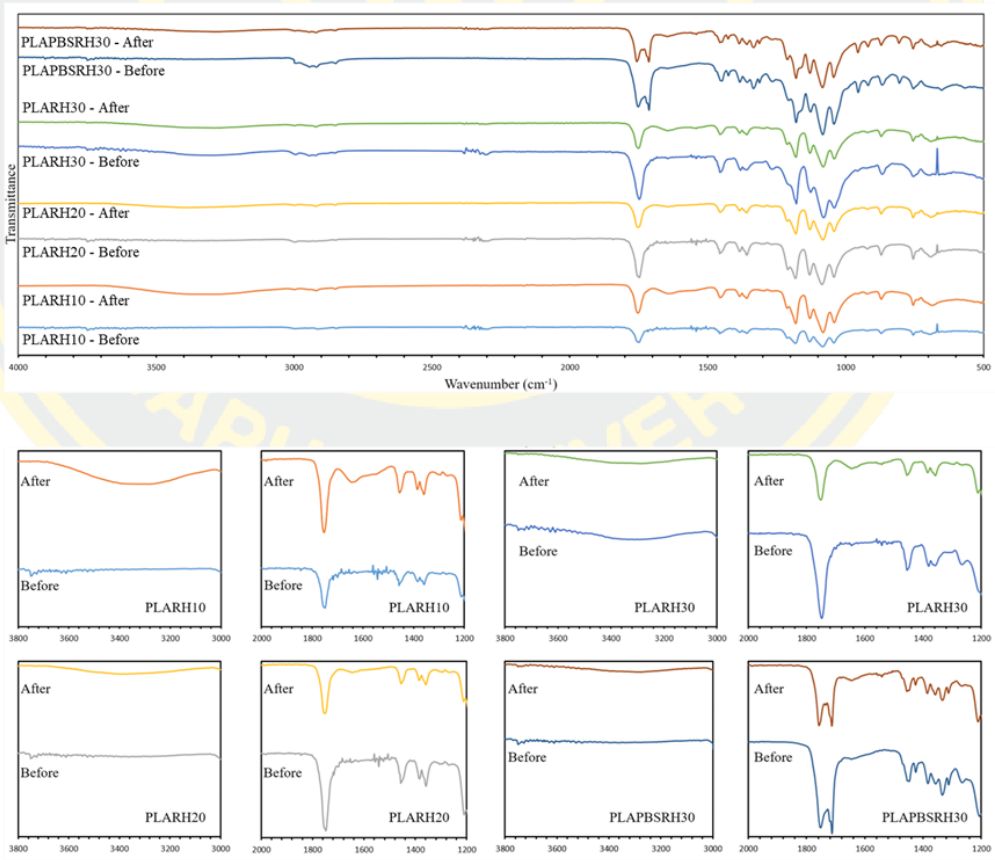
สายพันธุ์ Actinomadura sp. TF1



ภาพที่ 54 การย่อยสลายโดยการฝังดินด้วยภาพถ่ายดิจิตอล (a – j) และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (k – t)

4.6.4 การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างทางเคมีของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบด้วยเทคนิค FTIR

ผลวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดกับแกลบ หลังทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นเวลา 180 วัน พบว่าพีคของคลื่นความถี่เกือบทั้งหมดไม่เปลี่ยนแปลง ดังภาพที่ 55 เว้นแต่พีคที่ 1645 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของของหมู่ O-H bending of the unresolved hydroxyl group มีความเข้มสูงขึ้น และพีคที่มีการเปลี่ยนแปลงอื่น ๆ พบพีคที่ช่วง 3000-3650 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของ inter and intramolecular hydrogen bonds of hydroxyl groups ของแกลบที่เป็นเซลลูโลส ซึ่งทั้ง 2 พีคมีความเข้มสูงขึ้นจากการดูดซับน้ำ ซึ่งเป็นตัวชี้บ่งที่สำคัญว่ากระบวนการย่อยสลายโดยการฝังดินนั้นมีปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นจากการดูดซับน้ำและความชื้นในดิน (Terzopoulou et al., 2016; Then et al., 2015)



ภาพที่ 55 อินฟราเรดสเปกโตรของไบโอคอมโพสิตระหว่างพลาสติกชีวภาพ PLA กับแกลบ หลังทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นเวลา 180 วัน

4.7 การทดลองขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ไบโอคอมโพสิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก

การออกแบบผลิตภัณฑ์สำหรับการทดลองฉีดขึ้นรูปด้วยไบโอคอมโพสิตผู้วิจัยได้เลือกตัวอย่างผลิตภัณฑ์เป็นกระถางต้นไม้ โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ด้วยการจำลองการไหลของพลาสติกเพื่อหาความเหมาะสมของรูปทรงผลิตภัณฑ์ และใช้ผลวิเคราะห์สำหรับอ้างอิงในกระบวนการทดลองฉีดขึ้นรูปด้วยวัสดุคอมโพสิต

4.7.1 การออกแบบผลิตภัณฑ์ด้วยโปรแกรมจำลองการไหลของพลาสติก

การออกแบบผลิตภัณฑ์พิจารณาจากความสวยงาม และความเหมาะสมสำหรับการใช้งานโดยอ้างอิงจากชิ้นงานต้นแบบตามท้องตลาด ทำให้สามารถออกแบบรูปทรงของผลิตภัณฑ์ได้ 3 แบบด้วยกันคือ แบบวงกลม (Circle), แบบสี่เหลี่ยม (Square), แบบหกเหลี่ยม (Hexagon) ดังภาพที่ 56

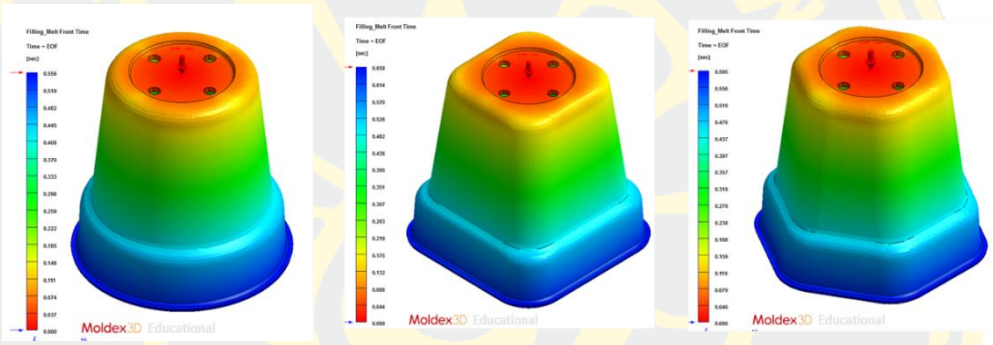
1 2 3

ภาพที่ 56 รูปทรงของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 แบบ คือ แบบวงกลม, แบบสี่เหลี่ยม และ แบบหกเหลี่ยม

รูปทรงของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 แบบถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองการไหล Moldex3D ผู้วิจัยได้นำผลวิเคราะห์มาเปรียบเทียบเพื่อหาความเหมาะสมสำหรับการออกแบบตัวอย่างผลิตภัณฑ์ โดยใช้พอลิแลคติกแอซิดเป็นสำหรับการวิเคราะห์จำลองการไหล ดังตารางที่ 16

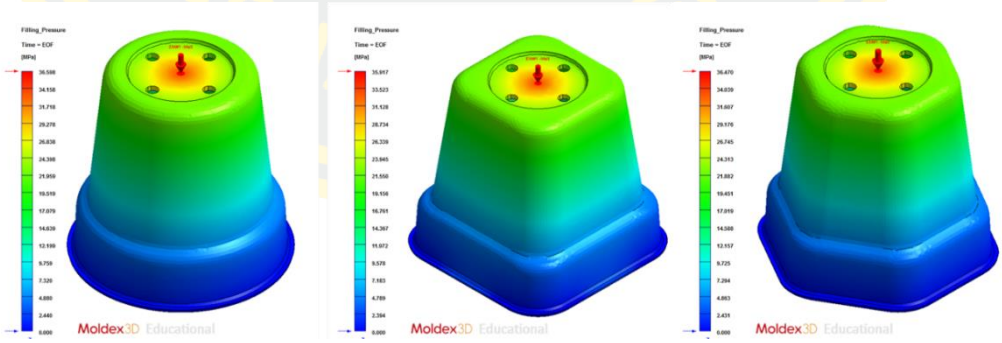
ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมจำลองการไหลของรูปทรงของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 แบบ

Parameter	Circle	Square	Hexagonal
Filling time (s)	0.55	0.65	0.59
Filling pressure (Phasawat et al.)	36.5	35.9	36.4
Filling stress (Phasawat et al.)	3.8	5.6	0.68
Sink mark displacement (mm)	0.05	0.05	0.05
Warpage displacement (mm)	0.69	0.77	0.73



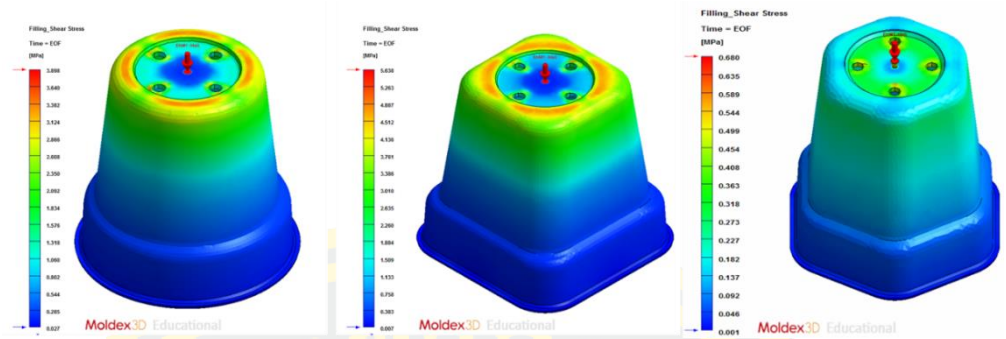
0.55 s 0.65 s 0.59 s

ภาพที่ 57 ผลการวิเคราะห์ Filling time (s)



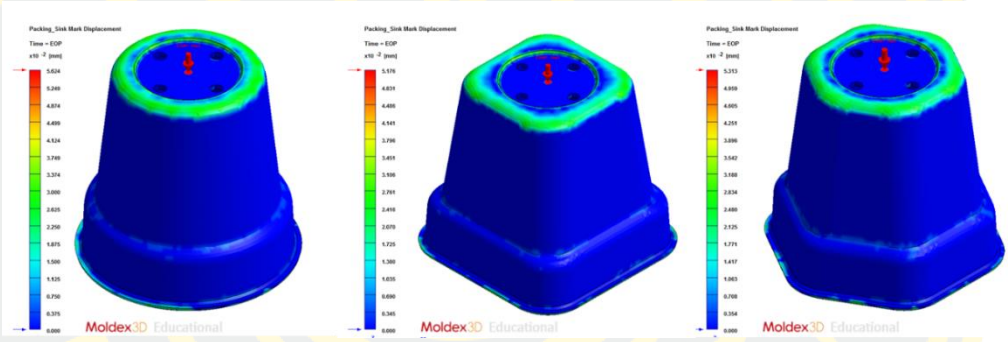
36.5 MPa 35.9 MPa 36.4 MPa

ภาพที่ 58 ผลการวิเคราะห์ Filling pressure (MPa)



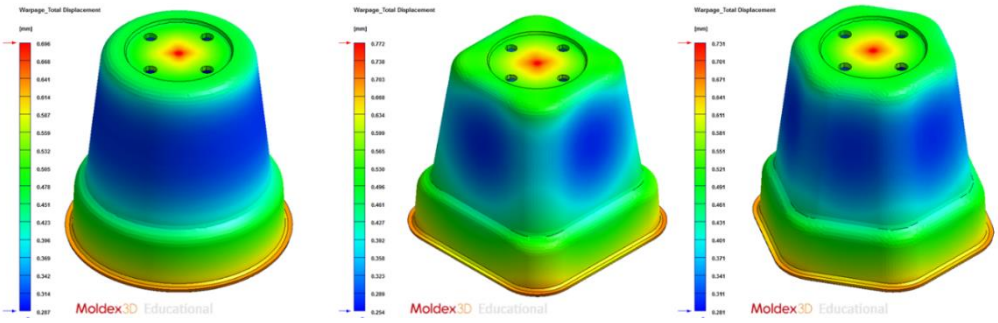
3.8 MPa 5.6 MPa 0.68 MPa

ภาพที่ 59 ผลการวิเคราะห์ Filling stress (MPa)



0.05 mm 0.05 mm 0.05 mm

ภาพที่ 60 ผลการวิเคราะห์ Sink mark displacement (mm)



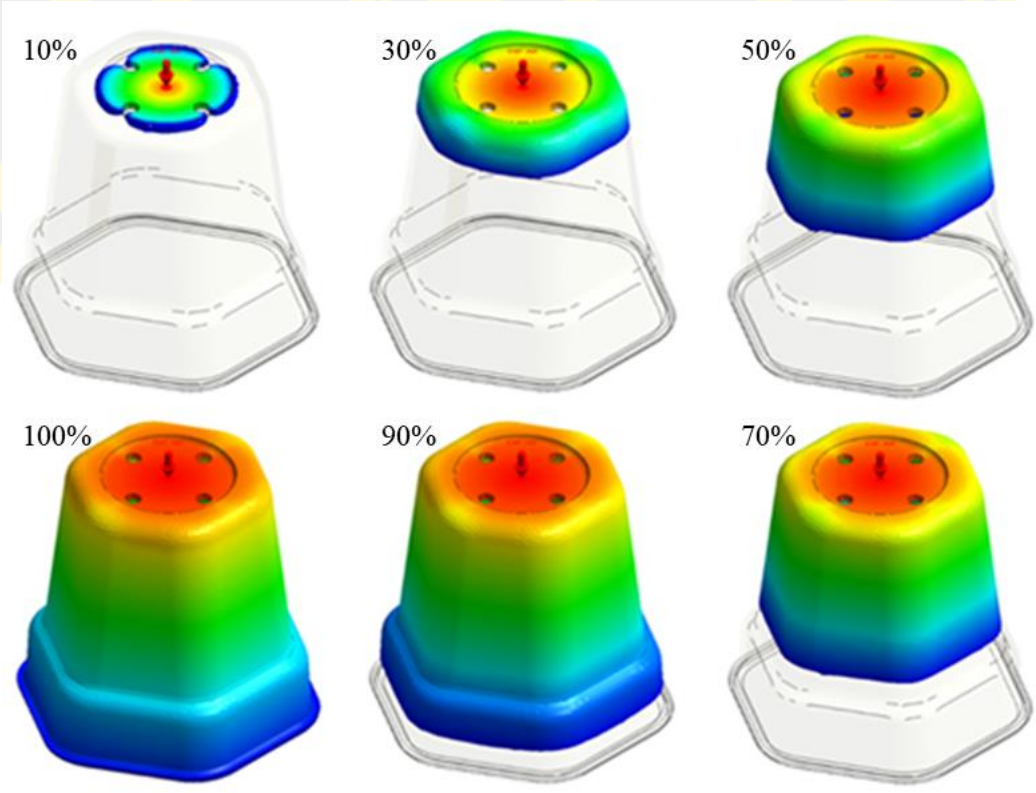
0.69 mm 0.77 mm 0.73 mm

ภาพที่ 61 ผลการวิเคราะห์ Warpage displacement (mm)

จากผลการวิเคราะห์จำลองการไหลของพลาสติกด้วยกระบวนฉีดขึ้นรูป ดังตารางที่ 15 พบว่าความเครียดจากการไหลของพลาสติกแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีเพียงรูปทรงแบบหกเหลี่ยมเพียงแบบเดียวที่พบความเครียดไม่ถึง 1 MPa ในขณะที่อีก 2 รูปทางนั้นพบความเครียดที่ 3.8 และ 5.6 MPa ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงานอย่างมาก ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกรูปทรงแบบหกเหลี่ยมในการออกผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง และแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปพลาสติก สำหรับการทดลองวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ได้จากพลาสติกชีวภาพกับแกลบ

4.7.2 ผลการจำลองการไหลของวัสดุของผลิตภัณฑ์กระถางรูปทรงหกเหลี่ยม

การจำลองการไหลของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดหลอมด้วยโปรแกรมวิเคราะห์พบรูปแบบการไหลเติมเต็มของพอลิแลคติกแอซิดในแม่พิมพ์ ดังภาพที่ 62 และได้ผลวิเคราะห์สำหรับการใช้อ้างอิงในกระบวนการทดลองฉีดขึ้นรูป ดังตารางที่ 17



ภาพที่ 62 รูปแบบการไหลเติมเต็มของพอลิแลคติกแอซิดในแม่พิมพ์

ตารางที่ 17 เงื่อนไขการฉีดขึ้นรูปจากผลวิเคราะห์การจำลองการไหลของพอลิแลคติกแอซิด

ตัวแปรการฉีดขึ้นรูปจากผลวิเคราะห์	
Clamping force (Ton)	15.6
Injection pressure (MPa)	36.4
Holding pressure (MPa)	19.1
Holding time (sec)	3.6
Cooling time (sec)	14.2
Mold temperature (°C)	40
Melt temperature (°C)	188

4.7.3 การทดลองฉีดขึ้นรูปไบโอคอมโพสิตโดยอ้างอิงจากผลจำลองการไหล

จากการทดลองฉีดขึ้นรูปไบโอคอมโพสิตทั้ง 3 ชนิด โดยอ้างอิงตัวแปรจากผลวิเคราะห์จากการจำลองการไหลด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก พลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดต้องใช้อุณหภูมิหลอมที่ hot runner (โซนรูวิ่งร้อน) 220-230 °C แต่เมื่อนำแกลบ 10% wt. เติมเข้าไปในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดพบว่าจำเป็นต้องตั้งค่าอุณหภูมิหลอมที่ใช้น้อยลงประมาณ 20-30 °C และจำเป็นต้องตั้งค่าอุณหภูมิหลอมให้น้อยลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณของแกลบที่ 20% wt. และ 30% wt. ในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดตามลำดับ และเมื่อเติมพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตในไบโอคอมโพสิตอุณหภูมิหลอมที่ใช้สำหรับการฉีดขึ้นรูปต้องตั้งค่าให้น้อยลงอีกประมาณ 5-10 °C ดังตารางที่ 18

จากเหตุจำเป็นในการทดลองฉีดขึ้นรูปไบโอคอมโพสิตที่ต้องตั้งค่าอุณหภูมิหลอมน้อยลงเมื่อทำการเติมแกลบในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด เนื่องจากแกลบที่ถูกผสมเข้าไปในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดนั้นไปขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งเป็นการรบกวนการเกิดผลึกของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดส่งผลให้พอลิแลคติกแอซิดในไบโอคอมโพสิต PLARH10 มีจุดหลอมเหลวลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณแกลบเพิ่มสูงขึ้นการรบกวนการเกิดผลึกจึงมากขึ้นตามไปด้วยทำให้ PLARH20 และ PLARH30 มีจุดหลอมเหลวลดลงตามลำดับ และจากผลการเติมพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ส่งผลให้อุณหภูมิหลอมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปลดลงนั้นมาจากพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ไม่สามารถผสมให้เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์รบกวนการเกิดผลึกระหว่างกัน และยังถูกรบกวนการเกิดผลึกจากอนุภาคของแกลบ (Phasawat et al., 2014)

ตารางที่ 18 เงื่อนไขการทดลองฉีดขึ้นรูปไบโอคอมโพสิต

ตัวแปร	ไบโอคอมโพสิต				
	PLA	PLARH10	PLARH20	PLARH30	PLAPBSRH30
Clamping force (Ton)	16	16	16	16	16
Injection pressure (MPa)	112	112	112	112	112
Holding pressure (MPa)	50	50	50	50	50
Holding time (sec)	3	3	3	3	3
Cooling time (sec)	14	14	14	14	14
Mold temperature (°C)	40	40	40	40	40
Barrel temperature (zone 1, °C)	190	190	190	190	190
Barrel temperature (zone 2, °C)	195	195	195	195	195
Barrel temperature (zone 3, °C)	200	200	200	200	200
Nozzle temperature (zone 4, °C)	210	210	210	210	210
Hot runner temperature (°C)	220–230	190–200	180–190	170–180	165–170

ภาพที่ 63 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์กระถางที่สามารถขึ้นรูปได้จากไบโอคอมโพสิต

4.7.4 การลดต้นทุนพลาสติกชีวภาพด้วยวัสดุชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการเกษตร

จากการทดลองนำแกลบมาใช้เป็นสารเติมแต่งสำหรับลดต้นทุนในกระบวนการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มาจากพลาสติกชีวภาพ โดยสามารถวิเคราะห์ราคาต้นทุนของไบโอคอมโพสิต

ได้ ดังตารางที่ 19 ซึ่ง Additive คือราคารวมกันของ มาเลอิกแอนไฮไดรด์, แคลเซียมสเตียเรท และแว๊กซ์อี ที่เกิดจากการประเมิณราคาต้นทุนของสถานประกอบการที่ให้ความอนุเคราะห์ในการผสมวัสดุไบโอคอมโพสิต โดยมีราคาต้นทุนสำหรับวัสดุดังต่อไปนี้

1. พลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด ราคา 150 บาท ต่อกิโลกรัม
2. พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ราคา 260 บาท ต่อกิโลกรัม
3. กลีเซอรอล ราคา 160 บาท ต่อกิโลกรัม
4. Additive ราคา 800 บาท ต่อกิโลกรัม

จากต้นทุนของวัสดุ และการวิเคราะห์ราคา ดังตารางที่ 19 หากต้องการลดต้นทุนของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดจำเป็นต้องใช้แกลบเป็นสารเติมแต่งที่ปริมาณตั้งแต่ 20% wt. ขึ้นไป เนื่องจากราคาของสารเติมแต่งตัวอื่น ๆ คือกลีเซอรอล, มาเลอิกแอนไฮไดรด์, แคลเซียมสเตียเรท และแว๊กซ์อี เป็นต้นทุนที่ทำให้ราคาของไบโอคอมโพสิต PLARH10 แพงกว่าการใช้พลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์

ตารางที่ 19 วิเคราะห์ราคาต้นทุนของไบโอคอมโพสิต

ราคาของวัสดุที่ใช้ในการผสมใน 1 กิโลกรัม (Baht)					
Composite	PLA	PBS	Gly	Additive	Price/kg
PLA	150	0	0	0	150
PBS	0	260	0	0	260
PLARH10	130.71	0	2.8	19.2	152.71
PLARH20	118.065	0	5.04	19.2	142.305
PLARH30	107.64	0	6.896	19.2	133.736
PLAPBSRH30	64.59	74.62	6.896	19.2	165.306

บทที่ 5
อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

5.1 อภิปรายผลการวิจัย

5.1.1 สมบัติเชิงกลของไบโอคอมโพสิต

การใช้วัสดุชีวมวล เช่น แกลบ, เปลือกทุเรียน และใบสับปะรด เป็นสารเติมแต่งสำหรับการลดต้นทุนพลาสติกชีวภาพส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดในวัสดุไบโอคอมโพสิตลดลง เนื่องจากวัสดุชีวมวลมีลักษณะเป็น hydrophilic ที่มีความชอบน้ำผสมกับพอลิเมอร์แบบ hydrophobic ที่มีความไม่ชอบน้ำ จึงเกิดการผสมที่ไม่เข้ากันระหว่างพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดกับวัสดุชีวมวลเป็นเหตุให้ไม่เกิดการยึดเกาะระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์กับวัสดุชีวมวล อีกทั้งไม่สามารถควบคุมขนาดอนุภาคของวัสดุชีวมวลให้มีขนาดเท่ากันได้จึงเกิดการกระจายตัวของวัสดุชีวมวลในเททริกซ์ของพอลิเมอร์ที่ไม่ดีนัก การกระจายตัวที่ไม่ดีทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของวัสดุชีวมวลในไบโอคอมโพสิตนั้นกลายเป็นอุปสรรคต่อการกระจายแรงของพลาสติกชีวภาพให้มีประสิทธิภาพลดลง (Bisht et al., 2020; Dimzoski et al., 2008) พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีความแข็งแรงต่อแรงดึงน้อยเป็นเหตุให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงเมื่อนำไปผสมกับพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดที่มีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่า อีกทั้งการผสมระหว่างพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดไม่สามารถผสมเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นสาเหตุของความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง (Hongsriphan et al., 2013; Phasawat et al., 2014; Qiu et al., 2016)

จากการรายงานผลของ Candido และคณะ (2009) บรรจุภัณฑ์กระถางต้นไม้ที่ย่อยสลายได้ในธรรมชาติ จากพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยพืชมีความแข็งแรงต่อแรงดึงอยู่ระหว่าง 20-27 MPa ซึ่งสอดคล้องกับผลทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากพอลิแลคติกแอซิด, พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และวัสดุชีวมวลทั้ง 3 ชนิด แกลบ, เปลือกทุเรียน และใบสับปะรด ที่มีความแข็งแรงต่อแรงดึงอยู่ที่ช่วง 20-30 MPa กล่าวคือไบโอคอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลที่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์กระถางต้นไม้ที่ย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (Candido, Castronuovo, & Miccolis, 2009)

5.1.2 สมบัติทางความร้อนของไบโอคอมโพสิต

จากผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของการเพิ่มวัสดุชีวมวล (แกลบ, เปลือกทุเรียน และใบสับปะรด) ลงไปในพลาสติกชีวภาพ PLA รวมไปถึงผลที่เปลี่ยนแปลงไปของสมบัติทางความร้อนเมื่อเติมพลาสติกชีวภาพ PBS พบว่า พลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตแสดงอุณหภูมิหลอมที่ 165 และ 111 °C ซึ่งสอดคล้องกับช่วงอุณหภูมิของพลาสติกชีวภาพที่ 2 ชนิด โดยช่วงอุณหภูมิหลอมของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดอยู่ในช่วง 109-117 °C (Arjmandi et al., 2015; Deng & Thomas, 2015; Jia et al., 2014; Ashish Kumar et al., 2019) และช่วงอุณหภูมิหลอมของพลาสติกชีวภาพ PBS อยู่ที่ในช่วง 154–171 °C (Deng & Thomas, 2015; Jia et al., 2014; Zhan et al., 2014) การเพิ่มขึ้นของวัสดุชีวมวลของทั้ง 3 ชนิด แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิหลอมของพลาสติกชีวภาพนั้นลดลง และลดลงมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุชีวมวลทั้ง 3 ชนิด โดยไบโอคอมโพสิตที่ได้จากแกลบแสดงค่าที่ลดลงจาก 165 °C เป็น 159 °C, 157°C และ 152 °C เมื่อปริมาณแกลบเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 10, 20 และ 30% wt. ตามลำดับ, ไบโอคอมโพสิตที่ได้จากเปลือกทุเรียนแสดงค่าที่ลดลงจาก 165 °C เป็น 159 °C และ 162 °C เมื่อปริมาณเปลือกทุเรียนเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 10 และ 20 wt. ตามลำดับ, ไบโอคอมโพสิตที่ได้จากใบสับปะรดแสดงค่าที่ลดลงจาก 165 °C เป็น 164 °C และ 161 °C เมื่อปริมาณใบสับปะรดเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 10 และ 20 wt. ตามลำดับ กล่าวคือการเพิ่มขึ้นของวัสดุชีวมวลส่งผลให้จุดหลอมเหลวของพลาสติกชีวภาพลดลง โดยเกิดจากรูปร่างและขนาดอนุภาคของวัสดุชีวมวลที่ไม่สามารถควบคุมให้มีขนาดเท่ากันทุกอนุภาคได้เข้าไปรบกวนการจัดเรียงของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งเป็นการรบกวนการเกิดผลึกของพลาสติกชีวภาพในขณะที่กำลังแข็งตัวหลังผ่านกระบวนการผสมด้วยเครื่องหลอมอัดรีดขึ้นรูปแบบเกลียวหนอนคู่

5.1.3 สัณฐานวิทยาของไบโอคอมโพสิต

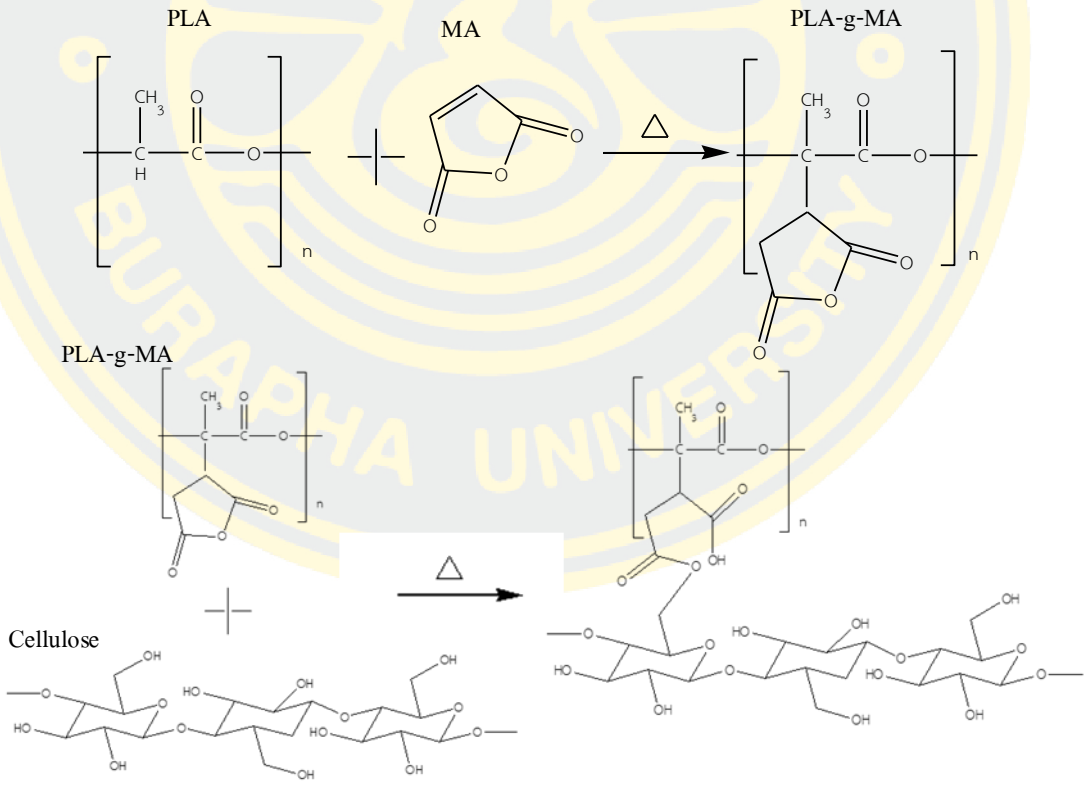
จากผลการศึกษารอยแตกจากขั้นตอนการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงด้วยเทคนิค SEM ที่พบว่าพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดมีรอยการแตกที่เรียบเนียนเป็นเนื้อเดียวกันนั้นบ่งบอกถึงพลาสติกชีวภาพ PLA เป็นพลาสติกที่มีลักษณะแข็งเปราะซึ่งเป็นธรรมชาติของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด (Deng & Thomas, 2015) ในขณะเดียวกันนั้นพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตพบรอยฉีกขาดที่แสดงให้เห็นถึงลักษณะเหนียว, อ่อนตัว และยืดหยุ่นได้ดี (Hongsriphan et al., 2013; Sharma et al., 2019) รอยแตก และผิวขรุขระของไบโอคอมโพสิตเกิดเมื่อทำการผสมวัสดุชีวมวลทั้ง 3 ชนิด เกิดจากการแยกเฟสระหว่างวัสดุชีวมวลกับพลาสติกชีวภาพ โดยบ่งชี้ว่าเกิดการยึดเกาะกันระหว่างวัสดุชีวมวลกับพลาสติกชีวภาพที่ไม่ดี ซึ่งเป็นธรรมชาติ

สำหรับการผสมระหว่างสารที่มีความชอบน้ำสูงอย่างวัสดุชีวมวลที่เป็นเซลลูโลสกับสารที่ไม่ชอบน้ำอย่างพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต อย่างไรก็ตามการยึดเกาะระหว่างพลาสติกชีวภาพกับวัสดุชีวมวลสามารถปรับปรุงได้ด้วยการเติมสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Dimzoski et al., 2008; Lee et al., 2018; Yordem et al., 2011) ที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างหมู่ C-OH ของเซลลูโลสกับหมู่ -C-H ของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต จากผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึงพบรอยแตกของไบโอคอมโพสิตกับวัสดุชีวมวลทั้ง 3 ชนิด โดยปริมาณวัสดุชีวมวลที่ 10% wt. พบช่องว่างระหว่างวัสดุชีวมวลที่การกระจายตัวในเฟสของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดน้อยมาก ซึ่งสามารถบ่งชี้ว่าสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำให้การเกาะกลุ่มกันของวัสดุชีวมวลให้น้อยลงเป็นการช่วยเพิ่มการกระจายตัวของวัสดุชีวมวลในพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และยังช่วยป้องกันไม่ให้วัสดุชีวมวลถูกดึงออกจากพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดในขั้นตอนการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง อย่างไรก็ตามพบการเกาะกลุ่ม และรอยแตกของวัสดุชีวมวลมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุชีวมวลในไบโอคอมโพสิต ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่าสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ 0.8% wt. ส่งผลต่อการกระจายตัวของวัสดุชีวมวลในอัตราคงที่ และจากผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของไบโอคอมโพสิตที่แสดงให้เห็นว่าความเปราะของไบโอคอมโพสิต และลักษณะรอยแตกมีคมลดลง รวมไปถึงการกระจายตัวของวัสดุชีวมวลดีขึ้นเมื่อเติมพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต จึงสามารถบ่งชี้ได้ว่าการผสมพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสามาถปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้านความยืดหยุ่นให้กับไบโอคอมโพสิตที่ได้จากวัสดุชีวมวลทั้ง 3 ชนิดกับพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด (Chaiwutthinan et al., 2015)

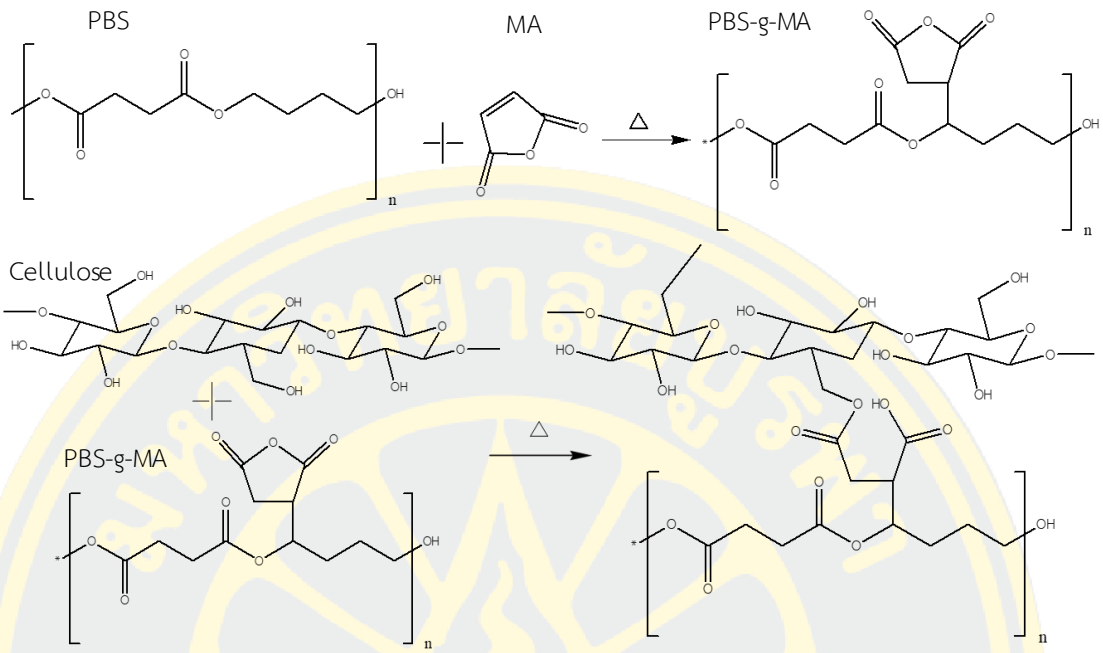
5.1.4 โครงสร้างทางเคมีของไบโอคอมโพสิต

พลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดซึ่งมีสูตรโมเลกุล $(C_3H_4O_2)_n$ และพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ซึ่งมีสูตรโมเลกุล $(C_8H_{12}O_4)_n$ เป็นวัสดุจำพวก hydrophobic ที่ไม่ชอบน้ำ แต่วัสดุชีวมวลทั้ง 3 ชนิด คือ แกลบ, เปลือกทุเรียน และใบสับปะรด ซึ่งเป็นเซลลูโลสมีสูตรโมเลกุล $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็นวัสดุจำพวก hydrophilic มีความชอบน้ำสูง ส่งผลให้การผสมเกิดความไม่สมบูรณ์เนื่องจากสายโซ่ของพอลิเมอร์ไม่สามารถยึดเกาะกับอนุภาคของวัสดุชีวมวลได้ อย่างไรก็ตามสามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ของพลาสติกชีวภาพกับวัสดุชีวมวลให้ยึดเกาะกันได้ดียิ่งขึ้นด้วยการเพิ่มสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งมีสูตรโมเลกุล $C_4H_2O_3$ ในกระบวนการผสมที่ใช้ความร้อนสูงอย่างเครื่องหลอมอัดรีดขึ้นรูปแบบเกลียวหนอนคู่ เพื่อเชื่อมประสานระหว่างสายโซ่ของพลาสติกชีวภาพกับอนุภาคของแกลบ โดยหมู่ C=C ของสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถ

เชื่อมประสานกับกับพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดที่หมู่ CH และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่หมู่ CH_2 และหมู่ –C–O–C– ของสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์สามารถเชื่อมประสานกับหมู่ OH ของของวัสดุชีวมวลทั้ง 3 ชนิด เป็นผลให้ที่ตำแหน่งพีคที่ 1356 cm^{-1} (C-H) ของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และ 3330 cm^{-1} (OH) ของวัสดุชีวมวลมีความเข้มลดลง ส่วนพีคของวัสดุชีวมวลที่ลดลงที่ตำแหน่ง 1047 cm^{-1} (C-OH) (González-López et al., 2018; González-López et al., 2019; Kaewpirom & Worrarat, 2014) พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตพบความเข้มที่ช่วงพีคที่ 1144-1264 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ –C–O–C– และความเข้มพีคที่ 1714 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ C=O ของพลาสติก และ 3330 cm^{-1} (OH) ของวัสดุชีวมวลมีความเข้มลดลง (Liminana et al., 2018; Phua et al., 2013) การเปลี่ยนแปลงของพีคเหล่านี้บ่งชี้ถึงความสำเร็จในการเชื่อมประสานระหว่างวัสดุชีวมวลกับพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด และพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดของสารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์



ภาพที่ 64 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการระหว่างการผสมพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และเซลลูโลส (Kaewpirom & Worrarat, 2014)



ภาพที่ 65 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการระหว่างการผสมพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, สารคู่ควบมาเลอิกแอนไฮไดรด์ และเซลลูโลส (Liminana et al., 2018)

5.1.5 กระบวนการย่อยสลายโดยการฝังดิน

โดยทั่วไปการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดในดินจะช้า และใช้เวลานานในช่วงเริ่มต้นของการย่อยสลาย (Ohkita & Lee, 2006) โดยการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ เนื่องจากเป็นวัสดุจำพวก hydrophobic ซึ่งไม่ชอบน้ำ งานวิจัยของ Boonmee และคณะ (2016) ทำการศึกษาการย่อยสลายของแผ่นฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดที่ความหนา 0.5 มม. ภายใต้สภาวะจำลองการฝังกลบ พบว่าวันที่ 90 ที่เป็นช่วงท้ายของการทดสอบผิวของแผ่นฟิล์มมีความหยาบ, เกิดรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก และสีของฟิล์มเปลี่ยนไปจากโปร่งใสเป็นสีขาวขุ่นเนื่องจากการดูดซึมของน้ำในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Boonmee, Kositanont, & Leejarkpai, 2016) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยการย่อยสลายโดยการฝังดินของไบโอคอมโพสิตที่ได้จากแกลบ, พลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดและพลาสติกชีวภาพ PBS ที่ก่อนการฝังมีผิวค่อนข้างเรียบ แต่หลังจากผ่านการฝังที่ 180 วัน สามารถสังเกตุการกัดกร่อนจากการพบรูพรุนจำนวนมาก และแกลบยังปรากฏให้เห็นอย่างเด่นชัดเนื่องจากผิวของชิ้นงานทดสอบที่เป็นชั้นผิวพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดถูกกัดกร่อนไปเป็นตัวบ่งชี้ว่าผิวของไบโอ

คอมโพสิตถูกจุลินทรีย์ที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของดินกัดกร่อนไป (Siakeng, Jawaid, Asim, & Siengchin, 2020; Then et al., 2015; Vasile et al., 2018)

การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยน้ำ และความชื้นในดินซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ช่วยให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพ จากผลการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินพบว่าการนำวัสดุชีวมวลที่มีความชอบน้ำสูงเช่น แกลบ มาผสมกับพลาสติกชีวภาพสามารถปรับปรุงการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ PLA ได้ (Terzopoulou et al., 2016; Then et al., 2015) โดยสามารถยืนยันการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจากผลการศึกษาด้วยเทคนิค FTIR ในซึ่งพบว่าพีคที่ปรากฏขึ้นใหม่หลังการฝังที่ 180 วันคือ 1645 cm^{-1} และช่วง 3000-3650 cm^{-1} เกิดจากการดูดซับน้ำที่หมู่ -OH หรือกลุ่มไฮดรอกซิล (Mofokeng, Luyt, Tábi, & Kovács, 2012; Then et al., 2015) การลดลงของน้ำหนักหลังการทดสอบด้วยการฝังดินพบว่าไบโอคอมโพสิตสูญเสียน้ำหนักไปหลังฝังดินเป็นเวลา 180 วัน ทั้งนี้พบว่า PLARH10, PLARH20, PLARH30 และ PLAPBSRH30 สูญเสียน้ำหนักไปในอัตรา 4.8%, 6.5%, 6.3% และ 8.0% ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นสามารถบ่งชี้ได้ว่าการเพิ่มขึ้นของวัสดุชีวมวลที่มาจากธรรมชาติส่งผลต่อกลไกการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพโดยผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ถูกนำเสนอโดยนักวิจัยท่านอื่น ๆ ยืนยันว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใยธรรมชาติส่งผลให้การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพเพิ่มขึ้น (Gallardo-Cervantes et al., 2021; Huang et al., 2018) ทั้งนี้การเติมพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตส่งผลให้อัตราการลดลงของน้ำหนักเปลี่ยนแปลงไปจาก 6.3% เป็น 8.0% เนื่องจากการผสมที่ไม่เข้ากันระหว่างพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดกับพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, การเกิดผลึกลดลงก่อให้เกิดอสัณฐานในพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นจึงส่งผลต่อการย่อยสลายมากขึ้น และจากแกลบที่มีลักษณะเป็น hydrophilic มีความชอบน้ำสูงจึงสามารถดูดซึมน้ำ และจุลินทรีย์ในดินได้ง่ายเป็นเหตุให้การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น (Huang et al., 2018)

นอกจากนี้การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพยังสามารถตรวจสอบจากสมบัติเชิงกลที่ลดลงของวัสดุ ภายใน 30 วันแรกของการทดสอบการลดลงของความแข็งแรงต่อแรงดึงเทียบกับก่อนฝังดินของไบโอคอมโพสิต PLARH10, PLARH20, PLARH30 พบว่าลดลง 43%, 53% และ 56% ตามลำดับ, ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดเมื่อเทียบกับก่อนฝังดินลดลง 50%, 26% และ 30% ตามลำดับ และเมื่อนำพลาสติกชีวภาพ PBS เติมในไบโอคอมโพสิตพบว่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของไบโอคอมโพสิต PLAPBSRH30 เมื่อเทียบกับก่อนฝังดินลดลง 37% และ 18% ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อการย่อยสลายทางชีวภาพดำเนินต่อไปการยึดเกาะระหว่างพลาสติกชีวภาพกับแกลบลดลงส่งผลให้เกิดช่องว่างจำนวนมากนำไปสู่การกระจายแรงเค้นที่ไม่ดีซึ่งทำให้ความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลง และการย่อยสลายของไบโอคอมโพสิตความแข็งแรงต่อแรง

ดึง และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดยังคงลดลงตามระยะเวลาที่การย่อยสลายทางชีวภาพดำเนินไป เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพลาสติกชีวภาพถูกทำลายโดยจุลินทรีย์ในดิน หรือปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจากการดูดซับน้ำอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงเกิดช่องว่าง และจุดบกพร่องของโครงสร้างจำนวนมาก ซึ่งปรากฏบนพื้นผิวของไบโอคอมโพสิตส่งผลให้ความแข็งแรงต่อแรงดึง และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง (Obasi et al., 2013; Vasile et al., 2018; Yaacob, Ismail, & Sam, 2016)

5.1.6 การทดลองขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กระถาง

จากผลวิเคราะห์ของโปรแกรมจำลองการไหลของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดในแม่พิมพ์กระถางไม่พบปัญหาของชิ้นงานจากกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก ซึ่งสามารถนำเอาผลเคราะห์จากโปรแกรมจำลองการไหลไปทดลองขึ้นรูปผลิตภัณฑ์กระถางได้ และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทดลองฉีดขึ้นรูปไบโอคอมโพสิต PLARH10, PLARH20, PLARH30 และ PLAPBSRH30 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวทำความร้อนที่ระบบรูวิ่งร้อนในแม่พิมพ์เพียงตำแหน่งเดียว โดยจากผลการทดลองสามารถกล่าวได้ว่าพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดถูกรบกวนการจัดเรียงตัวของสายโซ่ และเมื่อเพิ่มปริมาณแกลบมากขึ้นจะส่งผลต่อการรบกสนการจัดเรียงตัวสูงขึ้น ซึ่งเป็นเหตุให้ต้องปรับตั้งอุณหภูมิหลอมที่ระบบรูวิ่งร้อนลดลง และต้องปรับตั้งลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณแกลบในไบโอคอมโพสิตสูงขึ้น (Phasawat et al., 2014)

การวิเคราะห์ราคาของไบโอคอมโพสิตแสดงราคาของสารเติมแต่ง มาเลอิกแอนไฮไดรด์, แคลเซียมสเตียเรท, แว็กซ์อี และกลีเซอรอล เป็นต้นทุนที่ค่อนข้างสูง และหากต้องการลดต้นทุนในกระบวนการผลิตจำเป็นต้องเติมแกลบให้มีปริมาณมากกว่า 20% wt. ในไบโอคอมโพสิต

5.2 สรุปผลการวิจัย

1. สามารถผลิตไบโอคอมโพสิตจากวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรกับพลาสติกที่ย่อยสลายได้ชนิดพอลิแลคติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ด้วยเครื่องหลอมอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

2. เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุชีวมวลทั้ง 3 ชนิดเข้าไปในพลาสติกชีวภาพ พบว่าสมบัติเชิงกลและอุณหภูมิหลอมของไบโอคอมโพสิตลดลง แต่อย่างไรก็ตามไบโอคอมโพสิตเหล่านี้ยังมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับนำไปผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ยอยสลายได้เองในธรรมชาติด้วยวิธีการฝังกลบ

3. สามารถนำไบโอคอมโพสิตไปผลิตเป็นชิ้นงานบรรจุภัณฑ์ได้ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป โดยเงื่อนไข และตัวแปรสำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้

จากไบโอคอมโพสิตนั้นใกล้เคียงกับการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่มาจากพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิดบริสุทธิ์

4. สามารถลดต้นทุนของพลาสติกชีวภาพเมื่อใช้ปริมาณวัสดุชีวมวลมากกว่า 20% wt. เนื่องจากราคาต้นทุนของสารเติมแต่งที่ถูกเติมเข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ที่มีราคาแพง

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ข้อแนะนำการขึ้นรูปวัสดุไบโอคอมโพสิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก

1. การขึ้นรูปวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ได้จากแกลบ, เปลือกทุเรียน และใบสับปะรด ไม่สามารถปล่อยให้วัสดุค้างกระกอกฉีดได้นาน เนื่องจากไบโอคอมโพสิตเกิดการเสื่อมสภาพจากความร้อนของกระบอกฉีดทำให้เกิดการไหม้ในกระบอกจนเป็นเหตุให้กระบอกฉีดเกิดการอุดตันได้

2. เมื่อกระบอกเกิดการอุดตันสามารถแก้ไขด้วยวิธีการนำเป็นพลาสติกที่มีความสามารถในการไหลสูง เช่น พอลิเอทิลีน และพอลิโพรพิลีน มาใช้สำหรับการเพิร์จล้างกระบอกฉีด

3. ในขั้นตอนการเพิร์จล้างกระบอกฉีดเนื่องจากการไหม้อุดตันของไบโอคอมโพสิต เป็นขั้นตอนที่ค่อนข้างอันตราย เนื่องจากอาจต้องใช้แรงดันในการดันเกลียวหนอนที่สูงมาก เสี่ยงต่อการกระเด็นโดนผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นควรแต่งกายด้วยชุดปฏิบัติงานแขนยาว และสวมแว่นตานิรภัยในขั้นตอนการเพิร์จล้างกระบอกฉีด

4. การปรับตั้งเงื่อนไข และตัวแปรสำหรับการขึ้นรูปไบโอคอมโพสิตมีข้อควรระวัง คือ การปรับตั้งค่าแรงที่ใช้ในการต้านทานการถอยกลับของเกลียวหนอน (Back pressure) เนื่องจากหากปรับตั้งสูงเกินไป เกลียวหนอนจะไม่ถอย ทำให้ไม่สามารถชาร์จวัสดุสำหรับการฉีดขึ้นรูปได้

5. การเพิ่มอุณหภูมิหลอมควรเพิ่มทีละน้อย ซึ่งไม่ควรเพิ่มเกิน 3-5 °C ต่อครั้งของการปรับตั้ง เนื่องจากไบโอคอมโพสิตเสื่อมสภาพจากความร้อนได้ง่าย

5.3.2 การศึกษาต่อไป

1. ศึกษาชนิดของสารหล่อลื่นชนิดอื่น ๆ ในปริมาณที่แตกต่างกันเพื่อหาความเป็นไปได้ในการทดลองผสม แกลบ, เปลือกทุเรียน และใบสับปะรด ที่ปริมาณมากขึ้น

2. เพิ่มการศึกษาสมบัติเชิงกลในด้านความแข็งแรงต่อการดัดงอ (Flexural strength) และความแข็ง (Hardness) ของวัสดุไบโอคอมโพสิต

3. ทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของวัสดุไบโอคอมโพสิตที่ได้จากเปลือกทุเรียน และใบสับปะรด

5.3.3 การใช้ประโยชน์จากไบโอคอมโพสิต

1. ไบโอคอมโพสิตที่ได้จากการผสมระหว่างพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด, พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร แกลบ, เปลือกทุเรียน และใบสับปะรด สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ในธรรมชาติด้วยวิธีการฝังกลบ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังสามารถลดต้นทุนของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติกชีวภาพ

2. ไบโอคอมโพสิตสามารถขึ้นรูปได้ด้วยเครื่องฉีดพลาสติกที่มีการใช้งานอยู่ในภาคอุตสาหกรรมทั่วไป อีกทั้งเงื่อนไข และตัวแปรของการฉีดขึ้นรูปวัสดุไบโอคอมโพสิตก็มีการปรับตั้งที่ใกล้เคียงกับค่าตัวแปรของพลาสติกชีวภาพ

บรรณานุกรม

A. Sreekumar, P., Leblanc, N., & Saiter, J. (2012). Effect of glycerol on the properties of 100 % biodegradable thermoplastic based on wheat flour. *Journal of Polymers and the Environment, 21*. doi:10.1007/s10924-012-0497-3

Abd El-Rahman, K. M., Ali, S. F. A., Khalil, A., & Kandil, S. (2020). Influence of poly (butylene succinate) and calcium carbonate nanoparticles on the biodegradability of high density-polyethylene nanocomposites. *Journal of Polymer Research, 27*(8), 1-21.

Alshehrei, F. (2017). Biodegradation of synthetic and natural plastic by microorganisms. *Journal of Applied & Environmental Microbiology, 5*, 8-19.

Arjmandi, R., Hassan, A., Majeed, K., & Zakaria, Z. (2015). Rice husk filled polymer composites. *International Journal of Polymer Science, 2015*.

Bisht, N., Gope, P. C., & Rani, N. (2020). Rice husk as a fibre in composites: A review. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 29*(1), 147-162.

Boonmee, C., Kositanont, C., & Leejarkpai, T. (2016). Degradation of poly (lactic acid) under simulated landfill conditions. *Environment and Natural Resources Journal, 14*(2), 1-9.

Butbunchu, N., & Pathom-Aree, W. (2019). Actinobacteria as promising candidate for polylactic acid type bioplastic degradation. *Frontiers in microbiology, 10*, 2834.

Candido, V., Castronuovo, D., & Miccolis, V. (2009). *The use of biodegradable pots for the cultivation of poinsettia.* Paper presented at the International Symposium on High Technology for Greenhouse Systems: GreenSys2009 893.

Chaiwutthinan, P., Pimpan, V., Chuayjuljit, S., & Leejarkpai, T. (2015). Biodegradable plastics prepared from poly (lactic acid), poly (butylene succinate) and microcrystalline cellulose extracted from waste-cotton fabric with a chain extender. *Journal of Polymers and the Environment, 23*(1), 114-125.

Deng, Y., & Thomas, N. L. (2015). Blending poly (butylene succinate) with poly (lactic acid): Ductility and phase inversion effects. *European Polymer Journal, 71*, 534-546.

Dimzoski, B., Bogoeva-Gaceva, G., Srebrenkoska, V., Avella, M., Gentile, G., & Errico, M. (2008). Preparation and characterization of poly (lactic acid)/rice hulls based biodegradable composites. *Journal of polymer engineering, 28*(6-7), 369-383.

Gallardo-Cervantes, M., González-García, Y., Pérez-Fonseca, A. A., González-López, M. E., Manríquez-González, R., Rodrigue, D., & Robledo-Ortíz, J. R. (2021). Biodegradability and improved mechanical performance of polyhydroxyalkanoates/agave fiber biocomposites compatibilized by different strategies. *Journal of Applied Polymer Science, 138*(15), 50182.

González-López, M., Robledo-Ortíz, J., Manríquez-González, R., Silva-Guzmán, J., & Pérez-Fonseca, A. (2018). Polylactic acid functionalization with maleic anhydride and its use as coupling agent in natural fiber biocomposites: a review. *Composite Interfaces, 25*(5-7), 515-538.

González-López, M., Pérez-Fonseca, A., Manríquez-González, R., Arellano, M., Rodrigue, D., & Robledo-Ortíz, J. (2019). Effect of surface treatment on the physical and mechanical properties of injection molded poly (lactic acid)-coir fiber biocomposites. *Polymer Composites, 40*(6), 2132-2141.

Goodhew, P. J., & Humphreys, J. (2000). *Electron Microscopy and Analysis*. London: Taylor & Francis.

Harper, C. A., & Petrie, E. M. (2003). *Plastics Materials and Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons.

Hongsriphan, N., Burirat, T., Niratsungnern, P., & Trongteng, S. (2013). Influence of calcium carbonate nanoparticles on mechanical behavior of poly (lactic acid)/poly (butylene succinate) blend. *Journal of Metals, Materials and Minerals, 23*(1), 41-47.

Huang, Z., Qian, L., Yin, Q., Yu, N., Liu, T., & Tian, D. (2018). Biodegradability studies of poly (butylene succinate) composites filled with sugarcane rind fiber. *Polymer Testing, 66*, 319-326.

Jia, W., Gong, R. H., & Hogg, P. J. (2014). Poly (lactic acid) fibre reinforced biodegradable composites. *Composites Part B: Engineering, 62*, 104-112.

Kaewpirom, S., & Worrarat, C. (2014). Preparation and properties of pineapple leaf fiber reinforced poly(lactic acid) green composites. *Fibers and Polymers, 15*(7), 1469-1477. doi:10.1007/s12221-014-1469-0

Karan, H., Funk, C., Grabert, M., Oey, M., & Hankamer, B. (2019). Green bioplastics as part of a circular bioeconomy. *Trends in plant science, 24*(3), 237-249.

Khan, A., Khan, A. A., Asiri, A. M., & Alamry, K. A. (2015). Preparation and characterization of hybrid graphene oxide composite and its application in paracetamol microbiosensor. *Polymer Composites, 36*(2), 221-228.

Kirwan, J. M. (2011). Food and Beverage Packaging Technology, Second Edition. In (pp. 213-250). New York, United States: John Wiley & Sons Inc.

Kumar, A., & Gupta, R. K. (2018). *Fundamentals of Polymer Engineering*. New York: Marcel Dekker.

Kumar, A., Tumu, V. R., Chowdhury, S. R., & SVS, R. R. (2019). A green physical approach to compatibilize a bio-based poly (lactic acid)/lignin blend for better mechanical, thermal and degradation properties. *International journal of biological macromolecules, 121*, 588-600.

Lazzari, L. K., Perondi, D., Zampieri, V. B., Zattera, A. J., & Santana, R. M. (2019). Cellulose/biochar aerogels with excellent mechanical and thermal insulation properties. *Cellulose, 26*(17), 9071-9083.

Lee, M., Koay, S. C., Chan, M. Y., Pang, M., Chou, P., & Tshai, K. Y. (2018). Preparation and characterization of durian husk fiber filled polylactic acid biocomposites. *MATEC Web of Conferences, 152*, 02007. doi:10.1051/matecconf/201815202007

Liminana, P., Garcia-Sanoguera, D., Quiles-Carrillo, L., Balart, R., & Montanes, N. (2018). Development and characterization of environmentally friendly composites from poly (butylene succinate)(PBS) and almond shell flour with different compatibilizers. *Composites Part B: Engineering, 144*, 153-162.

Mark, J. E. (1999). *Polymer Data Handbook*. New York: Oxford University Press.

Mofokeng, J. P., Luyt, A., Tábi, T., & Kovács, J. (2012). Comparison of injection moulded, natural fibre-reinforced composites with PP and PLA as matrices. *Journal of Thermoplastic Composite Materials, 25*(8), 927-948.

Murphy, J. (2001). *Additives for Plastics Handbook*: Elsevier Advanced Technology.

Obasi, H., Igwe, I., & Madufor, I. (2013). Effect of soil burial on tensile properties of polypropylene/plasticized cassava starch blends. *Advances in Materials Science and Engineering, 2013*.

Ohkita, T., & Lee, S. H. (2006). Thermal degradation and biodegradability of poly (lactic acid)/corn starch biocomposites. *Journal of Applied Polymer Science, 100*(4), 3009-3017.

Osswald, T. A., & Menges, G. (2012). *Materials Science of Polymers for Engineers*. Munich: Hanser Verlag GmbH Co KG.

Phasawat, C., bullet, V., Pimpan, b., Chuayjuljit, S., bullet, T., & Leejarkpai, T. (2014). Biodegradable plastics prepared from poly(lactic acid), poly(butylene succinate) and microcrystalline cellulose extracted from waste-cotton fabric with a chain extender. *Journal of Polymers and the Environment, 23*. doi:10.1007/s10924-014-0689-0

Phua, Y., Chow, W., & Mohd Ishak, Z. (2013). Reactive processing of maleic anhydride-grafted poly (butylene succinate) and the compatibilizing effect on poly (butylene succinate) nanocomposites. *Express Polymer Letters, 7*(4).

Qasim, A. (2019). *SOIL BURIAL DEGRADATION OF POLYPROPYLENE/ STARCH BLEND*.

Qiang, T., Yu, D., & Gao, H. (2012). Wood flour/polylactide biocomposites toughened with polyhydroxyalkanoates. *Journal of Applied Polymer Science, 124*(3), 1831-1839. doi:10.1002/app.35224

Qiu, T., Song, M., & Zhao, L. (2016). Testing, characterization and modelling of mechanical behaviour of poly (lactic-acid) and poly (butylene succinate) blends. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes, 2*(1), 1-11.

Rahmat, N. A., Ali, A. A., Hussain, N., Muhamad, M. S., Kristanti, R. A., & Hadibarata, T. (2016). Removal of remazol brilliant blue R from aqueous solution by adsorption using pineapple leaf powder and lime peel powder. *Water, Air, & Soil Pollution, 227*(4), 105.

Sanjay, M., Arpitha, G., Laxmana Naik, L., Gopalakrishna, K., & Yogesh, B. (2016). Studies on mechanical properties of banana/e-glass fabrics reinforced polyester hybrid composites. *Journal of Material and Environmental Science, 7*(9), 3179-3192.

Shah, V. (2007). *Handbook of Plastics Testing and Failure Analysis. 2007*.

Sharma, S., Singh, A. A., Majumdar, A., & Butola, B. S. (2019). Tailoring the mechanical and thermal properties of polylactic acid-based bionanocomposite films using halloysite nanotubes and polyethylene glycol by solvent casting process. *Journal of materials science, 54*(12), 8971-8983.

Shinji, O. (2011). Durability of starch based biodegradable plastics reinforced with manila hemp fibers. *Materials, 4*. doi:10.3390/ma4030457

Siakeng, R., Jawaid, M., Asim, M., & Siengchin, S. (2020). Accelerated weathering and soil burial

effect on biodegradability, colour and texture of coir/pineapple leaf fibres/pla biocomposites. *Polymers, 12*(2), 458.

Terzopoulou, Z. N., Papageorgiou, G. Z., Papadopoulou, E., Athanassiadou, E., Reinders, M., & Bikiaris, D. N. (2016). Development and study of fully biodegradable composite materials based on poly (butylene succinate) and hemp fibers or hemp shives. *Polymer Composites, 37*(2), 407-421.

Then, Y. Y., Ibrahim, N. A., Zainuddin, N., Ariffin, H., Chieng, B. W., & Yunus, W. M. Z. W. (2015). Influence of fiber content on properties of oil palm mesocarp fiber/poly (butylene Succinate) biocomposites. *BioResources, 10*(2), 2949-2968.

Thuong, N. T., Nhi, N. T. T., Nhung, V. T. C., Bich, H. N., Quynh, B. T. P., Bach, L. G., & Trinh, N. D. (2019). A fixed-bed column study for removal of organic dyes from aqueous solution by pre-treated durian peel waste. *Indonesian Journal of Chemistry, 19*(2), 486-494.

Tsou, C.-H., Hung, W.-S., Wu, C.-S., Chen, J.-C., Huang, C.-Y., Chiu, S.-H., . . . Suen, M.-C. (2014). New composition of maleic-anhydride-grafted poly(lactic acid)/rice husk with methylenediphenyl diisocyanate. *Materials Science, 20*(4). doi:10.5755/j01.ms.20.4.6034

Vasile, C., Pamfil, D., Rapa, M., Darie-Nita, R. N., Mitelut, A. C., Popa, E. E., . . . Popa, M. E. (2018). Study of the soil burial degradation of some PLA/CS biocomposites. *Composites Part B: Engineering, 142*, 251-262.

Vivaldo-Lima, E., & Saldívar-Guerra, E. (2013). *Handbook of Polymer Synthesis, Characterization, and Processing*: Wiley Online Library.

Yaacob, N., Ismail, H., & Sam, S. T. (2016). Soil burial of polylactic acid/paddy straw powder biocomposite. *BioResources, 11*, 1255-1269. doi:10.15376/biores.11.1.1255-1269

Yordem, O. S., Simanke, A. G., & Lesser, A. J. (2011). Reinforcing and toughening of polypropylene with self‐assembled low molar mass additives. *Polymer Engineering & Science, 51*(3), 550-558.

Yu, W., Dong, L., Lei, W., & Shi, J. (2020). Rice straw powder/polylactic acid biocomposites for three-dimensional printing. *Advanced Composites Letters, 29*, 2633366X20967360.

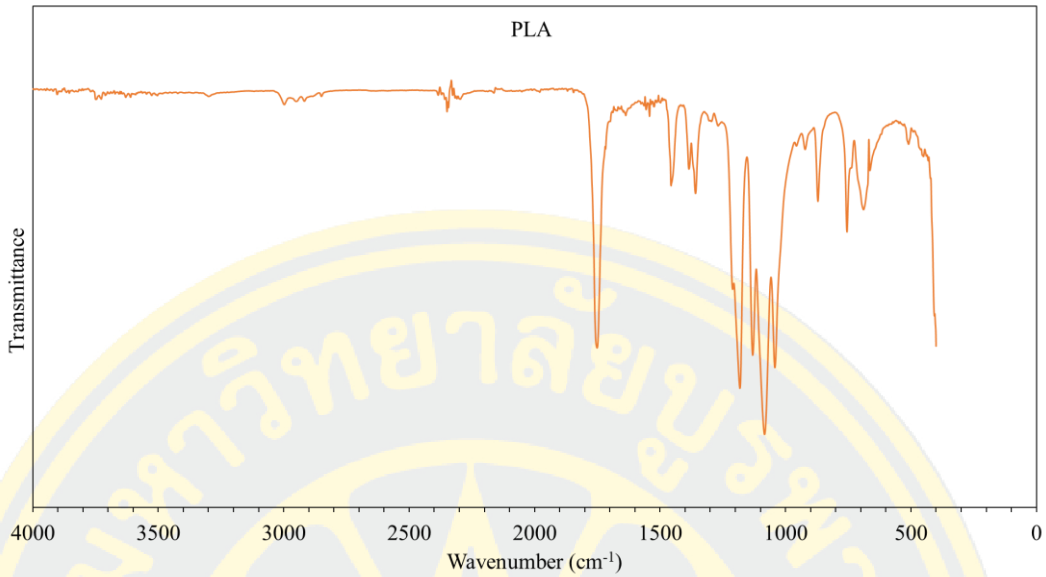
Zhan, J., Chen, Y., Tang, G., Pan, H., Zhang, Q., Song, L., & Hu, Y. (2014). Crystallization and melting properties of poly (butylene succinate) composites with titanium dioxide nanotubes or hydroxyapatite nanorods. *Journal of Applied Polymer Science, 131*(11).

สุจัยพรรณ เข็มแก้ว. (2559). ผลของกลีเซอรอล และแพค-*10* ไดเมธิโคนต่อสมบัติของฟิล์มชีวภาพจาก เปลือกทุเรียนพันธุ์หมอนทอง. (วิทยานิพนธ์(วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต)). มหาวิทยาลัยบูรพา,

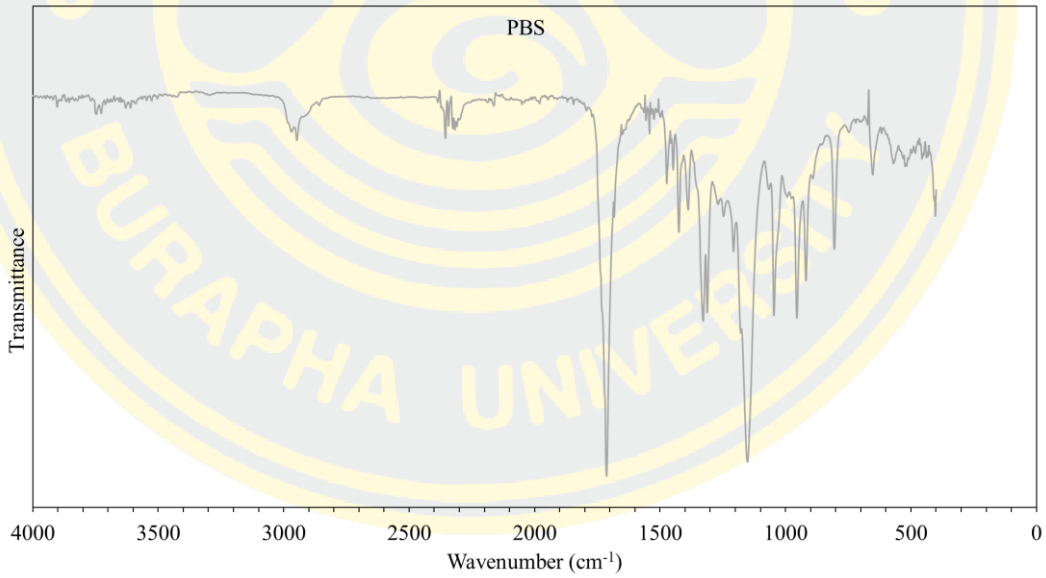
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

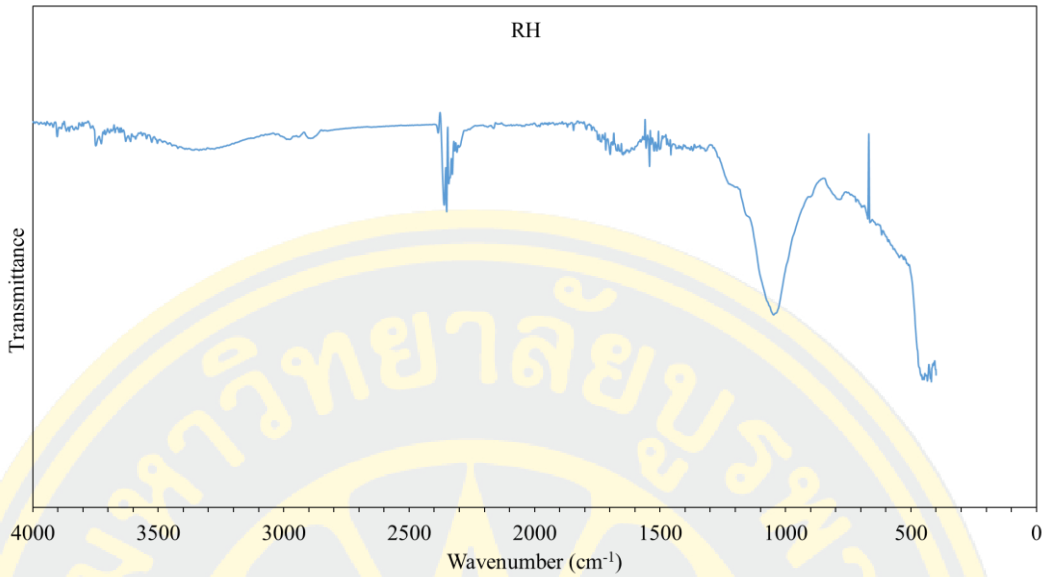
ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR



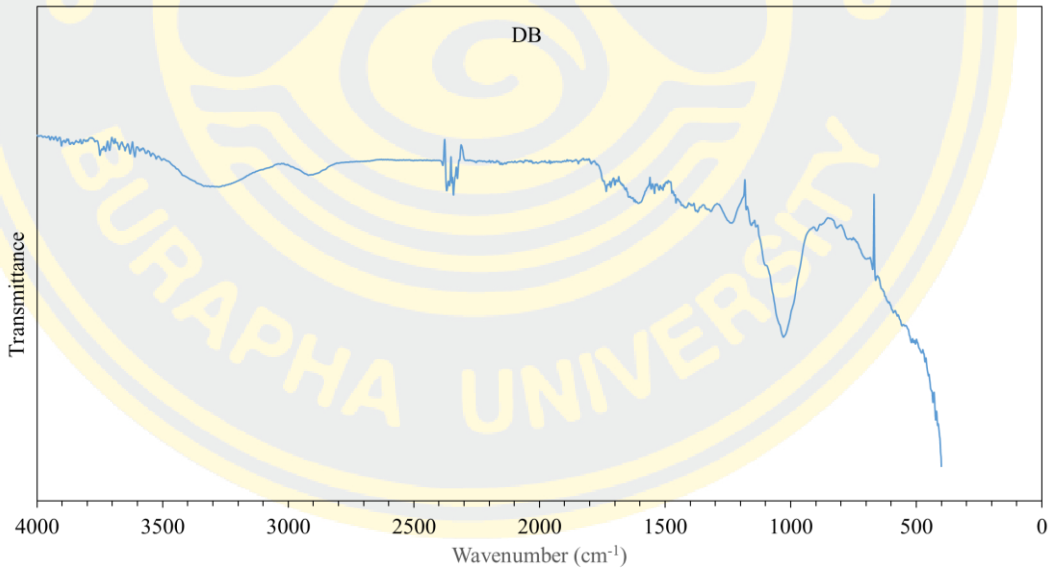
ภาพที่ 66 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด



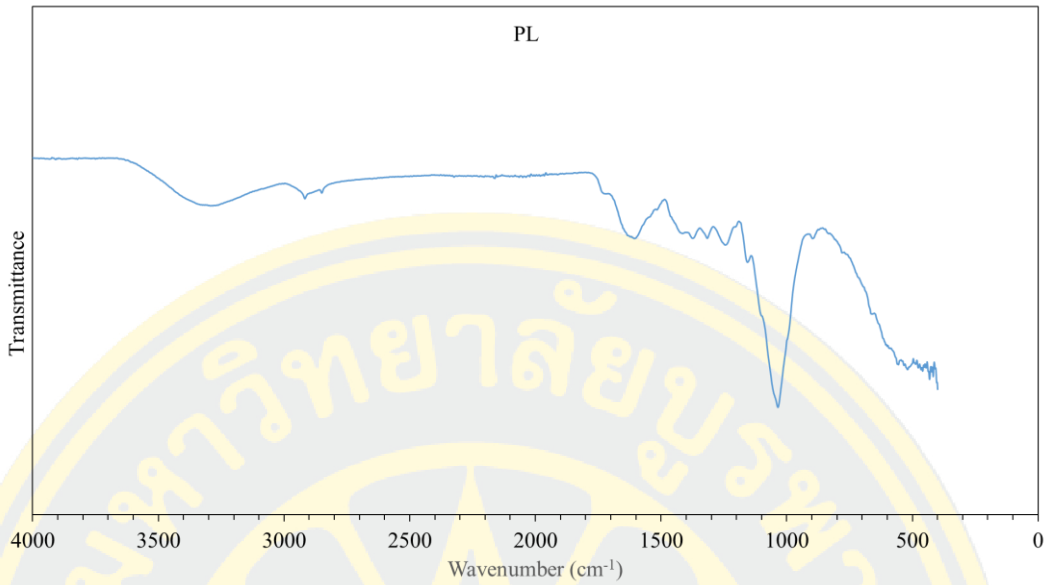
ภาพที่ 67 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต



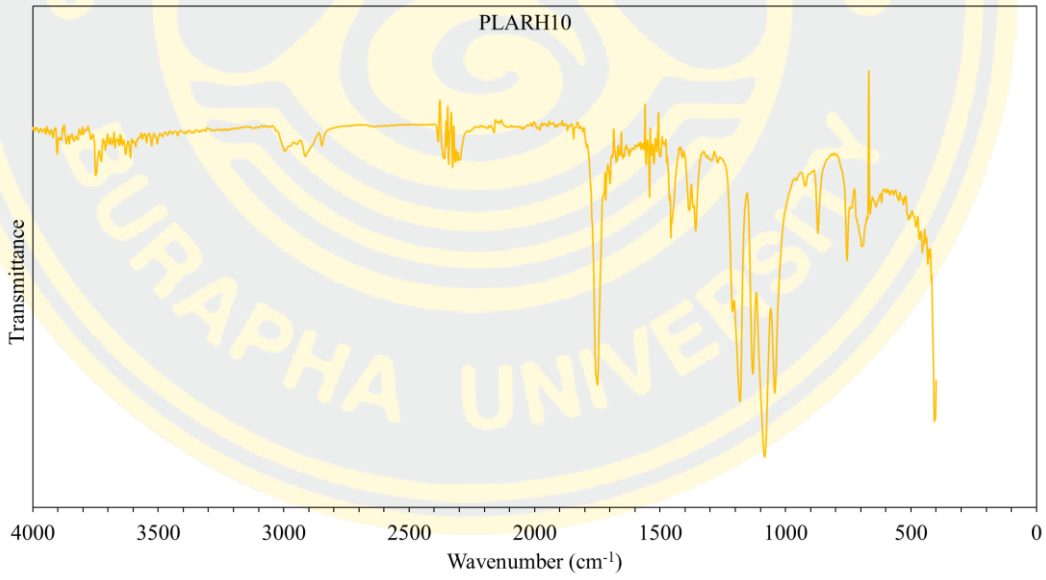
ภาพที่ 68 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของแกลบ



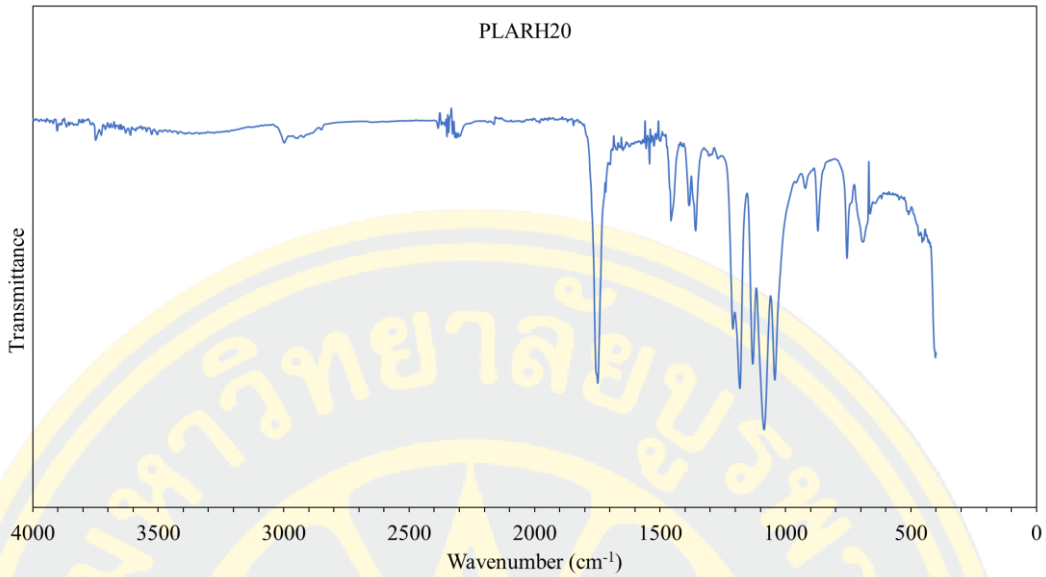
ภาพที่ 69 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของเปลือกทุเรียน



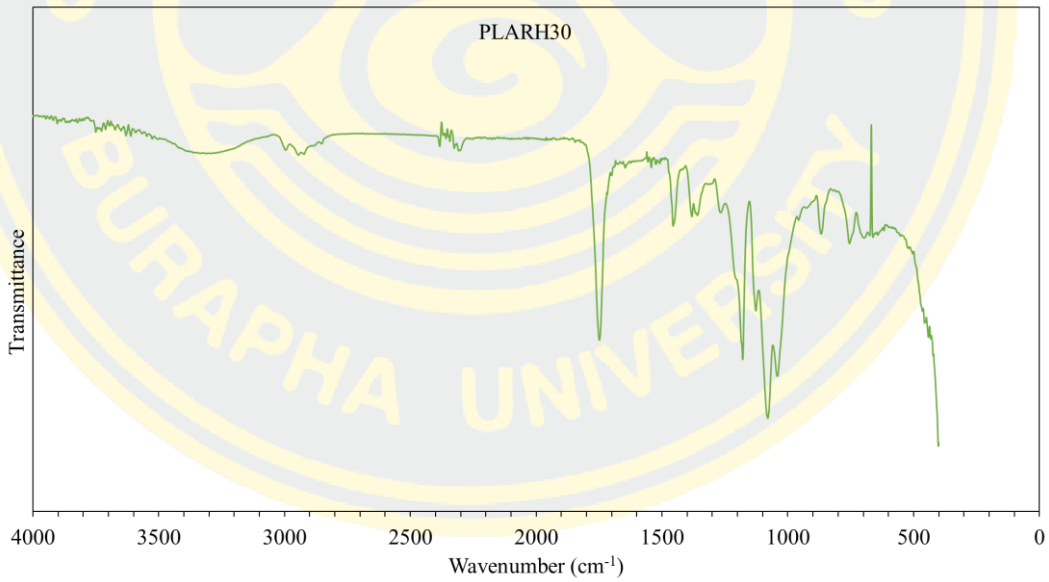
ภาพที่ 70 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของใบสับปะรด



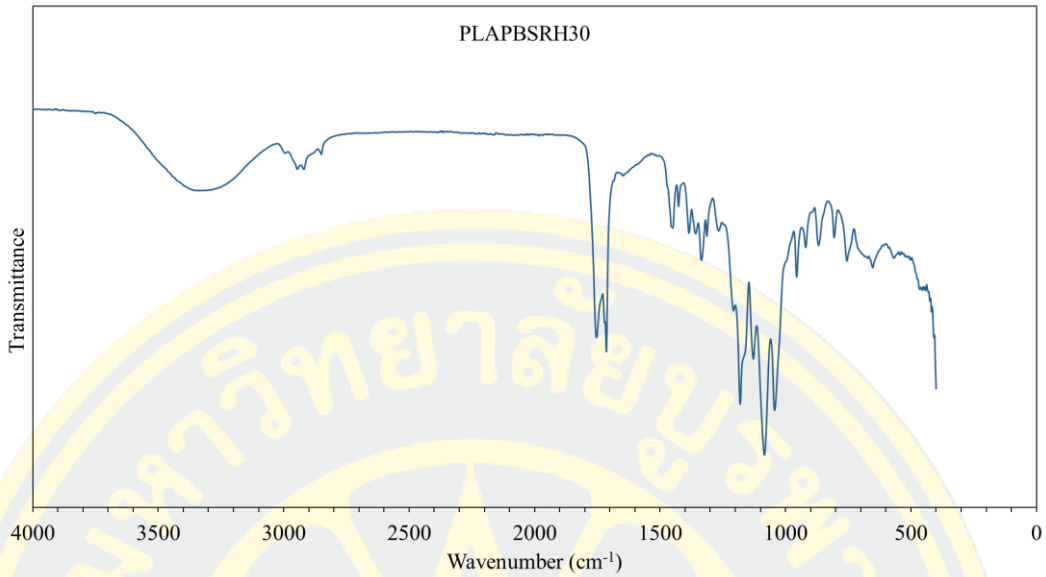
ภาพที่ 71 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLARH10



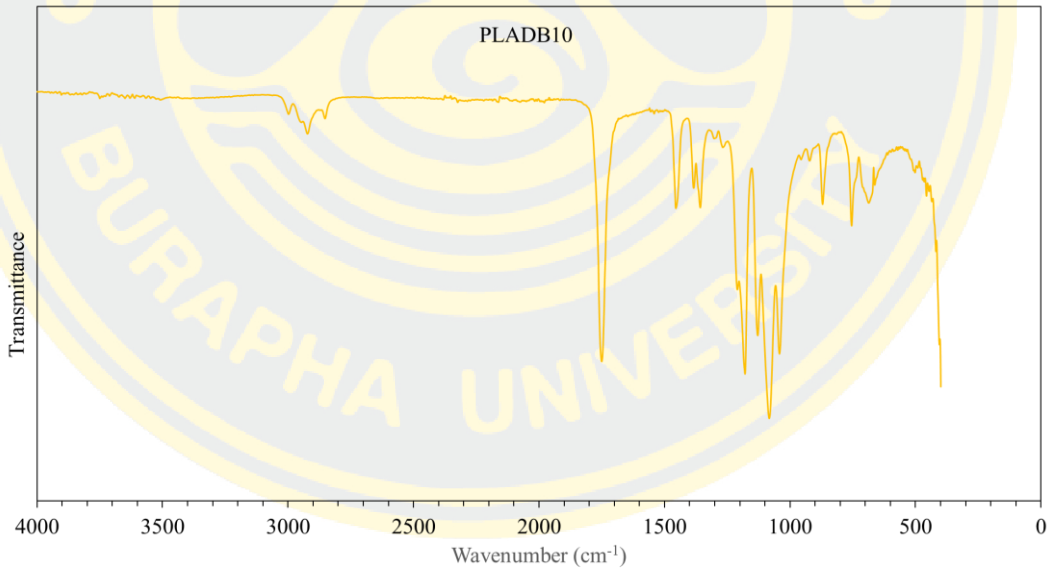
ภาพที่ 72 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLARH20



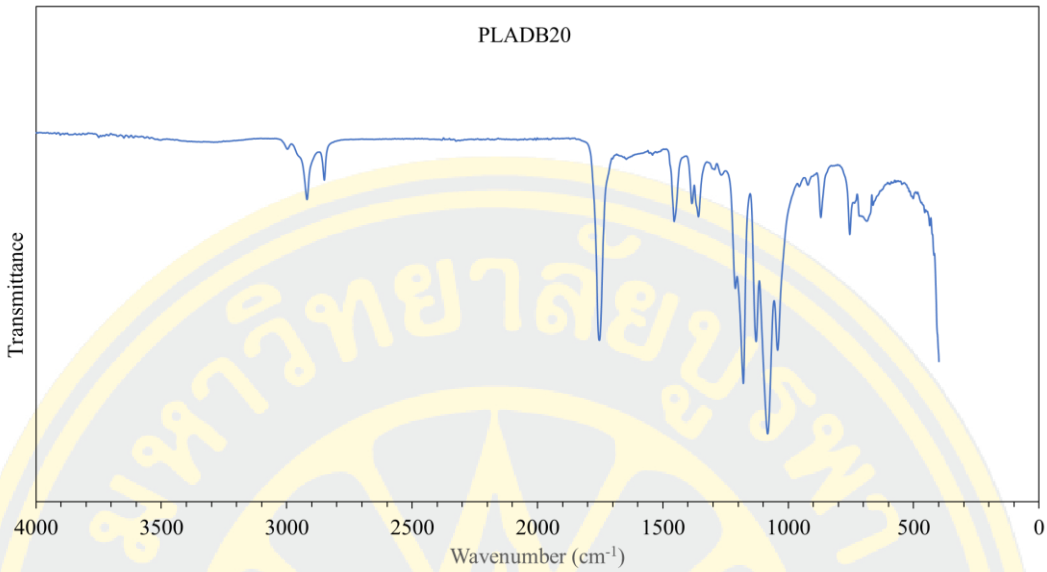
ภาพที่ 73 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLARH30



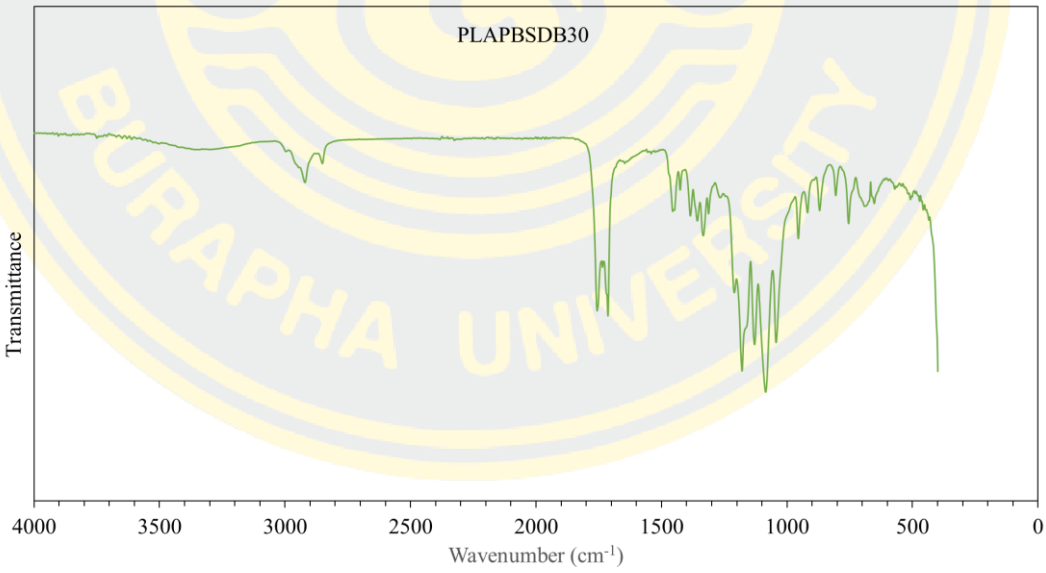
ภาพที่ 74 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLAPBSRH30



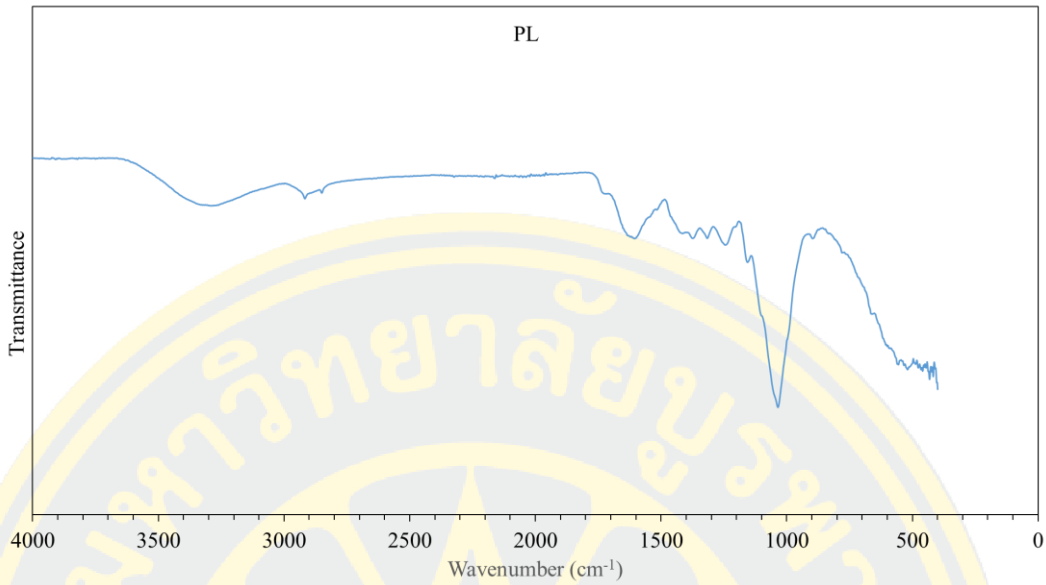
ภาพที่ 75 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLADB10



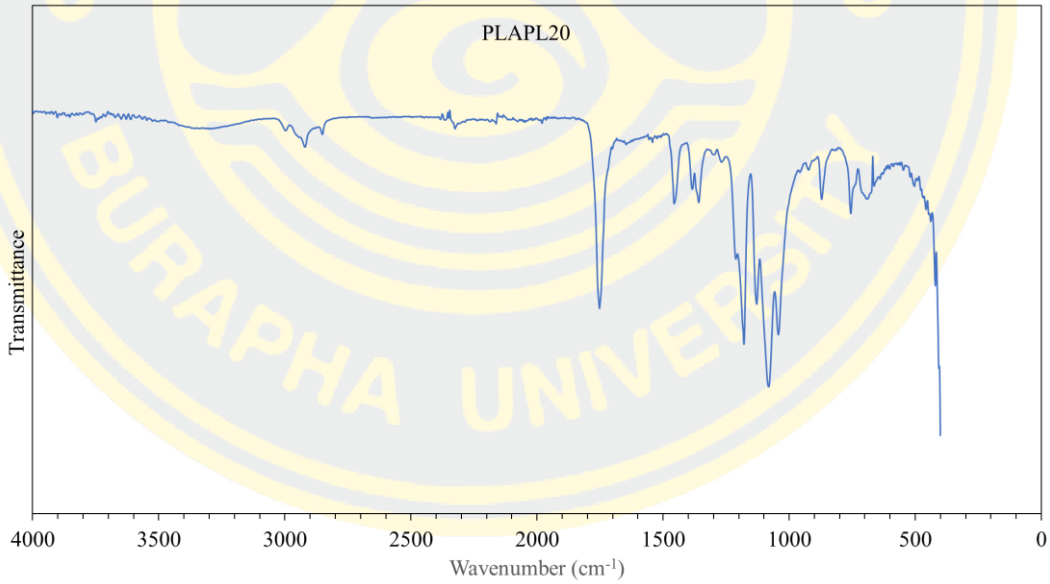
ภาพที่ 76 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLADB20



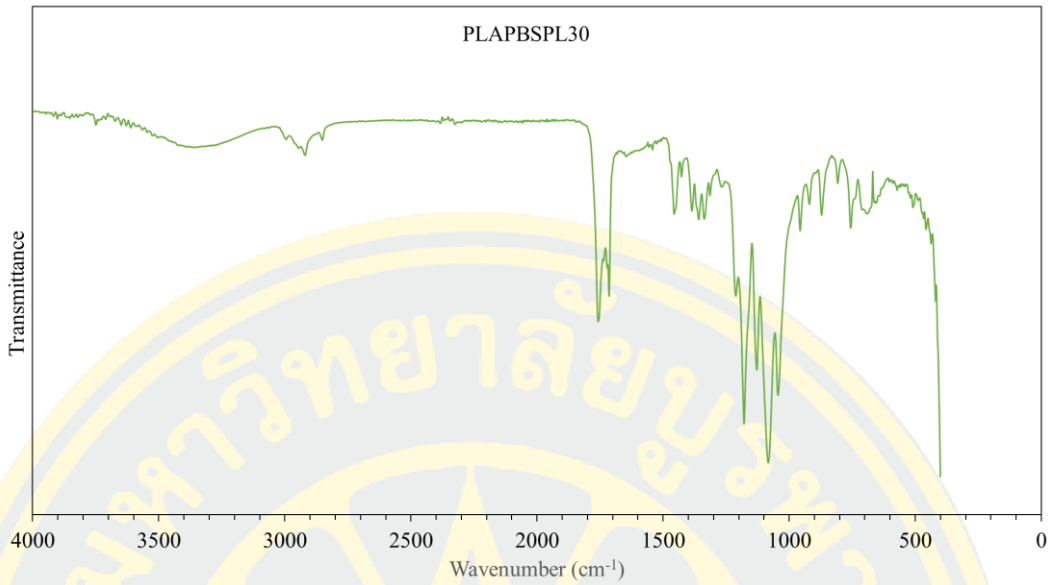
ภาพที่ 77 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLAPBSDB30



ภาพที่ 78 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLAPL10



ภาพที่ 79 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLAPL20



ภาพที่ 80 ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของไบโอคอมโพสิต PLAPBSPL30

ภาคผนวก ข

ผลงานตีพิมพ์

1. Enhanced biodegradation and processability of biodegradable package from poly(lactic acid)/poly(butylene succinate)/rice-husk green composites
2. (Proceedings) Effects of rice husk on manufacturability of bioplastic plant-pot from poly(lactic acid)/rice husk green composites

Received: 8 December 2020 | Revised: 13 February 2021 | Accepted: 15 February 2021

DOI: 10.1002/app.50652

ARTICLE

Applied Polymer SCIENCE WILEY

Enhanced biodegradation and processability of biodegradable package from poly(lactic acid)/poly(butylene succinate)/rice-husk green composites

Anan Sirichalarmkul[1,2] | **Supranee Kaewpirom**[1]

[1]Department of Chemistry, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi, Thailand

[2]Mould & Die Technology Division, Thai-German Institute, Chonburi, Thailand

Correspondence
Supranee Kaewpirom, Department of Chemistry, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi 20131, Thailand.
Email: kaewpiro@buu.ac.th

Funding information
Faculty of Science, Burapha University, Thailand; Thai-German Institute, Thailand

Abstract

This work aims to study the possibility to process PLA/PBS/RH green composites into hexagonal plant-pots employing a large-scale industrial operation using injection molding. Green composites based on poly(lactic acid) (PLA), poly(butylene succinate) (PBS), and rice husk (RH) with various RH contents (10–30%wt.) were produced successfully using a twin-screw extruder. The compatibility of RH-matrix was improved by chemical surface modifications using a coupling agent. RH was analyzed as an effective filler for PLA to develop green composites with low cost, high biodegradability, improved processability, and comparable mechanical properties as unfilled PLA. With increasing RH content, tensile modulus of the composites increased gradually. The addition of PBS, at PLA/PBS ratio of 60/40, improved the elongation at break and impact strength of PLARH30 by 55% and 7.1%, respectively. The suitable processing temperatures for PLA decreased from 220–230°C to 170–180°C when 30%wt. RH was composited into PLA matrix and were further reduced when PBS was applied. After biodegradation via either enzymatic degradation or hydrolysis, surface erosion with a large number of voids, mass loss, and the substantial decrease in tensile strength of all the composites were observed. In addition, the biodegradation of the composites has been improved by the addition of either RH or PBS.

KEYWORDS

biodegradable, biopolymers and renewable polymers, cellulose and other wood products, manufacturing, molding

1 | INTRODUCTION

Currently, demand for green composites is growing because of their improved acceptability, social concerning green products, and reduced cost of bioplastic for market competitiveness.[1] Poly (lactic acid) (PLA) is one of the most attractive bioplastics that can be obtained from natural resources. PLA is an aliphatic polyester that usually produced from two main routes: the first route is via a lactide intermediate and a second route is polycondensation.[2] PLA biodegrades under a landfill process with nontoxic residue or foreign matter left in the environment. Besides, polybutylene succinate (PBS) is a biodegradable aliphatic polyester usually synthesized from combining succinic acid and 1, 4-butanediol, and has high elongation at break and toughness.[3] To produce fully biodegradable composites, there have been increasing numbers of research focusing on the development of green

 © 2021 Wiley Periodicals LLC.

composites based on biodegradable matrix materials, such as, PLA and PBS. Natural fibers and fillers such as pineapple leaf fiber,[4] cellulose fibers,[5] bamboo,[6] chemical pulp,[7] hemp,[8] almond shell flour,[9] and wood fibers[10,11] are often used to produce green composites with reduced cost.

Among agricultural residues, rice husk (RH) is recognized as waste from rice milling industries and is not yet used to its full potential. RH is a sale at a low-price for mixing in animal feed and being burnt to make energy as well as silica. Like many other agricultural wastes, the industrial applications of RH are limited. Hence, it's worth finding alternative solutions to fully utilize this biomass. Generally, RH contains roughly 50% cellulose, 25%–30% lignin, and 15%–20% silica and can be considered as one of the natural fillers for mechanical property improvement and cost reduction of bioplastics.[12,13] This has fulfilled the emerging concept of the circular economy by adding value to agricultural waste. Moreover, this proper utilization can be a choice that contributes greatly to achieving the targets of the sustainability of waste management. In the past 10 years, it was reported that the incorporation of RH into petroleum-based polymer matrices provides advantageous characteristics, such as biodegradability, lightweight, and dimensional stability, and also makes the final products more economically reasonable.[14,15] Thus, these composites are increasingly being used as construction materials, such as, frames for windows and doors, decks, and interior panels, as well as automotive interior parts, such as, door panels and trims.[16] During that period, the incorporation of RH into PLA matrix was also investigated. As many other PLA/natural fiber composite systems,[4,17,18] the incompatibility of PLA composites due to RH hydrophilicity and PLA hydrophobicity has been solved by chemical surface modifications using a maleic anhydride coupling agent. As a result, compatibility of the RH-matrix was developed leading to enhanced mechanical properties of the composites. It was found that RH can improve the maximum tolerable, tension, tensile strength, and water absorptivity of PLA/RH composites.[19] By investigation of its complex dielectric permittivity range and loss tangent, Zawawi et al[20] confirmed that RH/PLA composites can be used for microwave applications. The improvement of the thermal and tensile properties, hardness and Charpy impact strength of RH and bleached rice husk (BRH) reinforced PLA/starch composites was assured by Mohammadi-Rovshandeh et al.[21] They confirmed that such composites could have potential use in the bioplastics and food packaging industries.

Although processing and properties of PLA/RH green composites were proposed by many research groups, there is a limited number of publications reported the incorporation of RH into fully biodegradable polymer matrices to exploit as commercially-available biodegradable packages. To develop an economically feasible process for this application on a commercial scale, injection molding, one of the most commercially used processing techniques, is considered.[22] The effectiveness of processability and biodegradation behavior of RH reinforced fully biodegradable thermoplastics are important issues and is a relatively unexplored research question. To that end, this current study focuses on the development of fully biodegradable PLA/RH composites to reduce the impact on the environment caused by long-lasting petroleum-based plastics. PLA/RH green composites with different RH contents (0, 10, 20, 30%wt.) were developed by a twin-screw extruder and RH–matrix compatibility was enhanced by chemical surface modifications using a coupling agent. RH was analyzed as an effective filler for PLA and PLA/PBS blend to develop a green composite with lower cost and comparable thermal, physical and mechanical properties as unfilled PLA. Manufacturability was optimized with Moldex 3D computer aid engineering (CAE). The CAE results were subsequently used as a reference guide in the mold trial injection process. The quantitative data for future industrial product development were reported. Finally, the biodegradability of the PLA/PBS/RH composites was examined by a soil burial test.

2 | MATERIAL AND METHODS

2.1 | Materials

Polylactic acid (PLA) 3251D (NatureWorks®) and Polybutylene succinate (PBS) FZ71PM (PTT MCC Biochem Co., Ltd.) were supplied by PTTGC PCL. Rice husk was obtained from the Northeast of Thailand. A coupling agent, MA, with >99.0% purity is from Sigma-Aldrich. This substance helps to improve the compatibility between RH and polymer matrix.[23] GLY (food-grade, 99% purity), an internal lubricant used for improving material flow in twin-screw extruder and injection process, is purchased from Chemipan, Thailand. Ca-ST and Wax-E, the external lubricants for reduce shivering while mixing in a twin-screw extruder and for increase melt flow rate of the mixed compound,[24] were supplied by Multibax Public Co., Ltd., Thailand and Oleofine Organics (Thailand) Co., Ltd., respectively. The chemical names of all the additives used cannot be disclosed due to intellectual property protection.

2.2 | Preparation of PLA/PBS/RH green composite

The appropriate amount of PLA, PBS, RH and other additives used for preparing green composites with various

RH contents (0, 10, 20, 30%wt.) using a twin-screw extruder is shown in Table 1. Prior to the processing, PLA and PBS were dried at 90 and 70°C, respectively, for 5 h. RH was washed thoroughly with tab water to eliminate dust and other impurities, dried at 80°C overnight to remove moisture, and eventually ground into powder to produce RH powder with a particle size of <600 μm. PLA, PBS, RH, and other additives were pre-mixed prior to feeding into a modular co-rotating twin-screw extruder (Labtech Engineering, Thailand). The temperatures in the barrel were set between 90–170°C. After well mixing, the molten composites was cooled down and pelletized into 3-mm pellets. The resulting green composite pellets were dried at 90°C for 5 h and kept in air-tight containers.

In this study, RH content was limited to 30%wt. because with high content of RH, the processing complexity was encountered. Practically, as RH was introduced at 40%wt., it was very difficult to transport the pre-mix composites from the feed port to the extruder barrel of the twin-screw extruder. At this stage, some of the absorbed water in the RH evaporated and condensed in the feed section of the barrel. As a result, some of the pre-mix composites could not be effectively applied to the compression section. Too high RH content has resulted in long processing cycles, partial degradation and high energy consumption. As a result, the amount of RH in our sample was limited to 30%wt.

In order to investigate the effect of PBS addition on the increase in ductility and biodegradability of PLA/RH composites, 28.7%wt. PBS was added to PLARH30. With this amount, the PLA/PBS ratio is equivalent to 60/40. According to Deng and Thomas,[25] the ductility of PLA/PBS blends improved with an increase in PBS content. The proposed results also revealed that PLA/PBS with a 60/40 ratio demonstrated a co-continuous phase structure in which certain PLA droplets were scattered within the PBS domains, resulting in a strong ductility of the blend. However, as the PBS content exceeds 40 percent weight, only a continuous PBS phase can be achieved and more defects can be found. As a result, there was a dramatic reduction in elongation at the break of the blend. Therefore, the PLA/PBS ratio of 60/40 was chosen in this study.

2.3 | Characterization

Chemical structures of PLA/PBS/RH green composites were investigated using Fourier-transform infrared spectrometer (PerkinElmer Frontier™ FTIR/NIR system), equipped with a multiple-reflection ATR attachment. For each measurement, 4 scans were co-added with a resolution of 4 cm^{-1} and wavenumbers ranged from 400 to 4000 cm^{-1}.

Tensile and impact test specimens were injection molded following ASTM D638–02a and ASTM D256-10, respectively, using ARBURG ALLROUNDER 370 U 700–70 injection molding machine. Screw diameter and clamping force were 22 mm and 700 kN, respectively. The barrel temperatures were set in the range 180–200°C, injection flow, injection pressure, and mold temperature were 25 cm^3/sec, 1200 bar and 50°C, respectively.

Tensile properties of PLA/PBS/RH green composites were measured according to the tensile test standard ASTM D638 – 02a (Standard test method for tensile properties of plastics), using Zwick/Roell Z100 tensile testing machine. The tensile testing machine was equipped with a 100 kN load cell, hydraulic specimen grips and an extensometer. The clamping of the sensor arms and the setting of the original gage length is automatic with this extensometer type. The tensile measurement was performed with a constant crosshead speed of 5 mm/min at 25 ± 3°C and 55 %RH. At least five specimens were tested and the averaged values of Young's modulus, tensile strength, and elongation at break were collected.

Izod impact energy of PLA/PBS/RH green composites was determined according to ASTM D256-10 (Standard test methods for determining the Izod pendulum impact resistance of plastics) using Charpy and Izod pendulum impact tester (Chen Yen Testing Machine, Co. Ltd., Taiwan, CY-6346). The test was carried out at 25 ± 3°C. Impact strength of a specimen was reported as Izod impact energy per notched area (KJ/m^2). At least five

TABLE 1 Material compositions for the preparation of PLA/PBS/RH green composites

	Material content (% by weight)						
Sample	**PLA**	**PBS**	**RH**	**GLY**	**Ca-ST**	**Wax-E**	**MA**
Neat PLA	100	0	0	0	0	0	0
PLARH10	87.2	0	8.7	1.7	0.8	0.8	0.8
PLARH20	78.8	0	15.7	3.1	0.8	0.8	0.8
PLARH30	71.8	0	21.5	4.3	0.8	0.8	0.8
PLAPBSRH30	43.1	28.7	21.5	4.3	0.8	0.8	0.8

specimens were tested and the averaged impact strength values were recorded.

Tensile fracture surface morphology of the tested specimens was analyzed using LEO 1450 VP scanning electron microscope (SEM). Before the observation, the surfaces were coated with a thin layer of about 10 nm of gold via sputter coating technique.

Thermal transition temperatures of the PLA/PBS/RH green composites were examined using a differential scanning calorimeter (DSC, PerkinElmer Pyris Diamond), equipped with a cooling attachment, under nitrogen atmosphere from 50 to 240°C at a constant heating rate of 10°C/min.

2.4 | Computer aid engineering simulation and mold trial

Moldex3D computer aid engineering (CAE) simulation was performed to explore the plastic molding process and mold structure design. The required process parameters were determined and were chosen to integrate with mold structure. Product design (hexagon plant-pot) and mold structure design were shown in Figure 1. The material data of the neat PLA 3251D, from the material data library of Moldex3D, were put into the simulation.[26] After that, a method was set with CAE mode and the maximum injection pressure was set at 203 MPa (maximum injection pressure of injection machine). Then the optimization was automatically calculated by Moldex3D software. CAE results can be obtained by varying injection parameters in Moldex3D software until the optimum CAE results were obtained.

Injection mold trial process was carried out using Toshiba EC 180S injection machine, equipped with a screw of 32-mm diameter. Clamping force was set at 120 ton and maximum injection pressure was 203 MPa. Injection molding parameters acquired from CAE results for neat PLA were inserted as followings: injection pressure = 112 MPa, holding pressure = 50 MPa, holding time = 3 sec, cooling time = 14 sec, and mold temperature = 40°C. The barrel-nozzle temperatures (4 zones) were set at 190, 195, 200, 210°C, and hot runner temperatures were varied between 165 to 230°C.

2.5 | Degradability by soil burial test

Soil burial test was carried out on a laboratory scale for 180 days to examine the biodegradability of the PLA/PBS/RH green composites. Dumbbell specimens (ASTM D638 Type I) were buried in plastic boxes containing gardening soil, at a depth of approximately 10 cm from the soil surface. The soil pH and temperature were 5.3 and 28 ± 3°C, respectively and the relative humidity was 85%RH. The digital photographs of the tested specimens were recorded through OLYMPUS 3Z51 optical microscope. The changes in weight, chemical and mechanical properties of the tested specimens were also examined employing gravimetric method, FTIR, and tensile testing, respectively.[27]

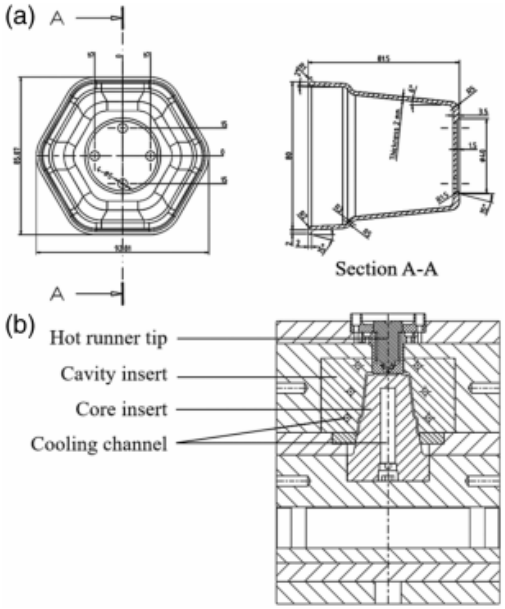


FIGURE 1 Product design of hexagon plant-pot (a) and 2D hot runner mold structure design (b)

3 | RESULTS AND DISCUSSION

3.1 | Structural characterization via FTIR

In-situ crosslinking between RH and PLA with MA coupling agent during the preparation of PLA/PBS/RH green composites via a twin-screw extruder at high temperatures was investigated by FTIR and the results are shown in Figure 2 (Figure S1, for clarity). RH shows typical absorption bands of cellulose at 3330 cm^{-1} (—OH stretching), 2890 and 2970 cm^{-1} (C—H vibration) and 1047 cm^{-1} (C—OH stretching) and the absorption peak of silica at 780 cm^{-1} (Si—O—Si stretching).[28] Typical absorption bands of neat PLA were found at 2999 cm^{-1} (asymmetric stretching vibration of C—H from —CH_3),

1752 cm^{-1} (—C═O stretching of aliphatic ester), 1454 and 1386 cm^{-1} (asymmetric and symmetric bending vibration of C—H from $—CH_3$), 1356 cm^{-1} (bending vibration of —CH), 1182 and 1082 cm^{-1} (asymmetric and symmetric stretching of C—O—C), and 1043 cm^{-1} (stretching of C—OH).[29–32]

During melt blending at high temperatures in a twin-screw extruder, MA can graft onto both RH and PLA chains. FTIR spectra analysis indicated that the crosslinking occurred between the methine (—CH) groups of PLA and the vinyl groups (—CH═CH—) of MA through creating a new C—C linkage. Moreover, the crosslinking between C—OH groups of RH and the anhydride groups of MA was also taken place. As a result, there was a reduction in the intensity of a peak at 1356 cm^{-1} (bending vibration of —CH) in PLA, and the reduction in both the intensity of a peak at 3330 cm^{-1} (stretching vibration of —OH) and a peak at 1047 cm^{-1} (C—OH stretching) in RH. This change was observed in the FTIR spectra of PLARH10 and PLARH20. Although the reduction of —CH vibration peak was found in PLARH30 and PLAPBSRH30, the intensity of stretching vibration of —OH was enhanced and shifted to relatively higher wavenumbers. This was due to the stretching of intermolecular hydrogen bonds of hydroxyl groups in RH.[33] Besides, the presence of the wide absorption peak was due to the existence of moisture in the sample that was not completely removed due to the hydrophilic character of RH. Conclusively, the FTIR results showed the successful crosslinking of RH onto PLA backbone with the use of MA as a compatibilizer. The results are in good agreement with those reported in literature.[4,17,18]

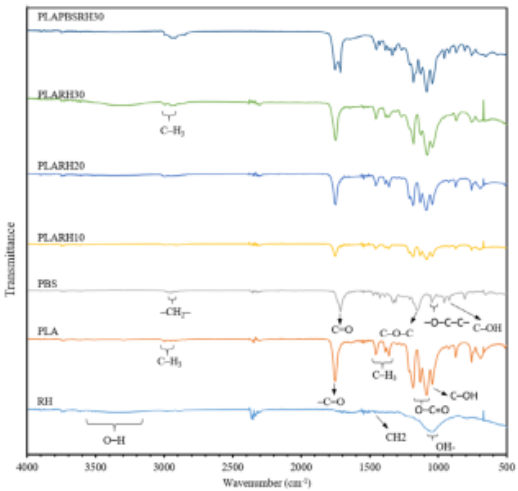


FIGURE 2 FTIR spectra of RH, neat PLA, neat PBS, and PLA/PBS/RH green composites [Color figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

FTIR spectra of neat PBS shows typical absorption peak at 2947 cm^{-1}, attributed to the asymmetric stretching vibration of $—CH_2—$ groups. The peak at 1714 cm^{-1} was attributed to the C═O stretching vibration of ester groups. The peak at 1330 cm^{-1} was assigned to the symmetric stretching vibration of $—CH_2—$ groups. The peak at 1150 cm^{-1} resulted from the stretching of the —C—O—C— groups in the ester linkages. The peak at 1046 cm^{-1} was due to —O—C—C— stretching vibration and bending vibration of C—OH in carboxylic acid groups was found at 918 cm^{-1}. It was reported by Phua et al.[34] that MA can be grafted onto PBS via the reactive grafting process that was carried out in an internal mixer at 135°C for 7 min. Furthermore, this reaction can be evidenced in FTIR spectra, showing obvious signals at the transmittance bands of 1780 and 1849 cm^{-1} in the grafted PBS, while these bands were absent in the neat PBS. However, in our study, there was no evidence of such the chemical reactions occurring in PLAPBSRH30. This may be due to the relatively less amount of PBS in the composite compared with the amount of PLA.

3.2 | Morphology

Tensile fracture surface morphologies of neat PLA, neat PBS, and PLA/PBS/RH green composites are shown in Figure 3. Not surprisingly, neat PLA displayed a clean and homogeneous surface, indicating its brittle behavior. This is typical for semi-crystalline PLA.[25] On the other hand, neat PBS showed tear marks on tensile fractured surface (as circled in Figure 3(b)) and that can be considered as its ductile behavior.[35,36] Blending RH and other processing additives into the pristine PLA (Figure 3(c-e)) resulted in the rough fractured surface due to the phase separation between RH and PLA. Moreover, RH was meagerly covered with the PLA matrix indicating unwell filler-polymer adhesion. However, the adhesion between the two phases can be improved by the addition of MA coupling agent.[2,23,24] By blending 10%wt. of RH into the neat PLA, the sufficiently well dispersion of RH particles were observed throughout the PLA matrix. The aggregation of RH particles themselves as well as the gaps between RH and PLA matrix were hardly detected (as circled in Figure 3(c)). This was because MA modification lessened the self-aggregation ability of RH by partial substitution of the hydroxyl groups. This result pointed out that the addition of MA partly improved the dispersion of RH in PLA matrix. The crosslinking of RH onto PLA backbone with the use of MA as a compatibilizer enhanced the interface bonding strength

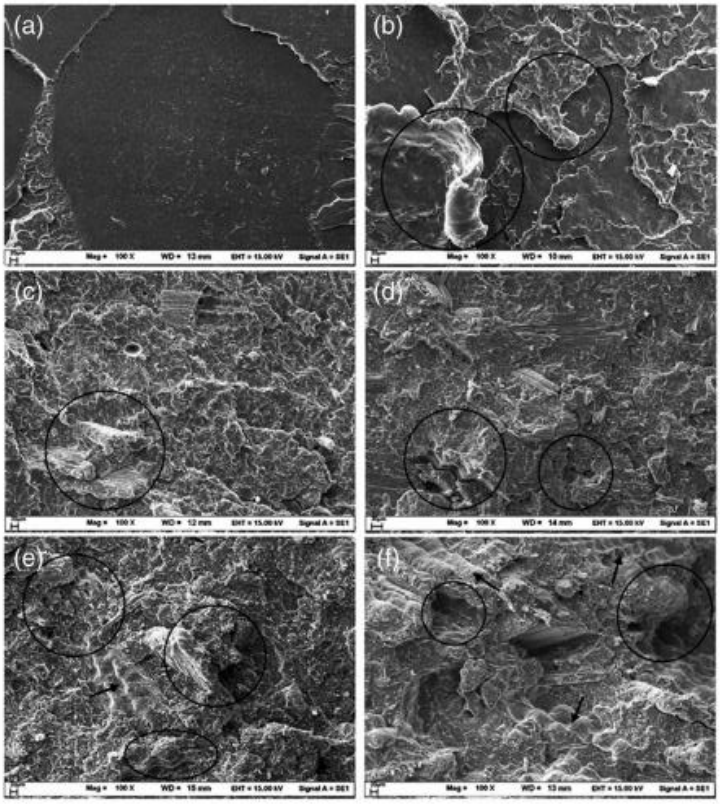


FIGURE 3 SEM micrographs showing the microstructures of tensile fractured surfaces of neat PLA (a), neat PBS (b) and PLARH10 (c), PLARH20 (d), PLARH30 (e), and PLAPBSRH30 (f) green composites

between RH and PLA, preventing RH particles from being pulled out from PLA matrix during the stretch. However, the process did not completely change the hydrophilic nature of RH. With the addition of 20–30%wt. RH, some aggregation of RH particles and gaps between RH and PLA matrix were witnessed (as circled in Figure 3(d-f)). Furthermore, RH particles were pulled out from PLA matrix during the stretch. The possible reason was that the amount of MA was fixed at 0.8%wt., while RH content increased from 10%wt. up to 30%wt. Hence, only a fixed quantity of RH was in-situ cross-linked with PLA matrix leaving the rest uncross-linked. Similar findings were observed by González-López et al.[37] who reported that agave fiber coating with maleated PLA (MAPLA) is an effective technique to increase the amount of fiber that could be integrated into rotomolded biocomposites with improved mechanical properties with a fiber content of 20% wt. However, biocomposites with a fiber content of more than 20% wt. showed a decline in mechanical properties.

In general, melt blending of PBS with PLA would appear to be an ideal route for improving the toughness of PLA. Hence, the brittle behavior of the PLA/RH composites can be improved by introducing PBS, a ductile aliphatic biodegradable polyester, into the system. In this study, PBS was melt blended with PLA and PLAPBSRH30 was produced. Like PLARH30, the fractured surface of PLAPBSRH30 showed a sufficiently well dispersion of RH particles with some aggregation of RH particles and gaps between RH and polymer matrix. However, the brittle behavior of the composites was diminished by the ductile characteristic of PBS as a relatively smoother fractured surface of PLAPBSRH30 was shown. The morphological phenomenon also explained the mechanical property improvement of PLA/PBS/RH green composites, as discussed in the next section.

3.3 | Mechanical properties

It's well known that the phase morphology of a polymer composite is an important factor determining its mechanical properties. The results of impact strength, tensile modulus, tensile strength and elongation at break of the

neat PLA, neat PBS and the proposed green composites are plotted in Figure 4.

A rigid PLA shows impact strength, tensile modulus, tensile strength and elongation at break of 26.1 KJ/m^2, 2.4 GPa, 57.4 MPa and 2.1%, respectively. The values are in the range of those reported in literature.[2,25,38] From the plots, it can be seen that impact strength, tensile modulus, tensile strength and elongation at break of PLA decreased apparently by 18%, 20%, 59%, and 52%, respectively, with the addition of 10%wt. RH in the PLA/RH composite. These results are what expected on adding a hydrophilic, rigid filler to a hydrophobic, rigid, brittle polymer. Although 0.8%wt. of MA coupling agent was introduced to the composites, it is worth noting that the composites' strength decreases as a consequence of the lack of sufficient interfacial bonding. The irregular shape of RH also decreased the strength of the composites due to its inability to support stress transfer from the polymer matrix.[2] Furthermore, the agglomerates of RH particles in the PLA matrix was responsible for those dropped values.[39] With increasing concentration of RH in the composites from 10 to 30%wt., the tensile modulus of the composites increased gradually, while other mechanical properties are maintained. The hard and rigid characters of RH may be responsible for the increased tensile modulus.

To improve the ductility of the composite, PBS was introduced into the PLARH30 system. The effect of PBS on the mechanical properties of PLAPBSRH30 in comparison with PLARH30 was investigated and the results were shown in Figure 4. The figure shows that PBS can enlarge the elongation at break and impact strength of PLARH30 by 55% and 7.1%, respectively. However, when being compared with PLARH30, tensile strength and tensile modulus of PLAPBSRH30 were cut by 19% and 29%, respectively. This could be related to the nature of PBS itself, providing its inherent flexibility, high impact strength (29.6 KJ/m^2), low tensile strength (35.7 MPa), and low modulus (862 MPa).[35,40,41] Even though SEM micrograph (in the previous section) shows that PBS is compatible with PLA, naturally PBS and PLA are not miscible. The decrease in the tensile strength and tensile modulus may also be due to the poor interfacial interaction between PLA and PBS, leading to the incomplete stress transfer between the phases.

Conclusively, an agricultural waste as RH can be recycled for producing biodegradable green composites with acceptable mechanical properties. The addition of PBS to PLA/RH composites was a worthy choice for increasing the elongation at break and the impact strength of the composite.

3.4 | Thermal properties

Differential scanning calorimetry (DSC) measurement was carried out to observe the effect of the addition of RH on thermal transition properties of PLA/RH composites as well as the effect of the addition of PBS on PLA/PBS/RH composite. The thermal transition behavior of PLA/PBS/RH composites, especially melting temperature (T_m), had to be considered in the preparation of the composites as well as the production of bioplastic package using injection molding. Figure 5 shows the typical DSC thermograms of PLA/PBS/RH green composites.

Neat PLA shows T_m at 165°C, while neat PBS shows T_m at 111°C. These DSC results are in good accordance with those reported in the literature. From literature, PBS has a melting temperature range of 109–117°C,[25,42,43] while PLA has a melting temperature range of

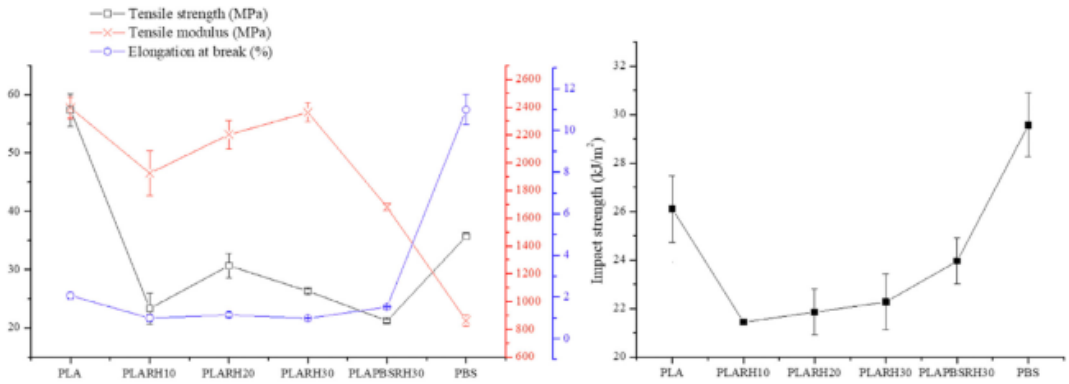


FIGURE 4 Tensile and impact properties of neat PLA, neat PBS, and PLA/PBS/RH green composites [Color figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

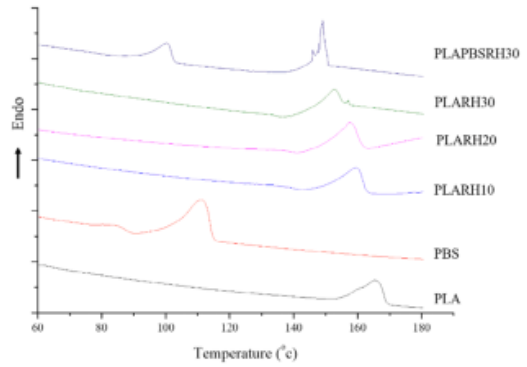


FIGURE 5 Typical DSC thermograms of the neat PLA, neat PBS, and the green composites [Color figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

154–171°C.[13,25,38,42] With the addition of RH, T_m of PLA shifted to lower temperatures with respect to RH content. That is the T_m of PLA moved from 165°C to 159, 157, and 152 °C when RH content increased from 0 to 10, 20, and 30%wt., respectively. It is well known that T_m depends primarily on molecular weight, chain branching, intermolecular attraction, and steric effects. The addition of RH with an irregular shape may interfere with the crystallization process of the PLA, creating difficulty in chain rearrangement and disrupting the intermolecular attraction between the PLA chains themselves. Moreover, the chain mobility of PLA has been increased, owing to the plasticizing effect of GLY plasticizer.[44] This is corresponded with the increased impact strength, as discussed in the previous section.

The melting endothermic peaks of PBS component and PLA component in the PLAPBSRH30 composites were found at 100 and 149°C, respectively. As we mentioned earlier that even though PBS is compatible with PLA, naturally PBS and PLA are not miscible. As a result, the composites show two melting peaks, indicating that PLA and PBS were thermodynamically immiscible.[41] The substantial decrease in T_m of PLA in the PLAPBSRH30 composite does suggest that PBS has some restricted miscibility with PLA. In comparison, the existence of PBS had a significant impact on the T_m of PLA. Qiu et al.[41] also reported that T_m of PLA decreased from 148 to 145°C when 30% percent of PBS was added to the PLA/PBS blend. Like what happens in PLA, RH is believed to be responsible for the declining in T_m of PBS. Overall, the DSC results suggest that the processing temperatures for PLA/RH composites is supposed to be reduced accordingly, as RH content increased. Further reduction in the processing temperature is expected when PBS was introduced into the composites, as discussed in the next section.

3.5 | Manufacturability

To assess the potential for industrial use of green composites, the study of the possibility to be produced by the conventional manufacturing process is very important. Injection molding is a processing method to achieve molded products by injecting heat-molten plastic materials into a mold, and then cooling and solidifying them. The method is suitable for the mass production of products with complex shapes and is widely used in the plastic processing industry.

To study the possibility to process PLA/PBS/RH green composites into finished products, especially employing a large-scale industrial operation using injection molding, computer aid engineering (CAE) simulation was applied. Basically, during processing, the dynamic behavior of the main material penetration in an injection molding is a complicated issue, involving many factors such as flow rate, material properties and mold design. The interactions between these factors result in the difficulty to achieve a uniform distribution by simply changing the process condition parameters. Therefore, applying CAE simulation is a reliable way to quickly identify and fix potential problems before manufacturing.[45,46] In this study, a hexagonal plant-pot mold was designed and injection molding parameters suitable for PLA material were optimized by Moldex3D CAE simulation (Figure S2). The material data of neat PLA obtained from the supplier, for example, melt flow index, melt temperature range, viscosity, Poisson's ratio, PVT diagram, heat capacity, thermal conductivity, freeze temperature, and so on. were put into the simulation. The optimum values of injection molding parameters obtained from CAE results are tabulated in Table 2. Subsequently, the CAE results were used as reference guidance in mold trial injection process for all PLA/PBS/RH green composites.

A mold trial is a process by which a new mold is optimized to produce the desired products as efficiently as possible. In our study, Toshiba EC 180S injection machine, equipped with a 32-mm diameter screw, was used for mold trial. The machine has a maximum clamping force and a maximum injection pressure of 120 ton and 203 MPa, respectively. During the trial process, hot runner temperatures were varied between 165–200°C, while other injection parameters were fixed as the same quantities as those used for processing of neat PLA. At least 10 plant-pot samples were injection molded for a fixed hot runner temperature. The suitable temperatures for producing hexagonal plant-pot with

acceptable appearance (Figure S3) were recorded and shown in Table 3.

As seen in Table 3, the suitable hot runner temperatures decreased when RH was composited into PLA matrix. Moreover, as the RH content increased such the suitable processing temperatures reduced accordingly. The further reduction in the suitable hot runner temperatures was also found when PBS was blended into the composite. This was because the melting temperature of PBS is relatively low compared with that of PLA and PLA/RH composites. As far as we know, enhancement of processability of agricultural residue reinforced thermoplastics is an important issue, as the addition of heterogeneous fillers reduces the flow properties of the composites considerably. In contrast, our results revealed that the flow properties of the PLA/RH composites improved when RH content increased, resulting in the reduced processing temperatures. However, this phenomenon could also be attributed to the inclusion of GLY, an internal lubricant, because the ratio of RH:GLY was set at 5:1 for all composites in order to facilitate manufacturing. During manufacturing, GLY helped to minimize friction and adhesion between polymer–RH, RH–RH and RH–metal and to increase the flow characteristics of the composites. Therefore, the incorporation of processing aid, for example, GLY plasticizer, Ca-ST and WAX-E lubricants, was believed to be responsible for such improved processability by reducing the viscosity of the molten composites as well as their melting temperatures.[23,41] Therefore, processability enhancement, while retaining and/or improving the performance properties, of the PLA/PBS/RH green composites was achieved and was considered as an economical process and can be an added advantage for the agricultural waste composite industry.

TABLE 2 Summary of optimum injection molding parameters for neat PLA, obtained from Moldex3D CAE simulation results

Optimum injection molding parameters	
Clamping force (ton)	15.6
Injection pressure (MPa)	36.4
Holding pressure (MPa)	19.1
Holding time (sec)	3.64
Cooling time (sec)	14.2
Mold temperature (°C)	40
Melt temperature (°C)	188

3.6 | Biodegradability study by soil burial test

It has been previously reported in the literature that PLA can degrade to carbon dioxide, water, and methane in the environment over a period of several months to 2 years, depending on the environment to which it is exposed.[47,48] Generally, the degradation of PLA in the soil is slow and takes a long time to start.[49] To date, the slow degradation of PLA due to its hydrophobicity could be improved by the introduction of hydrophilic fillers into PLA matrix.[11,50] In this present work, RH, the hydrophilic agricultural waste, was introduced into PLA and the biodegradability of PLA/PBS/RH green composites was studied by measuring their visual change, chemical structure alteration, reduced weight and deteriorated tensile properties in a gardening soil burial test, lasting for 180 days. The results are presented in Figure 6–7.

TABLE 3 Injection molding parameters used for hexagonal plant-pot mold trial

	Green composites				
Injection parameters	PLA	PLARH10	PLARH20	PLARH30	PLAPBSRH30
Clamping force (ton)	16	16	16	16	16
Injection pressure (MPa)	112	112	112	112	112
Holding pressure (MPa)	50	50	50	50	50
Holding time (sec)	3	3	3	3	3
Cooling time (sec)	14	14	14	14	14
Mold temperature (°C)	40	40	40	40	40
Barrel temperature (zone 1, °C)	190	190	190	190	190
Barrel temperature (zone 2, °C)	195	195	195	195	195
Barrel temperature (zone 3, °C)	200	200	200	200	200
Nozzle temperature (zone 4, °C)	210	210	210	210	210
Hot runner temperature (°C)	220–230	190–200	180–190	170–180	165–170

To visualize the morphological changes that occurred due to the degradation process in gardening soil, digital images, and optical micrographs of neat PLA and PLA/PBS/RH green composites before and after soil burial test were taken and shown in Figure 6. Before the soil burial test, the neat PLA had a smooth and clear surface. After 180 days of testing, surface roughness, and pores emerged on the surface of the PLA. In comparison, there was a small change in the color of the specimen from transparent to opaque white. A similar finding was also proposed by Boonmee et al[51] who researched the deterioration of the 0.5 mm PLA sheet under simulated landfill conditions. They discovered that at the end of their burying test (90 days) the PLA surface had been completely rough with several micro-pores and the film color had changed from transparent to white due to the absorption of water during hydrolysis. In addition, it was clear that all the PLA/PBS/RH composites exhibited a relatively smooth surface before the soil burial test. After 180 days of biodegradation, surface erosion, as well as a large number of voids, were observed. RH also appeared clearly due to the loss of the polymer matrix layer. This indicates that the surface of all the composites can be partially consumed by the microorganisms presenting in a soil environment. Besides, hydrolysis by absorbed soil water is believed to be taken part in the biodegradation process, which is in good agreement with FTIR results (as discussed in a later part of this section). Hence, this

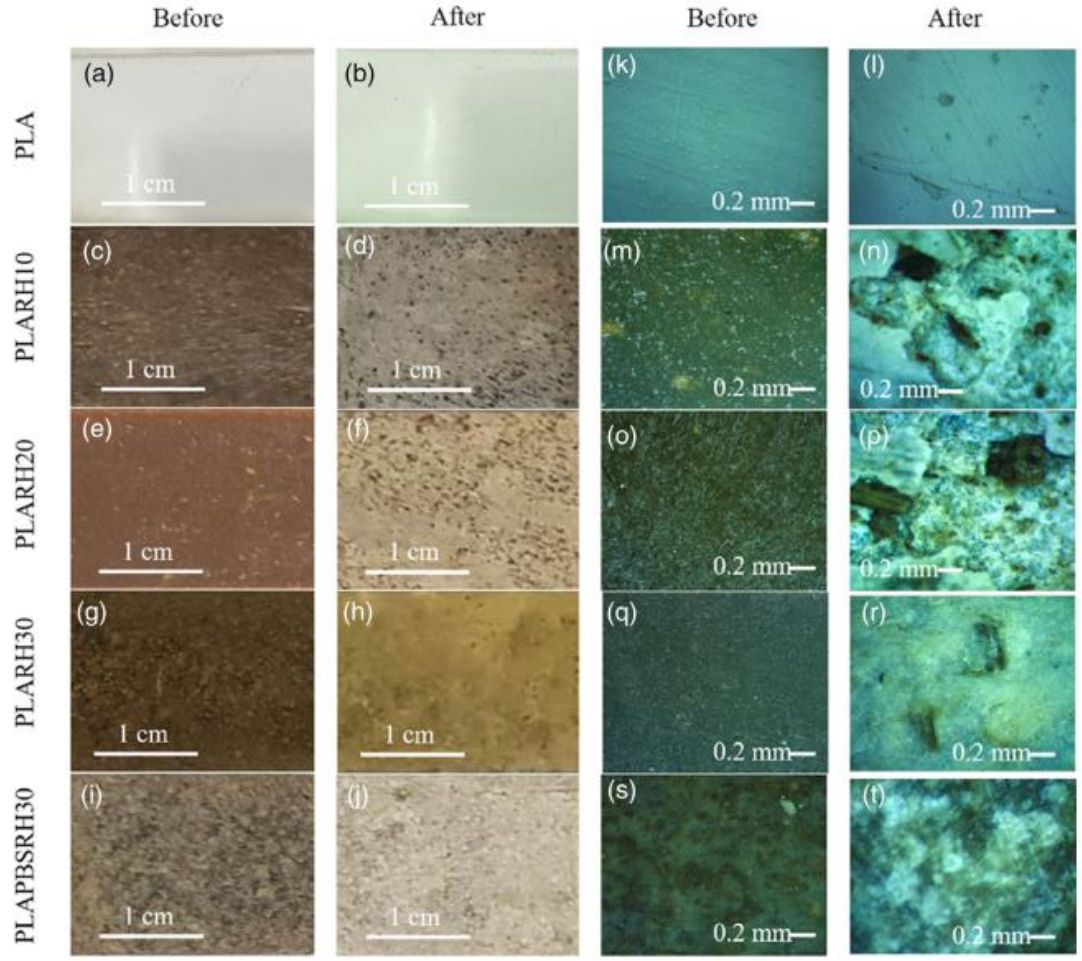


FIGURE 6 Digital images (a-j) and optical micrographs (100× magnification) (k-t) of neat PLA and PLA/PBS/RH green composites before and after soil burial test for 180 days [Color figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

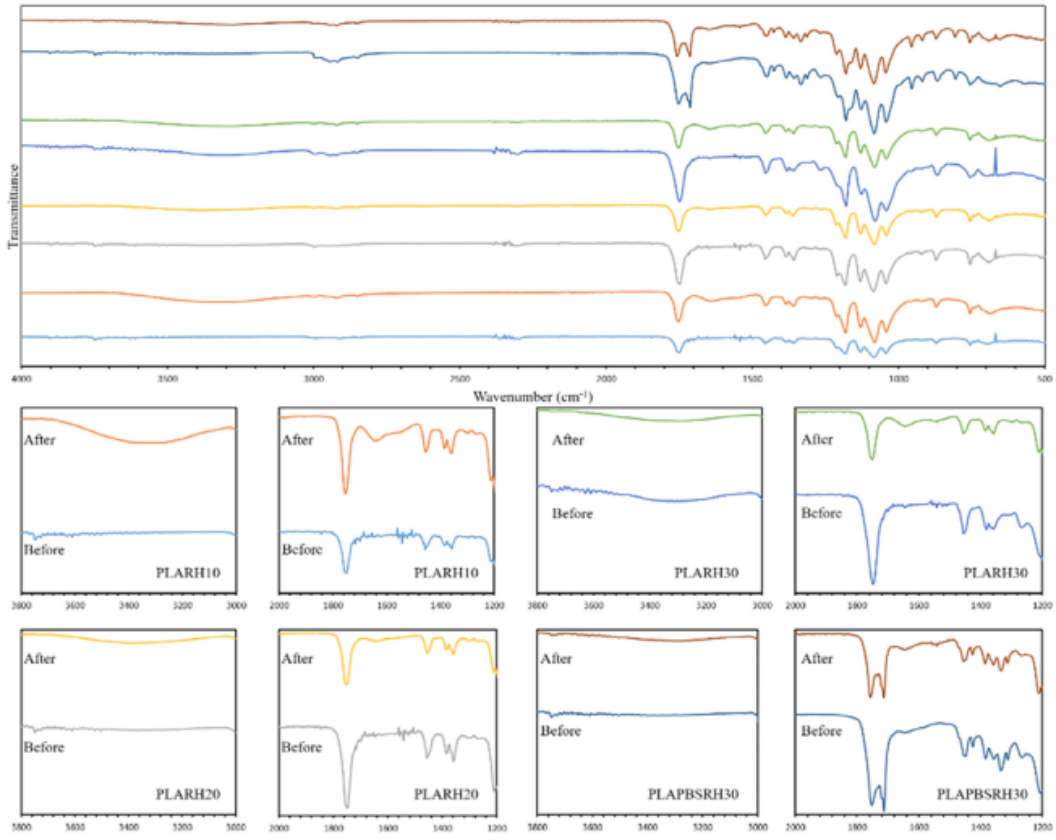


FIGURE 7 FITR spectra of PLA/PBS/RH green composites before and after soil burial test for 180 days [Color figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

observation confirmed that all the green composites can be degraded by burying in gardening soil. The similar results were also presented by several authors.[11,52–54] It should also be noted that the deterioration of the composites has been improved by the inclusion of RH. This was because the surface roughness, pores, and surface degradation of all PLA/PBS/RH composites can be observed more clearly than those of the neat PLA. Siakeng et al[52] reported a similar pattern in findings in their study of accelerated weathering and soil burial effects on biodegradability, color, and texture of coir/pineapple leaf/PLA biocomposites. They concluded that the degradation rate of PLA was lower than that of coir/pineapple leaf/PLA biocomposites after 250 h of accelerated weathering.

FTIR spectra of the dumbbell specimens of PLA/PBS/RH green composites before and after a 180-day soil burial test were displayed in Figure 7.

After soil burial test for 180 days, the characteristic peaks of all the composites can be found at approximately the same wavenumbers as those seen in freshly-prepared samples, accept for a new peak at 1645 cm^{-1}, originating from O—H bending of the unresolved hydroxyl group of the absorbed water usually carried by cellulose.[11,55] The other new broad peak was found at 3000–3650 cm^{-1}, corresponding with inter- and intramolecular hydrogen bonds of hydroxyl groups of absorbed water. Hence, this result strongly supports that the biodegradation of the PLA/PBS/RH composites carried out via hydrolysis.

The study of weight loss after soil burial test revealed that all the PLA/RH composites loss their weights after undergoing 180 days of soil burial test. PLARH10, PLARH20, PLARH30 and PLA/PBS/RH30 showed the weight loss of 4.8%, 6.5%, 6.3%, and 8.0%, respectively. These results confirm that the degree of weight loss

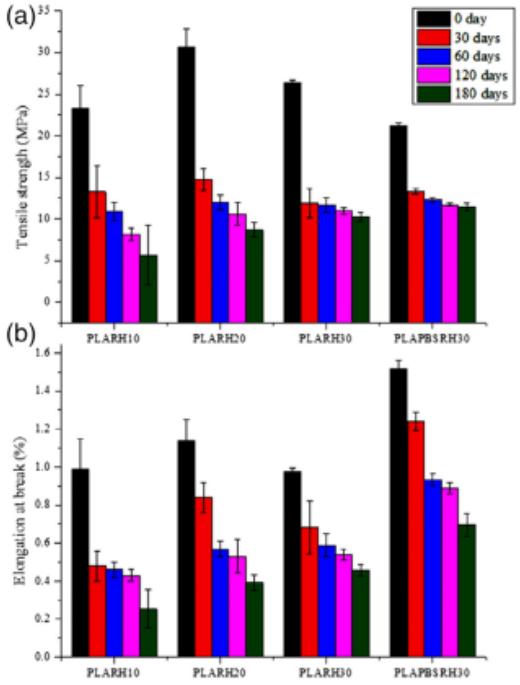


FIGURE 8 The tensile strength (a) and elongation at break (b) of the PLA/PBS/RH green composites before and after soil burial test for 180 days [Color figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

slightly increased with increasing RH content. Thus, the degradation mechanism seems to be partly influenced by the presence of RH. The findings are in strong alignment with the results suggested by other researchers confirming that the increase in natural fiber content has increased the degradation of biodegradable polymers.[56,57] In comparison, PBS raised the weight loss of PLARH30 from 6.3% to 8.0%. This may be due to the incorporation of PBS into PLARH30 not only the immiscible blend of PLA/PBS naturally formed, but also the reduction in the crystallization of the two polymers.[58] This leads to an improvement in biodegradation in the amorphous area of the polymers. In addition, hydrophilic groups in RH easily absorbed water and soil microorganisms and expanded the water and microorganism interaction region with the PLA/PBS mixture. This phenomenon makes it possible for PLAPBSRH30 to hydrolyze and disintegrate and thus increases weight loss.[56]

Figure 8 reveals the deteriorated tensile properties of the composites during the biodegradation. It can also be seen from the figure that both tensile strength and elongation at break of all the composites drastically dropped within 30 days of soil burial test and continued to decline with a relatively slow rate. Within the first 30 days of the test, the decrease in tensile strength of PLARH10, PLARH20, and PLARH30 showed 43%, 53%, and 56% reduction of their initial values, respectively. Likewise, the lessening in elongation at break of PLARH10, PLARH20, and PLARH30 showed 50%, 22%, and 22% reduction of their initial values, respectively. Hence, tensile strength and elongation at break of the composites were considerably reduced when the RH content increased. Moreover, when PBS was introduced to the composites, the decrease in tensile strength and elongation at break of PLAPBSRH30 was found at 28% and 18% of the initial values, respectively. This may be due to the poor stress transfer throughout the interphase of either PLA or PBS to RH particles, caused by their poor interfacial bonding strength, and also by the high stiffness of RH particles that hardened the composites by limiting the mobility of the polymer chains. Furthermore, as the biodegradation proceeded, the low interfacial adhesion between polymer matrix and RH particles would create numerous voids, as discussed in the morphological changes, leading to the poor stress transfer between the phases bringing about the low tensile strength values.

After 30 days of soil burial test, the tensile strength and elongation at break of all the composites continued to decrease with time as the biodegradation proceeded. This was because, with the degradation time allowance, more water entered into the composites, the chemical bonds of polymer matrix were destroyed either by microorganism or hydrolysis. Therefore many voids and structure defects appeared on the surface of the composites resulting in the decreased tensile strength and elongation at break of the composites.[27,31,53,54,59]

4 | CONCLUSIONS

Green composites based on biodegradable thermoplastics, that is, poly(lactic acid) (PLA) and poly(butylene succinate) (PBS) and agricultural waste, that is, rice husk (RH) with various RH contents (0, 10, 20, 30%wt.) were produced successfully by a twin-screw extruder. RH was analyzed as an effective filler for PLA and PLA/PBS blend to develop green composites with low cost, high biodegradability, improved processability, and comparable mechanical properties as unfilled PLA. Tensile modulus of the composites increased gradually, with increasing RH content from 10 to 30%wt., while other tensile and impact properties are maintained. Additionally, the elongation at break and impact strength of the composite was boosted when PBS was incorporated into the composite. As RH content increased, the lowered T_m

of PLA was observed, suggesting the reduced processing temperatures required for PLA/RH composites. Unsurprisingly, the results from mold trials showed that the suitable temperatures for processing PLA/RH green composites into hexagonal plant-pots decreased from 220–230°C for neat PLA to 170–180°C for 30%wt. RH-filled composites. Moreover, as low as 165–170°C processing temperature was achieved when PBS was blended into the composite. According to biodegradability study by gardening soil burial test, the biodegradation of PLA/PBS/RH composites proceeded via either enzymatic degradation, caused by microorganisms presenting in soil environment, or hydrolysis by the absorbed soil water. Furthermore, the biodegradation of the composites was accelerated by the addition of either RH or PBS. Mass loss, surface erosion as well as a large number of voids were observed due to the loss of the polymer matrix layer. FTIR confirmed the hydrolysis degradation of all the composites by showing two new peaks at 1645 cm^{-1}, originating from O–H bending of the unresolved hydroxyl groups of the absorbed water and at 3000–3650 cm^{-1}, corresponding with inter- and intramolecular hydrogen bonds of hydroxyl groups of the absorbed water. Both tensile strength and elongation at break of all the composites significantly deteriorated within 30 days of soil burial test and continued to decrease with relatively slow rates. Many voids and structure defects establishing on their surface resulted in the decreased tensile strength and elongation at break of the composites.

ACKNOWLEDGMENT

This work was partially financially supported by the graduate scholarship from Faculty of Science, Burapha University, Thailand; and the research grant of the project to develop the potential of advanced mold makers to support the industry of the future, Thai-German Institute, Thailand. The authors would like to thank PTT Global Chemical PCL., Poomjai Engineering Co., Ltd., Mastip (Thailand) Co. Ltd., Multibax PCL. and Oleofine Organics (Thailand) Co., Ltd. for their priceless support.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no potential conflict of interest.

ORCID

Supranee Kaewpirom https://orcid.org/0000-0002-9915-8793

REFERENCES

[1] M. Misra, V. Nagarajan, D. Reddy, A. Mohanty, in Proc. 2011 The 18th International Conference on Composite Materials, University of Guelph, Canada **2011**

[2] B. Dimzoski, G. Bogoeva-Gaceva, G. Gentile, M. Avella, M. Errico, V. Srebrenkoska, *J. Polym. Eng.* **2008**, *28*, 369.

[3] U. Saeed, M. A. Nawaz, H. A. Al-Turaif, *J. Compos. Mater.* **2018**, *52*, 2641. https://doi.org/10.1177/0021998317752227.

[4] S. Kaewpirom, C. Worrarat, *Fibers. Polym.* **2014**, *15*, 1469. https://doi.org/10.1007/s12221-014-1469-0.

[5] M. S. Huda, L. T. Drzal, M. Misra, A. K. Mohanty, K. Williams, D. F. Mielewski, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2005**, *44*, 5593. https://doi.org/10.1021/ie0488849.

[6] J. Posada, L. Jaramillo, E. Chamorro, L. A. García, *J. Compos. Mater.* **2015**, *20*, 3229. https://doi.org/10.1177/0021998315616274.

[7] Z. Yang, X. Feng, Y. Bi, Z. Zhou, J. Yue, M. Xu, *J. Appl. Polym. Sci.* **2016**, *133*, 44241. https://doi.org/10.1002/app.44241.

[8] B. Khan, H. Na, V. Chevali, P. Warner, H. Wang, *J. Mater. Sci. Technol.* **2017**, *34*, 387. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.03.004.

[9] P. Limiñana, D. Garcia-Sanoguera, L. Quiles-Carrillo, R. Balart, N. Montanes, *Compos. Part B Eng.* **2018**, *144*, 153. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.031.

[10] Á. Csikós, G. Faludi, A. Domján, K. Renner, J. Moczo, B. Pukanszky, *Eur. Polym. J.* **2015**, *68*, 592. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.03.032.

[11] Y. Y. Then, N. Ibrahim, N. Zainuddin, H. Ariffin, B. W. Chieng, W. Yunus, *BioResources* **2015**, *10*, 2949. https://doi.org/10.15376/biores.10.2.2949-2968.

[12] J. Antonio, A. Tadeu, B. Marques, J. Almeida, V. Pinto, *Constr. Builde. Mater.* **2018**, *176*, 432. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.028.

[13] R. Arjmandi, A. Hassan, K. Majeed, Z. Zakaria, *Int. J. Polym. Sci.* **2015**, *71*, 534. https://doi.org/10.1155/2015/501471.

[14] J. H. Kwon, T. Han, *Compos. Part B. Eng.* **2013**, *44*, 728. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.045.

[15] Q. Zhao, B. Zhang, H. Quan, R. Yam, R. Yuen, R. Li, *Compos. Sci. Technol.* **2009**, *69*, 2675. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.08.009.

[16] H. S. Kim, B. H. Lee, S. W. Choi, S. Kim, H. J. Kim, *Compos. Part A. Appl. Sci. Manuf.* **2007**, *38*, 1473. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.01.004.

[17] M. E. González-López, A. A. Pérez-Fonseca, R. Manríquez-González, M. Arellano, D. Rodrigue, J. R. Robledo-Ortíz, *Polym. Compos.* **2019**, *40*, 2132. https://doi.org/10.1002/pc.24997.

[18] M. E. González-López, J. R. Robledo-Ortíz, R. Manríquez-González, J. A. Silva-Guzmán, A. A. Pérez-Fonseca, *Compos. Interfaces.* **2018**, *25*, 515. https://doi.org/10.1080/09276440.2018.1439622.

[19] J. Hua, Z. Zhao, W. Yu, B. Wei, *Adv. Mater. Res.* **2011**, *230–232*, 1231. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.230-232.1231.

[20] N. Zawawi, A. Ismail, K. Abdan, M. A. Mahdi, *Key. Eng. Mater.* **2011**, *471–472*, 868. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.471-472.868.

[21] J. Mohammadi-Rovshandeh, P. Pouresmaeel-Selakjani, S. M. Davachi, B. Kaffashi, A. Hassani, A. Bahmeyi, *J. Appl. Polym. Sci.* **2014**, *131*, 1. https://doi.org/10.1002/app.41095.

[22] N. Navrátilová, A. Náplava, *Mater. Sci. Technol.* **2005**, *11*, 48.

[23] C. H. Tsou, W. S. Hung, S. Wu, J. C. Chen, C. Y. Huang, S. H. Chiu, C. Y. Tsou, W. H. Yao, S. M. Lin, C. K. Chu, C. C. Hu,

K. Lee, M. C. Suen, *Mater. Sci. Medziagotyra* **2014**, *20*, 446. https://doi.org/10.5755/j01.ms.20.4.6034.

[24] O. S. Yordem, A. G. Simanke, A. J. Lesser, *Polym. Eng. Sci.* **2011**, *51*, 550. https://doi.org/10.1002/pen.21860.

[25] Y. Deng, N. Thomas, *Eur. Polym. J.* **2015**, *71*, 534. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.08.029.

[26] M. Stanek, D. Manas, M. Manas, J. Javorik, in Proc. 2011. International Conference on Automatic Control Modelling & Simulation, Lanzarote, Canary Islands, **2011**

[27] H. Obasi, I. Igwe, I. Madufor, *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2013**, *2013*, 1. https://doi.org/10.1155/2013/326538.

[28] L. K. Lazzari, M. V. G. Zimmermann, D. Perondi, V. B. Zampieri, A. J. Zattera, R. M. C. Santana, *Mater. Res.* **2019**, *22*, 1. https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2019-0427.

[29] B. W. Chieng, N. Ibrahim, W. Yunus, M. Hussein, *Polymers* **2013**, *6*, 93. https://doi.org/10.3390/polym6010093.

[30] N. Ibrahim, M. K. Ab Wahab, D. N. Uy Lan, H. Ismail, *Bioresources* **2017**, *12*, 3076. https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3076-3087.

[31] N. Yaacob, H. Ismail, S. T. Sam, *Bioresources* **2016**, *11*, 1255. https://doi.org/10.15376/biores.11.1.1255-1269.

[32] L. Zhou, H. He, M. Li, S. Huang, C. Mei, Q. Wu, *Ind. Crops. Prod.* **2018**, *112*, 449. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.044.

[33] T. Sudiarti, D. Wahyuningrum, B. Bundjali, I. M. Arcana, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2017**, *223*, 12052. https://doi.org/10.1088/1757-899X/223/1/012052.

[34] Y. J. Phua, *Express. Polym. Lett.* **2013**, *2013*(7), 340. https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2013.31.

[35] N. Hongsriphan, T. Burirat, P. Niratsungnern, S. Trongteng, *J. Met. Mater. Miner.* **2013**, *23*, 41.

[36] S. Sharma, A. Singh, A. Majumdar, B. Butola, *J. Mater. Sci.* **2019**, *54*, 8971. https://doi.org/10.1007/s10853-019-03521-9.

[37] M. E. González-López, A. A. Pérez-Fonseca, E. O. Cisneros-López, R. Manríquez-González, D. E. Ramírez-Arreola, D. Rodrigue, J. R. Robledo-Ortíz, *J. Polym. Envi.* **2019**, *27*, 61. https://doi.org/10.1007/s10924-018-1308-2.

[38] A. Kumar, T. Venkatappa Rao, S. Chowdhury, S. Reddy, *Int. J. Biol. Macromol.* **2018**, *121*, 588. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.057.

[39] S. Sareeladdanon, P. Potiyaraj, *Adv. Mater. Res.* **2014**, *1025–1026*, 221. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1025-1026.221.

[40] C. Phasawat, V. Bullet, B. Pimpan, S. Chuayjuljit, T. Bullet, T. Leejarkpai, *J. Polym. Environ.* **2014**, *23*, 144. https://doi.org/10.1007/s10924-014-0689-0.

[41] T. Y. Qiu, M. Song, L. G. Zhao, *Mech. Adv. Mater. Mod. Process.* **2016**, *2*, 7. https://doi.org/10.1186/s40759-016-0014-9.

[42] W. Jia, R. H. Gong, P. J. Hogg, *Compos. Part B. Eng.* **2014**, *62*, 104. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.02.024.

[43] J. Zhan, Y. Chen, G. Tang, H. Pan, Q. Zhang, L. Song, Y. Hu, *J. Appl. Polym. Sci.* **2014**, *131*, 1. https://doi.org/10.1002/app.40335.

[44] R. Jeziorska, A. Szadkowska, E. Spasowka, A. Lukomska, M. Chmielarek, *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2018**, *2018*, 4571368. https://doi.org/10.1155/2018/4571368.

[45] S. Białasz, T. Klepka in Proc. 2019. MATEC Web Conference 2019, 252, 05016.

[46] D. Miranda, A. Nogueira, *Mater. Res.* **2019**, *22*, e20180564. https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2018-0564.

[47] E. A. J. Al-Mulla, A. H. Suhail, S. A. Aowda, *Ind. Crops. Prod.* **2011**, *33*, 23. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.07.022.

[48] J. Lunt, *Polym. Degrad. Stab.* **1998**, *59*, 145.

[49] T. Ohkita, S. Lee, *J. Appl. Polym. Sci.* **2016**, *100*, 3009. https://doi.org/10.1002/app.23425.

[50] Z. N. Terzopoulou, G. Z. Papageorgiou, E. Papadopoulou, E. Athanassiadou, M. Reinders, D. N. Bikiaris, *Polym. Compos.* **2016**, *37*, 407. https://doi.org/10.1002/pc.23194.

[51] C. Boonmee, C. Kositanont, T. Leejarkpai, *Environ. Nat. Resour. J.* **2016**, *14*, 1. https://doi.org/10.14456/ennrj.2016.8.

[52] M. Asim, M. Jawaid, R. Siakeng, *Polymer* **2020**, *12*, 458. https://doi.org/10.3390/polym12020458.

[53] A. Qasim, *Int. J. Tech. Res. Appl.* **2019**, *3*, 91.

[54] C. Vasile, P. Daniela, M. Râpă, R. Darie, A. Mitelut, E. Popa, P. Popescu, M. Draghici, M. Popa, *Compos. Part B Eng.* **2018**, *142*, 251. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.026.

[55] J. P. Mofokeng, A. S. Luyt, T. Tábi, J. Kovács, *J. Thermoplast. Compos. Mater.* **2012**, *25*, 927. https://doi.org/10.1177/0892705711423291.

[56] Z. Huang, L. Qian, Q. Yin, N. Yu, T. Liu, D. Tian, *Polym. Test.* **2018**, *66*, 319. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.02.003.

[57] M. Gallardo-Cervantes, Y. González-García, A. A. Pérez-Fonseca, M. E. González-López, R. Manríquez-González, D. Rodrigue, J. R. Robledo-Ortíz, *J. Appl. Polym. Sci.* **2021**, *138*, 50182. https://doi.org/10.1002/app.50182.

[58] P. Chaiwutthinan, V. Pimpan, S. Chuayjuljit, T. Leejarkpai, *J. Polym. Environ.* **2015**, *23*, 114. https://doi.org/10.1007/s10924-014-0689-0.

[59] S. Liu, G. Wu, X. Chen, X. Zhang, J. Yu, M. Liu, Y. Zhang, P. Wang, *Polymer* **2019**, *11*, 1015. https://doi.org/10.3390/polym11061015.

SUPPORTING INFORMATION

Additional supporting information may be found online in the Supporting Information section at the end of this article.

How to cite this article: Sirichalarmkul A, Kaewpirom S. Enhanced biodegradation and processability of biodegradable package from poly (lactic acid)/poly(butylene succinate)/rice-husk green composites. *J Appl Polym Sci*. 2021;e50652. https://doi.org/10.1002/app.50652

Effects of rice husk on manufacturability of bioplastic plant-pot from poly(lactic acid)/rice husk green composites

Anan Sirichalarmkul[1,2] Phatsakon Taweewat[2] and Supranee Kaewpirom[1*]

[1]Department of Chemistry, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi 20131

[2]Mould & Die Technology Division, Thai-German Institute, Chonburi 20000

Phone +66 3810 3066, Fax +66 3839 3494, *E-Mail: kaewpiro@buu.ac.th

Abstract

This research focuses on the effect of ground rice-husk content on efficiency of plant pot manufacturing using injection molding process. Polylactic acid (PLA)/rice husk (RH) green-composites with various RH contents (0, 10, 30 %wt) were prepared using a twin-screw extruder. Computer aid engineering (CAE) (Moldex 3D) was used to simulate an application range of injection molding processes as well as optimize product design and manufacturability. The results showed that hexagonal shape was selected as the best geometry design of plant pot. Besides, an optimum melting temperature for good quality plant pot products varied with rice husk content. The melting temperature decreased with increasing RH content. With an addition of 30 %wt RH, a capital cost of green-composite pellets and plant pot products reduced significantly, when compared with that of the neat PLA.

Keywords: Poly(lactic acid), Rice husk, Green-composite, Injection molding, Twin-screw extruder.

1. Introduction

To our knowledge, green-composite material, composed of bioplastic and natural material, is one of the answers to diminish plastic waste in the environment. This is because green composite material is completely biodegradable and environmentally friendly [1]. In addition, the use of low cost natural materials makes green-composite materials more attractive owing to its low cost.

Polylactic acid (PLA) is a biodegradable and eco-friendly aliphatic polyester with good mechanical properties. PLA has become a popular material due to it being produced from renewable resources. PLA is usually produced through two main routes: an indirect route via a lactide intermediate, and a direct polymerization by polycondensation [2].

Rice husk is a waste product from rice milling and always sold at a cheap price for mixing in animal feed and being burnt to make energy and silica [3,4]. Rice husk consists of 50% cellulose, 25-30% lignin, and 15-20% silica. Therefore, it can be considered to use as reinforcing material as well as cost reduction filler.

In this study, polylactic acid (PLA)/rice husk (RH) green-composite pellets with various RH contents (0, 10, 30 %wt) were prepared using a twin-screw extruder. Product design and manufacturability of neat PLA plant pot were optimized with Moldex 3D computer aid engineering (CAE). The CAE results were subsequently used as reference guidance in the mold trial injection process. Hexagonal plant pot was then produced from the PLA/RH green composite pellets by injection molding process. Finally, the capital cost of green-composite pellets and plant pot products were analyzed.

2. Experimental Methods

2.1 Materials

PLA biopolymer 3251D (NatureWorks®) was supplied by PTTGC PCL. Rice husk was obtained from the Northeast of Thailand. Processing additives, e.g. additive A (an internal lubricant for improving material flow in twin screw extruder), additive B (an external

lubricant for reduce shivering when mixing with twin screw) and additive C (a coupling agent that help to improve the compatibility between RH and PLA) were supplied by Multibax PLC and Oleofine Organics (Thailand) Co., Ltd.

2.2 Preparation of green-composite

The appropriate amount of PLA, RH and additives used for preparing PLA/RH green-composites is shown in Table 1. PLARH10 and PLARH30 are green-composites with 10 %wt RH and 30 %wt RH (with respect to PLA weight), respectively.

Prior to the processing, PLA was dried at 90 °C for 5 hours to remove moisture. RH was also dried at 80 °C overnight and ground into powder and finally sieved to obtain RH powder with less than 600 micron particle size. Then PLA, RH and additives were dry-mixed before feeding into a twin-screw extruder. The temperatures in the barrel were set between 180-200 °C. After well mixing, the molten composites was cooled down and pelletized into 3-mm pellets. The resulting PLA/RH green-composite pellets were dried at 90 °C for 5 hours and kept in air-tight containers.

Table 1 Material compositions for preparing PLA/RH green-composite.

Sample	Material content (% by weight)				
	PLA	RH	Additive		
			A	B	C
Neat PLA	100	0	0	0	0
PLARH10	87.14	8.71	1.75	1.6	0.8
PLARH30	71.76	21.53	4.31	1.6	0.8

2.3 CAE simulation obtained from Moldex 3D

2.3.1 Pre-process

Pre-process was carried out using 4 steps as follows. Step 1: A cavity model was imported by converting the CAD 3D part model into a step format before importing to Moldex 3D R15 designer. After that the e-Design function of Moldex 3D R15 designer was used to generate 3D mesh. Step 2: A runner system was built by converting the CAD 3D hot runner model into a step format and imported to Moldex 3D R15 designer. Step 3: cooling system was built by generating moldbase and spiral cooling channel in the core insert. Step 4: solid mesh was created on level 4 (estimated element count: 600k ~ 1m) and exported to a solid mesh file.

2.3.2 Analysis

The analysis procedure was divided into 2 steps. Step 1: a new project was created in both classic mode, by setting 3D solid model solver [e-Design] function, and injection molding mode. Step 2: a new run was created by importing solid mesh file. The material data of the neat PLA biopolymer 3251D, from the material data library of Moldex 3D, was then put into the simulation calculations [5]. After that, a method was set with CAE mode and maximum injection was set at 203 MPa (maximum injection pressure of injection machine). The volume in each part of the mold was also inserted into the calculation. Then the optimization was automatically calculated by Moldex 3D software. CAE results can be obtained by varying injection parameters in Moldex 3D software until the optimum CAE results were obtained. In our experiments, the plant pot designs of square and hexagonal shapes were evaluated by Moldex 3D software. The CAE results of each product design were compared.

2.4 Injection molding process

Injection machine (Toshiba EC 180S) with screw diameter 32 mm, clamping force of 129 Ton and the maximum injection pressure of 203 MPa was used in injection molding process. Injection molding parameters obtained from CAE results for neat PLA were inserted as followings: injection pressure 112 MPa, holding pressure 50 MPa, holding time 3 sec, cooling time 14 sec, and mold temperature 40 °C. The barrel-nozzle temperature (4 zones) was set at 190, 195, 200, 210 °C and melt temperature (hot runner temperature) was varied between 170 °C and 230 °C.

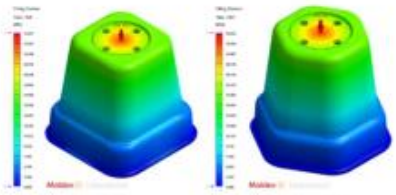
3. Results and Discussion

3.1 Optimum product design

In order to optimize plant pot design and manufacturability, CAE simulation was applied. Two designs of plant pot, e.g. square and hexagonal shapes, were created in CAD 3D software and imported to Moldex 3D for simulation. The material data of neat PLA were used in the calculation. The CAE results revealing the filling time, filling pressure, filling stress, sink mark displacement and warpage displacement are shown in Figures 1-5 and Table 2.

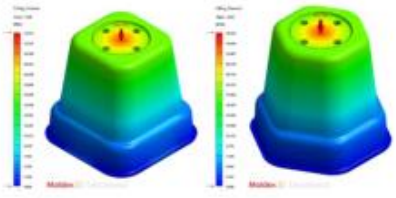
Table 2 Summary of CAE results

Parameter	Square	Hexagonal
Filling time (s)	0.65	0.59
Filling pressure (MPa)	35.9	36.4
Filling stress (MPa)	5.6	0.68
Sink mark displacement (mm)	0.5	0.5
Warpage displacement (mm)	0.77	0.73



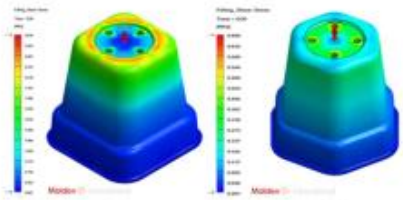
(a) (b)

Figure 1 Filling time (a) 0.65 and (b) 0.59 sec.



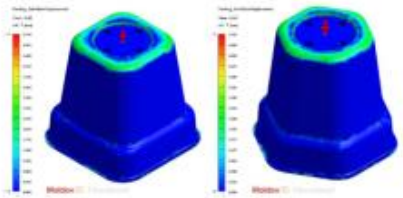
(a) (b)

Figure 2 Filling pressure (a) 35.9 and (b) 36.4 MPa.



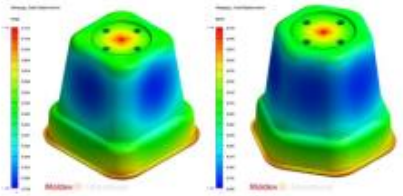
(a) (b)

Figure 3 Filling stress (a) 5.6 and (b) 0.68 MPa.



(a) (b)

Figure 4 Sink mark displacement (a) 0.5 and (b) 0.5 mm.



(a) (b)

Figure 5 Warpage displacement (a) 0.77 and (b) 0.73 mm

According to Suhas [6], the parameters are defined as follows. Filling time is the time used for completely filled the mold cavity with the molten plastic. Filling pressure is the pressure used for injecting molten plastic into the mold cavity. Filling stress is the stress caused by the flow of molten plastic in the mold cavity. Too high stress causes defects such as stress crack and warpage [6]. Sink mark displacement is the shrinkage size of the product after completion of the injection process. Warpage displacement is the warpage size of the product after ejection of mold cavity

CAE results show that square shape exhibits longer filling time than that of the hexagonal shape. Although the results of filling pressure, sink mark displacement and warpages displacement of both square and hexagonal shapes are not significantly different, the filling stress of hexagonal shape is significantly lower

than that of square shape. This is because a hexagon is the shape that best fills a plane with equal size units and leaves no wasted space. Therefore, in this research work, hexagonal shape design was chosen for plant pot manufacture.

3.2 Effects of RH content on processing temperature

In our trials, melt temperatures used in injection molding process were set between 170 °C and 230 °C with 10 °C decrement. Ten samples were prepared for each processing temperature. At 170 °C, molten neat PLA was too viscous and could not be injected into the mold. PLARH10 showed short shot defect (Fig. 6), while and PLARH30 showed good processing ability with good quality without any defects.

Figure 6 Short shot defect found in PLARH10 at a processing temperature of 170°C.

At 180 °C, neat PLA showed short shot defect, while a smaller amount short shot defect was found in PLARH10. In case of PLARH30, the good quality product was obtained with some demolding problem. Fig. 7 shows a crack located on the surface of the plant-pot and extended completely through the substrate.

Figure 7 Demolding problems of PLARH30, at a processing temperature of 180 °C, due to a crack.

At 190 °C, neat PLA showed less short shot than that found at 170 °C. Both PLARH10 and PLARH30 showed good quality products with a little sink mark as shown in Fig. 8.

Figure 8 A good quality product of PLARH30, at a processing temperature of 190 °C, with a little sink mark.

At 200 °C, neat PLA showed sink mark defect, while PLARH10 showed good quality product with a little sink mark. However, for PLARH30, big flow mark and sink mark were obviously observed as displayed in Fig. 9.

Figure 9 Big flow mark defect found in PLARH30 at a processing temperature of 200 °C.

At 210 °C, the level of sink mark in neat PLA increased. PLARH10 showed good quality product with a little sink mark. However, the molten PLARH30 was not solidified in the mold after cooling (Fig. 10). This may be due to the degradation of PLARH30 that caused the reduction in its molten viscosity.

At 220 °C, the sink mark defect in neat PLA increased, while PLARH10 was not solidified in the mold after cooling and the molten PLARH30 was leaked out from the hot runner tip (Fig. 11) and could not be processed.

Figure 10 PLARH30 product after being injection molded at a processing temperature of 210 °C.

At 230 °C, the sink mark defect in neat PLA further increased. Both molten PLARH10 and molten PLARH30 were leaked out from the hot runner tip and could not be processed.

Therefore, it's worth noting that if processing temperature is at 210 °C or higher, the molten composites cannot be solidified in the mold after cooling. This may be due to the degradation of PLA at high temperatures. It was reported by F. Signori et al. [7] that the degradation of PLA progressively increased as processing temperature increased. Moreover, there are many factors that affect thermal stability of PLA, e.g., moisture promotes hydrolytic degradative pathways, and oxygen triggers thermal oxidation.

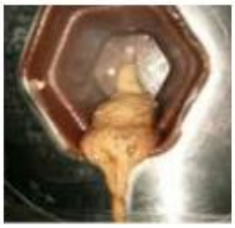


Figure 11 Molten PLARH30 was leaked from hot runner tip at a processing temperature of 220 °C.

Basically, short shot defect was caused by too small injection pressure. With too small injection pressure, the molten material could not be injected into the mold cavity. From the above experimental results it's worth noting that with an increase in melt temperature at a fixed pressure, the material viscosity reduced, resulted in the decreased short shot defects [8].

When RH was added, the melt temperature was found to be lower compared with that of the neat PLA. The higher the RH content, the lower the processing temperature was. This may be due to the effect of both RH and lubricant A that make the PLA chains move easier.

Normally, sink marks in injection molded plastic parts develop when material is in the region of thick features such as ribs or bosses shrinks more than the material in the adjacent wall [9]. It was found in Fig. 12 that the increase in RH content helped to decrease the sink mark defects. This was due to RH acted as a reinforcing material that prevents PLA from shrinking. Therefore, the addition of RH can reduce shrinkage and diminish sink marks.

Figure 12 The sink marks (from left to right) in neat PLA, PLARH10 and PLARH30.

3.3 Capital cost analysis

The capital cost of both PLA/RH composite pellets and plant-pots was calculated and the results are displayed in Fig. 13 and Fig. 14, respectively. It's clearly seen from the figures that with 10%RH addition, PLARH10 shows higher capital cost than the neat PLA. This was owing to the cost of additives used in the composite preparation. With further increase in RH content up to 30%, PLARH30 showed the lowest price among the three materials. Hence, RH can be considered to use as a reinforcing material as well as a cost reduction filler in PLA/RH green-composites at the appropriate amount of 30%wt.

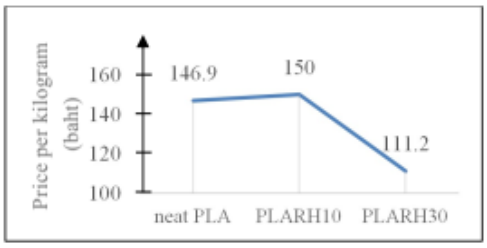


Figure 13 Price per kilogram of neat PLA and green-composite pellets.

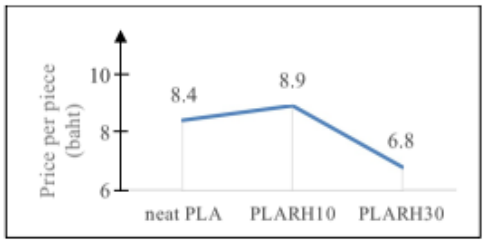


Figure 14 Price per piece of plant-pots made from green-composites.

4. Conclusion

Computer aid engineering (CAE) (Moldex 3D) was successfully used to simulate the application range of injection molding processes and to optimize product design as well as manufacturability of plant-pots from PLA/RH green composites. With an increase in melt temperature, the material viscosity reduced, resulting in the decrease in short shot defects of the products. The addition of RH can reduce processing temperature, lessen shrinkage and diminish sink marks of plant-pots. The higher the RH content, the lower the processing temperature and the lower the degree of shrinkage and sink marks was. Unquestionably, RH can be considered to use as a reinforcing material as well as a cost reduction filler in PLA/RH green-composites at the appropriate amount of 30%wt.

5. Acknowledgment

This work was partially, financially supported by the graduate scholarship from Faculty of Science, Burapha University, Thailand.

This work was partially, financially supported by the research grant of the project to develop the potential of advanced mold makers to support the industry of the future, Thai-German Institute, Thailand.

The authors would like to thank PTT Global Chemical PCL., Poomjai Engineering Co., Ltd., Mastip (Thailand) Co. Ltd., Multibax PCL. and Oleofine Organics (Thailand) Co., Ltd. for their priceless support.

6. References

1. Misra, M.; Nagarajan V.; Reddy, J.; Mohanty, A. K. *Bioplastics and green composites from renewable resources: Where we are and future directions*. 18th International Conference on Composite Material, Jeju Island, Korea, 21st to 26th August 2011, 2011.
2. Dimzoski, B.; Bogoeva-Gaceva, G.; Gentile, G.; Avella, M.; Errico, M.E.; Srebrenkoska, V. *Preparation and Characterization of Poly(lactic acid) /Rice Hulls Based Biodegradable composite.* Journal of Polymer Engineering, 2009, 28, 369-383.
3. António, J.; Tadeu, A.; Marques, B.; Almeida, J. A. S.; Pinto, V. *Application of rice husk in the development of new composite boards. Construction and Building Materials*, 2018, 176, 432-439.
4. Arjmandi, R.; Hassan, A.; Majeed, K.; and Zakaria, Z. *Rice Husk Filled Polymer Composites.* International Journal of Polymer Science, 2015, 25, 35-48.
5. Staneek, M.; Manas, D.; Manas, M.; Javorik, J. *Simulation of injection molding process*, 13th Wseas International Conference on Automatic Control, modelling & simulation (acmos '11), 2011, 231–234.
6. Suhas, K.; *Robust Process Development and Scientific Molding: Theory and Practice.* Hanser Publishers: Munich, 2017;pp. 104-144.
7. Signori, F.; Coltelli, M.B.; Bronco S. *Thermal degradation of poly(lactic acid) (PLA) and*

poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) and their blends upon melt processing. Polymer Degradation and Stability, 2009, 94, 74–82.

8. Osswald, T. A.; Menges, G. *Material science of polymers for engineers.* Hanser Publishers: Munich, 2012; pp. 129-132.
9. Goodship, V. *ARBURG Practical Guide to Injection Moulding.* Rapra Technology Limited and ARBURG Limited, 2004; pp. 183.

ภาคผนวก ค

Technical data sheet ของไบโอพลาสติก

NatureWorks

Ingeo™ Biopolymer 3251D Technical Data Sheet

Injection Molding Process Guide

Ingeo biopolymer 3251D is designed for injection molding applications. This polymer grade has a higher melt flow capability than other Ingeo resin grades currently in the marketplace. The higher flow capability allows for easier molding of thin-walled parts. It is designed for injection molding applications, both clear and opaque, requiring high gloss, UV resistance and stiffness.

Typical Material & Application Properties		
Physical Properties	**Ingeo 3251D**	**ASTM Method**
Specific Gravity	1.24	D792
MFR, g/10 min (210°C, 2.16kg)	80	D1238
MFR, g/10 min (190°C, 2.16kg)	35	D1238
Relative Viscosity	2.5	
Crystalline Melt Temperature (°C)	155-170	D3418
Glass Transition Temperature (°C)	55-60	D3418
Clarity	Transparent	
Mechanical Properties		
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	9,000 (62)	D638
Tensile Elongation, %	3.5	D638
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16)	D256
Flexural Strength (MPa)	15,700 (108)	D790
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16)	D256
Heat Distortion Temperate (°C)	55	E2092

Note: These are starting points and may need to be optimized.

Processing Information

Ingeo biopolymer 3251D can be processed on conventional injection molding equipment. The material is stable in the molten state, provided that the drying procedures are followed. Mold flow is highly dependent on melt temperature. In order to control melt temperature, it is recommended to balance screw speed, back pressure, and process temperature. Injection speed should be medium to fast.

Processing Temperature Profile		
Melt Temp.	370-410°F	188-210°C
Feed Throat	70°F	20°C
Feed Temp.	330-350°F	166-177°C
Compression Section	360-380°F	182-193°C
Metering Section	370-400°F	188-205°C
Nozzle	370-400°F	188-205°C
Mold	75°F	25°C
Screw Speed	100-200 rpm	
Back Pressure	50-100 psi	
Mold Shrinkage	.004 in/in. +/-.001	

Process Details

Startup and Shutdown

Ingeo biopolymer 3251D is not compatible with a wide variety of other resins, and special purging sequences should be followed:

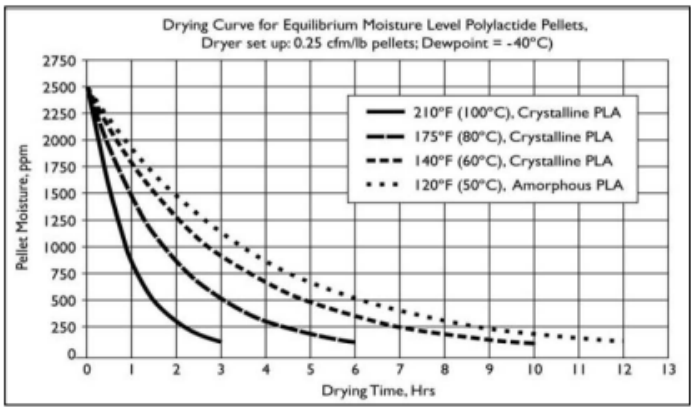
1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low viscosity, general purpose polystyrene or polypropylene.
2. Vacuum out hopper system to avoid contamination.
3. Introduce Ingeo biopolymer into the extruder at the operating conditions used in step one.
4. Once Ingeo biopolymer has purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
5. At shutdown, purge machine with high viscosity polystyrene or polypropylene.

Ingeo and the Ingeo logo are trademarks or registered trademarks in the USA and other countries.

Drying

Inline drying is recommended for Ingeo biopolymers. A moisture content of less than 0.010% (100 ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Polymer is supplied in foil-lined boxes or bags dried to<250 ppm. The resin should not be exposed to atmospheric conditions after drying. Keep the package sealed until ready to use and promptly dry and reseal any unused material. The drying curves for both amorphous and crystalline resins are shown to the right.

Note: Amorphous polymer must be dried below 120F (50C).



Food Packaging Status

U.S. Status

On January 3, 2002 FCN 000178 submitted by NatureWorks LLC to FDA became effective. This effective notification is part of list currently maintained on FDA's website at

http://www.fda.gov/food/ingredientspackaginglabeling/packagingfcs/notifications/default.htm

This grade of Ingeo biopolymer may therefore be used in food packaging materials and, as such, is a permitted component of such materials pursuant to section 201(s) of the Federal, Drug, and Cosmetic Act, and Parts 182, 184, and 186 of the Food Additive Regulations. All additives and adjuncts contained in the referenced Ingeo biopolymer formulation meet the applicable sections of the Federal Food, Drug, and Cosmetic Act. The finished polymer is approved for all food types and B-H use conditions. We urge all of our customers to perform GMP (Good Manufacturing Procedures) when constructing a package so that it is suitable for the end use.

European Status

This grade of Ingeo biopolymer complies with Plastics Regulation 10/2011 as amended. No SML's for the above referenced grade exist in Plastics Regulation 10/2011 as amended. NatureWorks LLC would like to draw your attention to the fact that the EU- Plastics Regulation 10/2011, which applies to all EU-Member States, includes a limit of 10 mg/dm^2 of the overall migration from finished plastic articles into food. In accordance with Plastics Regulation 10/2011 the migration should be measured on finished articles placed into contact with the foodstuff or appropriate food simulants for a period and at a temperature which are chosen by reference to the contact conditions in actual use, according to the rules laid down in Plastics Regulation 10/2011.

Please note that it is the responsibility of both the manufacturers of finished food contact articles as well as the industrial food packers to make sure that these articles in their actual use are in compliance with the imposed specific and overall migration requirements.

This grade as supplied meets European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste heavy metal content as described in Article 11.

Should you need further clarification, contact NatureWorks LLC.

Bulk Storage Recommendations

The resin silos recommended and used by NatureWorks LLC are designed to maintain dry air in the silo and to be isolated from the outside air. This design would be in contrast to an open, vented to atmosphere system that we understand to be a typical polystyrene resin silo. Key features that are added to a typical (example: polystyrene) resin silo to achieve this objective include a cyclone and rotary valve loading system and some pressure vessel relief valves. The dry air put to the system is sized to the resin flow rate out of the silo. Not too much dry air would be needed and there may be excess instrument air (-30°F dew point) available in the plant to meet the needs for dry air. Our estimate is 10 scfm for a 20,000 lb/hr rate resin usage. Typically, resin manufacturers specify aluminum or stainless steel silos for their own use and avoid epoxy-lined steel.

Ingeo and the Ingeo logo are trademarks or registered trademarks in the USA and other countries.

Safety and Handling Considerations

Safety Data Sheets (SDS) for Ingeo biopolymers are available from NatureWorks. SDS's are provided to help customers satisfy their own handling, safety, and disposal needs, and those that may be required by locally applicable health and safety regulations. SDS's are updated regularly; therefore, please request and review the most current SDS's before handling or using any product.

The following comments apply only to Ingeo biopolymers; additives and processing aids used in fabrication and other materials used in finishing steps have their own safe-use profile and must be investigated separately.

Hazards and Handling Precautions

Ingeo biopolymers have a very low degree of toxicity and, under normal conditions of use, should pose no unusual problems from incidental ingestion or eye and skin contact. However, caution is advised when handling, storing, using, or disposing of these resins, and good housekeeping and controlling of dusts are necessary for safe handling of product. Pellets or beads may present a slipping hazard.

No other precautions other than clean, body-covering clothing should be needed for handling Ingeo biopolymers. Use gloves with insulation for thermal protection when exposure to the melt is localized. Workers should be protected from the possibility of contact with molten resin during fabrication.

Handling and fabrication of resins can result in the generation of vapors and dusts that may cause irritation to eyes and the upper respiratory tract. In dusty atmospheres, use an approved dust respirator.

Good general ventilation of the polymer processing area is recommended. At temperatures exceeding the polymer melt temperature (typically 175ºC), polymer can release fumes, which may contain fragments of the polymer, creating a potential to irritate eyes and mucous membranes. Good general ventilation should be sufficient for most conditions. Local exhaust ventilation is recommended for melt operations. Use safety glasses (or goggles) to prevent exposure to particles, which could cause mechanical injury to the eye. If vapor exposure causes eye discomfort, improve localized fume exhausting methods or use a full-face respirator.

The primary thermal decomposition product of PLA is acetaldehyde, a material also produced during the thermal degradation of PET. Thermal decomposition products also include carbon monoxide and hexanal, all of which exist as gases at normal room conditions. These species are highly flammable, easily ignited by spark or flame, and can also auto ignite. For polyesters such as PLA, thermal decomposition producing flammable vapors containing acetaldehyde and carbon monoxide can occur in almost any process equipment maintaining PLA at high temperature over longer residence times than typically experienced in extruders, fiber spinning lines, injection molding machines, accumulators, pipe lines and adapters. As a rough guideline based upon some practical experience, significant decomposition of PLA will occur if polymer residues are held at temperatures above the melting point for prolonged periods, e.g., in excess of 24 hours at 175°C, although this will vary significantly with temperature.

Combustibility

Ingeo biopolymers will burn. Clear to white smoke is produced when product burns. Toxic fumes are released under conditions of incomplete combustion. Do not permit dust to accumulate. Dust layers can be ignited by spontaneous combustion or other ignition sources. When suspended in air, dust can pose an explosion hazard. Firefighters should wear positive-pressure, self-contained breathing apparatuses and full protective equipment. Water or water fog is the preferred extinguishing medium. Foam, alcohol-resistant foam, carbon dioxide or dry chemicals may also be used. Soak thoroughly with water to cool and prevent re-ignition.

Disposal

DO NOT DUMP INTO ANY SEWERS, ON THE GROUND, OR INTO ANY BODY OF WATER. For unused or uncontaminated material, the preferred option is to recycle into the process otherwise, send to an incinerator or other thermal destruction device. For used or contaminated material, the disposal options remain the same, although additional evaluation is required. Disposal must be in compliance with Federal, State/Provincial, and local laws and regulations.

Environmental Concerns

Generally speaking, lost pellets, while undesirable, are benign in terms of their physical environmental impact, but if ingested by wildlife, they may mechanically cause adverse effects. Spills should be minimized, and they should be cleaned up when they happen. Plastics should not be discarded into the environment.

Product Stewardship

NatureWorks has a fundamental duty to all those that use our products, and for the environment in which we live. This duty is the basis for our Product Stewardship philosophy, by which we assess the health and environmental information on our products and their intended use, and then take

Ingeo and the Ingeo logo are trademarks or registered trademarks of NatureWorks in the USA and other countries.

appropriate steps to protect the environment and the health of our employees and the public.

Customer Notice

NatureWorks encourages its customers and potential users of its products to review their applications from the standpoint of human health and environmental quality. To help ensure our products are not used in ways for which they were not intended or tested, our personnel will assist customers in dealing with ecological and product safety considerations. Your sales representative can arrange the proper contacts. NatureWorks literature should be consulted prior to the use of the company's products.

NOTICE:
No freedom from infringement of any patent owned by NatureWorks LLC or others is to be inferred. No information in this publication can be considered a suggestion to infringe patents.

The technical information, recommendations and other statements contained in this document are based upon tests or experience that NatureWorks believes are reliable, but the accuracy or completeness of such information is not guaranteed. Many factors beyond NatureWorks control can affect the use and performance of a NatureWorks product in a particular application, including the conditions under which the product is used and the time and environmental conditions in which the product is expected to perform. Since these factors are uniquely within the user's knowledge or control, it is essential that the user evaluate the NatureWorks product to determine whether it is fit for a particular purpose and suitable for the user's method of application. In addition, because use conditions are outside of NatureWorks control and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is solely responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace, use and disposal practices are in compliance with applicable laws and regulations. NatureWorks LLC assumes no obligation or liability for the information in this document.

NATUREWORKS MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING THE INFORMATION CONTAINED HEREIN OR ITS PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY WARRANTY AS TO ACCURACY OR COMPLETENESS OF INFORMATION, OR ANY IMPLIED WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.

NOTICE REGARDING PROHIBITED USE RESTRICTIONS: Unless specifically agreed to in writing by NatureWorks, NatureWorks LLC will not knowingly sell or sample any product into any of the following commercial or developmental applications (i) components of or packaging for tobacco products, (ii) components of products intended for human or animal consumption, (iii) any application that is intended for any internal contact with human body fluids or body tissues, (iv) as a critical component in any medical device that supports or sustains human life, (v) in any product that is designed specifically for ingestion or internal use by pregnant women, (vi) in any application designed specifically to promote or interfere with human reproduction, (vii) in microbeads, including those used in personal care/cosmetic applications, or (vii) to manufacture bottles or bottle pre-forms in North America.

For additional information please contact NatureWorks via our website on the tab called FAQ's or by clicking here.

NatureWorks
15305 Minnetonka Blvd., Minnetonka, MN 55345

Ingeo and the Ingeo logo are trademarks or registered trademarks of NatureWorks in the USA and other countries.

BioPBS™ FZ71PM Technical Data Sheet

Extrusion Coating

Product Description

BioPBS™ is bio-based polybutylene succinate (PBS) produced from polymerization of bio-based succinic acid and 1,4-butanediol. Alike LDPE, BioPBS™ is soft and flexible semi-crystalline polyester with excellent properties suitable for cast extrusion and extrusion coating such as compostable paper cups.

Features:

- Similar processability as LDPE
- Processable in existing LDPE extrusion coating machine
- Excellent adhesion to paper
- Superior heat sealability
- Excellent printability without pre-treatment
- Low coating thickness
- Suitable to use with hot food and beverages up to 100°C
- Food contact approved by FDA (FCN No.1574) and JHOSPA, comply to EU10/2011
- OK COMPOST certified by Vincotte in European Union, BPI in North America and ABA in Australia
- Renewable content certified by DIN CERTCO, JBPA and USDA

Properties	Test Method	Unit	FZ71PM
Density	ISO 1183	g/cm^3	1.26
MFR (190°C, 2.16 kg)	ISO 1133	g/10 min	22
Melting Point	ISO 3146	°C	115
Yield Stress	ISO 527-2	MPa	40
Stress at Break	ISO 527-2	MPa	30
Strain at Break	ISO 527-2	%	170
Flexural Modulus	ISO 178	MPa	630
Flexural Strength	ISO 178	MPa	40
Izod Impact Strength (23°C)	ISO 180	kJ/m^2	7
Heat Deflection Temperature (0.45 MPa)	ISO 75-1	°C	95
Rockwell Hardness	ISO 2039-2	R Scale	107

No.299

Information in this document is based on our current knowledge and experience. It does not relieve customers of the responsibility to carry out their own tests and experiments nor do they imply any legally binding assurance. Customers are responsible to determine their freedom to operate to ensure that their products do not infringe any intellectual properties. PTT MCC Biochem Company Limited assumes no obligation or liability for the information in this document

Process Information

Recommended Processing Parameters	
Melt Temperature	240-245°C
Feed Throat	130°C
Barrel Temperature	180-235°C
Adapter Temperature	245°C
Die Temperature	245°C
Chill Roll Temperature	20-25°C

Supplied form, storage condition and drying condition

BioPBS™ pellet is dried and packed in aluminum-lined packaging before delivering to customers.

Do not store outdoors. Keep dry at ambient temperature. Avoid humid environment, heat and direct sunlight. Use material within 6 months after delivery date, in order to prevent possible material quality deterioration.

Pre-dry of the unopened BioPBS™ is not necessary. It is recommended to keep packages sealed until ready to process and using up the whole 25-kg bag. Unused material should be tightly sealed, kept away from open air, and pre-dried (Temperature 80°C for over 5 hours) to moisture content of less than 1,000 ppm (preferable less than 700 ppm) prior to using next time.

No. 299
Information in this document is based on our current knowledge and experience. It does not relieve customers of the responsibility to carry out their own tests and experiments nor do they imply any legally binding assurance. Customers are responsible to determine their freedom to operate to ensure that their products do not infringe any intellectual properties. PTT MCC Biochem Company Limited assumes no obligation or liability for the information in this document

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	อนันต์ สิริเฉลิมกุล
วัน เดือน ปี เกิด	26 มกราคม พศ. 2535
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	13/151 หมู่บ้านพฤกษ์ลดา1 ซ.อนามัยงามเจริญ แขวงท่าข้าม เขตบางขุนเทียน จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10150
ตำแหน่งและประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2558 วิศวกร อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ สถาบันไทย-เยอรมัน
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีวิศวกรรมแม่พิมพ์ และเครื่องมือ) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รางวัลหรือทุนการศึกษา	พ.ศ. 2561 ทุนสนับสนุนค่าธรรมเนียมการศึกษาสำหรับนิสิตระดับปริญญาโท หลักสูตรเหมาจ่าย แบบเต็มเวลา แผน ก แบบ ก 2 พ.ศ. 2563 ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในรายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับนานาชาติเรื่อง Effects of rice husk on manufacturability of bioplastic plant-pot from poly(lactic acid)/rice husk green composites. The International Polymer Conference of Thailand (PCT-10), 2020, 210-216. พศ. 2564 ตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารระดับนานาชาติเรื่อง Enhanced biodegradation and processability of biodegradable package from poly(lactic acid)/poly(butylene succinate)/rice-husk green composites. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138.27: 50652.