โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การเตรียมสารเคลือบผิวชีวภาพคอมพอสิตสำหรับกระดาษบรรจุภัณฑ์

ชื่อนิสิต นาย ภูธเนศ ศรีรัฐ

นางสาว รติมา วิเศษเกษม

ภาควิชา เทคโนโลยีทางภาพและเทคโนโลยีทางการพิมพ์

ปีการศึกษา 2562

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

****

เนื่องจากสถานการณ์การระบาดของโรคไวรัสโควิด-19

ในช่วงภาคปลายของปีการศึกษา 2562

จึงส่งผลให้ไม่สามารถดำเนินการได้ครบตามวัตถุประสงค์ของโครงงาน

****

หัวข้อโครงการวิทยาศาสตร์ชื่อ	การเตรียมสารเคลือบผิวชีวภาพคอมพอสิตสำหรับกระดาษบรรจุภัณฑ์ Preparation of biocomposite coatings for packaging paper
นิสิตผู้ดำเนินโครงการ	นายภูธเนศ ศรีรัฐ 5932632123 นางสาวรติมา วิเศษเกษม 5932634423
ภาควิชา	ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	รองศาสตราจารย์ ดร.สิริวรรณ พัฒนาฤดี

ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและเทคโนโลยีทางการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ยอมรับรายงานโครงงานวิทยาศาสตร์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... หัวหน้าภาควิชาฯ

(รองศาสตราจารย์ ดร. พิชญดา เกตุเมฆ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สิริวรรณ พัฒนาฤดี)

นิสิตผู้ดำเนินโครงการ นายภูธเนศ ศรีรัฐ 5932632123

นางสาวรติมา วิเศษเกษม 5932634423

ชื่อเรื่อง การเตรียมสารเคลือบผิวชีวภาพคอมพอสิตสำหรับกระดาษบรรจุภัณฑ์

Preparation of biocomposite coatings for packaging paper

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร.สิริวรรณ พัฒนาฤดี

บทคัดย่อ

โครงการนี้ศึกษาการเตรียมสารเคลือบผิวจากพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิบิวทิลีนซักซิเนตผสมนาโนเคลย์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน (0, 0.5, 1, 3, 5 %wt) ทำการเคลือบผิวด้วยเทคนิคแบบจุ่ม (dip coating) ตรวจวัดสมบัติเชิงกายภาพของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิว เช่น สมบัติการทนต่อแรงดึง ความพรุน ความทรงรูป การเปียกผิว การยึดติดกับหมึกพิมพ์ โดยผลการทดลองหลังเคลือบผิวพบว่า น้ำหนักสารเคลือบ PBS ที่ผสมเคลย์ 0 %wt มีน้ำหนักอยู่ที่ 17.92 ± 2.31 กรัม / ต.ร.ม. น้ำหนักสารเคลือบ PBS ที่ผสมเคลย์ 1 %wt มีน้ำหนักอยู่ที่ 18.45 ± 3.31 กรัม / ต.ร.ม. ส่วนผลการทดสอบด้านอื่นๆได้มีการอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม เนื่องจากสถานการณ์การระบาดของไวรัสโควิด-19 จึงไม่สามารถทำการทดลองให้เสร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ได้

ภาควิชา เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ ลายมือชื่อนิสิตผู้ดำเนินงาน.....

คณะวิทยาศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิตผู้ดำเนินงาน.....

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

กิตติกรรมประกาศ

โครงการ การเตรียมสารเคลือบผิวชีวภาพคอมพอสิตสำหรับกระดาษบรรจุภัณฑ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการเรียนการสอนตามหลักสูตรในระดับปริญญาตรีของภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ เพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ ประจำปีการศึกษา 2562 โครงการนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์จากอาจารย์และบุคคลากรหลายฝ่าย ขอขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับบุคลากรทุกท่านดังรายนามต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร.สิริวรรณ พัฒนาฤดี อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่กรุณาแนะแนวในการศึกษาและทำโครงการ ให้ความรู้และคำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ในการดำเนินโครงการให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี
2. บริษัท TPBI Public Company Limited ที่กรุณาอนุเคราะห์เม็ดพลาสติก PBS สำหรับทำโครงการนี้
3. คณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในทุกๆเรื่อง
4. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนเงินทุนวิจัยสำหรับโครงการนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญรูป	ง
สารบัญตาราง	จ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 บรรจุภัณฑ์กระดาษ	3
2.2 กระดาษชานอ้อย	5
2.3 พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้	6
2.4 พอลิบิวทิลีนซักซิเนต	9
2.5 แร่ดิน	11
2.6 ลักษณะการกระจายตัวของ Polymer/clay Nanocomposites	13
2.7 การเคลือบกระดาษ	14
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 สารเคมี วัสดุ และอุปกรณ์	15
3.2 วิธีการทดลอง	16
3.3 วิธีการคำนวณหาน้ำหนักสารเคลือบ	17
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1น้ำหนักสารเคลือบ	18
4.2 ผลการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	31
5.2 ข้อเสนอแนะ	31
เอกสารอ้างอิง	32
ภาคผนวก	35

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 1	กระบวนการผลิตเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ของบรรจุภัณฑ์ชานอ้อย	6
รูปที่ 2	โครงสร้างทางเคมีของ PBS	10
รูปที่ 3	กระบวนการเตรียมมอนอเมอร์ตั้งต้นจากกระบวนการหมัก	10
รูปที่ 4	Diagrammatic sketch of the structure of smectite	11
รูปที่ 5	ลักษณะของการกระจายตัวของนาโนคอมพอสิตทั้ง 3 ประเภท	13
รูปที่ 6	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสารเคลือบผิวกระดาษ และความหนาในการเคลือบ	21
รูปที่ 7	ความสัมพันธ์ของความแข็งแรงต่อแรงดึง และ Tensile modulus ของ PBS และ PBS/OMMT nanocomposites ในปริมาณต่าง ๆ	23
รูปที่ 8	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่กระดาษดูดซึม และน้ำาหนักสารเคลือบของกระดาษก่อนเคลือบผิวและหลังเคลือบผิว	24
รูปที่ 9	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ให้อากาศผ่านได้ และน้ำหนักสารเคลือบของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิว	27
รูปที่ 10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเรียบและน้ำหนักสารเคลือบของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิว	28

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 น้ำหนักกระดาษก่อนเคลือบผิวและหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ PBS ผสมเคลย์ที่ 0%wt 18
ตารางที่ 2 น้ำหนักกระดาษก่อนเคลือบผิวและหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ PBS ผสมเคลย์ที่ 1%wt 19
ตารางที่ 3 น้ำหนักสารเคลือบ PBS บนกระดาษชานอ้อย 20
ตารางที่ 4 ความหนา น้ำหนักมาตรฐาน และความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษเคลือบ PBAT 22
ตารางที่ 5 การดูดซึมน้ำของกระดาษเคลือบ PBAT 25
ตารางที่ 6 มุมสัมผัสของกระดาษเคลือบ PBAT 26
ตารางที่ 7 ความสามารถในการยึดติดของกระดาษเคลือบผิวด้วย PLA ผสม Plasticizer 29

บทที่ 1
บทนำ

1. ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ

ปัจจุบันกระดาษเป็นวัสดุที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในการทำบรรจุภัณฑ์ แต่โครงสร้างภายในของกระดาษมีสมบัติบางประการที่จำเป็นต้องมีการปรับปรุง รวมทั้งมีการอนุรักษ์ธรรมชาติมากขึ้น จึงได้มีการนำกระดาษมาเคลือบผิว เพื่อปรับปรุงสมบัติของกระดาษให้เหมาะสำหรับการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการประยุกต์ใช้งานพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ ชนิดพอลิบิวทิลีนซักซิเนต (poly(butylene succinate): PBS) ที่ได้จากการสังเคราะห์ระหว่างกรดซักซินิก (succinic acid) และ1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) [1] ซึ่งมีสมบัติการหลอมขึ้นรูปได้ง่าย มีความยืดหยุ่น ทนต่อความร้อนดี และมีการย่อยสลายได้เอง เมื่อฝังกลบดินจึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ทำให้นิยมมาใช้ผลิตแก้วพลาสติกหรือผลิตเป็นพลาสติกสำหรับเคลือบบนบรรจุภัณฑ์กระดาษ เช่น นำมาเคลือบบนถ้วยกระดาษ เพื่อทดแทนการใช้บรรจุภัณฑ์ที่เคลือบด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene : LDPE) นอกจากนั้นการเตรียมสารเคลือบผิวคอมพอสิตจากนาโนคอมพอสิต ยังทำให้คุณสมบัติบางอย่างของพอลิเมอร์ชีวภาพดีขึ้น เช่น ความสามารถในการทนต่อแรงดึง ทนต่อแรงดัดโค้ง การขวางกั้นการซึมผ่านของแก๊สและน้ำ และทนต่อความร้อนสูงได้ดี [2]

Phua และคณะ [3] ทำการเตรียมพอลิบิวทิลีนซักซิเนต (PBS)โดยเติมออร์กาโนมอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (organo – montmorillonite: OMMT) ในปริมาณต่างๆ ดังนี้ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 %wt (เปอร์เซนต์มวล) ผลพบว่าการเติม OMMT ในปริมาณสูงขึ้นก่อให้เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) ส่งผลให้ชิ้นงานนาโนคอมพอสิตมีสมบัติการทนต่อแรงดึงต่ำลง การเติมเคลย์ที่ปริมาณ 2%wt ชิ้นงานที่ได้มีสมบัติการทนต่อแรงดึง การยืดตัว และความสามารถในการโค้งงอเพิ่มขึ้นสูงสุด นอกจากนี้การเติม OMMT ส่งผลให้ชิ้นงานนาโนคอมพอสิตมีสมบัติการทนต่อความร้อนได้ดีขึ้น

Khankrua และคณะ [4] ศึกษาผลของพอลิเมอร์ชีวภาพ 3 ชนิด ได้แก่ พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid): PLA), พอลิบิวทิลีนซักซิเนต (PBS) และ พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาเลอเรต) (poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate: PHBV) ที่เติมซิลิกานาโนคอมพอสิตในปริมาณ 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.5 และ 5.0%wt (เปอร์เซนต์มวล) พบว่าการเติมซิลิกาส่งผลปรับปรุงสมบัติการทนต่อความร้อนของให้ชิ้นงานทั้ง 3 ชนิด การเติมที่ 5.0%wt ส่งผลให้ชิ้นงาน PHBV มีการปรับปรุงสมบัติการทนต่อความร้อนสูงสุด การเติมซิลิกาสูงกว่า 1.0%wt ส่งผลให้สมบัติเชิงกายภาพภาพและสมบัติการยืดตัวของชิ้นงานทั้ง 3 ชนิดลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากการจับกลุ่มก้อนของซิลิกาที่พบในปริมาณการเติมสูง ก่อให้เกิดจุดรวมของความเค้น (stress) PBS มีค่ามอดุลัสต่ำกว่า PLA และ PHBV หากแต่มีความสามารถในการยืดตัว และการทนต่อแรงกระแทกสูงกว่า PLA และ PHBV และการเติมซิลิกาที่ 0.5%wt ช่วยปรับปรุงสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน PHBV

Someya และคณะ [5] นำพอลิบิวทิลีนซักซิเนต (PBS) มาเติมออร์กาโนเคลย์ โมดิฟายชนิดต่างๆ เช่น dodecylamine modified (DA-M), octa-decylamine modified (ODA-M), 12-aminolauric acid modified (ALA-M), *N* - lauryldiethanolamine (LEA-M) และ 1 - [*N,N*-bis(2-hydroxyethyl)amino]-2-propanol modified (HEA-M) เมื่อตรวจวิเคราะห์ลักษณะการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ชนิดต่างๆ ใน PBS พบว่า มีลักษณะการแทรกสอดของโมเลกุลของพอลิเมอร์เข้าในชั้นของซิลิเกตจากระดับมากไปน้อยดังนี้ LEA-M, ODA-M, DA-M, ALA-M และ HEA-M ออร์กาโนเคลย์ที่มีระดับการแทรกสอดมากส่งผลให้ชิ้นงานมีมอดุลัสของความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile modulus) และมอดุลัสของความทนทานต่อการโค้งงอ (flexural modulus) เพิ่มขึ้น

โครงการนี้สนใจศึกษาการเตรียมสารเคลือบผิวชีวภาพคอมพอสิตจากพอลิบิวทิลีนซักซิเนตผสมนาโนเคลย์และสมบัติของกระดาษหลังการเคลือบผิว เพื่อปรับปรุงกระดาษให้มีสมบัติเชิงกายภาพ ได้แก่ สมบัติการทนต่อแรงดึง สมบัติความพรุน สมบัติการทรงรูป สมบัติการเปียกผิว และสมบัติการยึดติดของหมึกพิมพ์ฐานน้ำ ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานบรรจุภัณฑ์

2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาผลของสารเคลือบผิวชีวภาพคอมพอสิตที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของกระดาษเคลือบผิว
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของกระดาษเคลือบผิว ได้แก่ สมบัติการทนต่อแรงดึง สมบัติความพรุน สมบัติการทรงรูป สมบัติการเปียกผิว และสมบัติการยึดติดของหมึกพิมพ์ฐานน้ำ

3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ก. ในด้านความรู้และประสบการณ์ต่อตัวนิสิตเอง

1. ได้ความรู้วิธีการเตรียมสารเคลือบผิวและเทคนิคในการเคลือบผิวกระดาษ
2. เรียนรู้วิธีการทดสอบสมบัติกระดาษ
3. นำความรู้ไปประยุกต์ใช้หรือแก้ปัญหางานที่ทำในอนาคตได้

ข. ความรู้ ความเข้าใจที่นำไปสู่การแก้ไขปัญหาของสังคมหรือสภาพแวดล้อม

1. ได้อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ชีวภาพและเคลย์ที่เหมาะสมสำหรับใช้งานเป็นสารเคลือบผิวกระดาษ
2. ได้ข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของกระดาษหลังการเคลือบผิวด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพคอมพอสิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อประยุกต์ใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 บรรจุภัณฑ์กระดาษ

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาทั่วโลกมีการรณรงค์ให้อนุรักษ์สิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้นด้วยการลดการใช้บรรจุภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติก แล้วมาใช้บรรจุภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะกระดาษเป็นหนึ่งในวัสดุที่เป็นที่นิยมในการนำมาทำบรรจุภัณฑ์ แม้กระดาษจะมีข้อเสียที่ไม่สามารถกั้นการซึมผ่านของน้ำและอากาศได้ จึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพเพิ่มเติม แต่ข้อดีของการนำกระดาษมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ก็คือกระดาษมีความสามารถในการพิมพ์ที่ดี (printability) และสามารถใช้นำกลับมาประยุกต์ใช้ใหม่ได้ (Recycle) จึงไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ และสามารถนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ได้หลากหลายชนิด เช่น ถุงกระดาษ กล่องกระดาษ เป็นต้น ซึ่งในแต่ละชนิดมีความเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะของสินค้าและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นคุณสมบัติของกระดาษที่ทำจากเยื่อไม้ธรรมดาจึงได้รับการพัฒนาปรับปรุงคุณภาพขึ้น โดยการผสมหรือเคลือบผิวกระดาษให้มีคุณสมบัติที่เหมาจะบรรจุสิ่งของให้เหมาะสมกับการใช้งานมากยิ่งขึ้นโดยกระดาษสามารถนำไปทำบรรจุภัณฑ์ต่างๆได้ดังนี้ [6]

1.ซองกระดาษ (paper envelope) ใช้บรรจุสินค้า เช่น ใบเลื่อย หัวสว่าน ยาเม็ด และเมล็ดพืช การเลือกใช้ขนาดและ ชนิดของซองขึ้นกับชนิดของสินค้า รูปร่างของสินค้าเป็นหลัก

2.ถุงกระดาษ (Paper Bag) มีทั้งแบบแบนราบ แบบที่มีก้นถุง และแบบผนึก 4 ด้าน สมบัติของกระดาษที่ใช้ขึ้นกับการใช้งานเป็นหลัก หากสินค้าที่มีน้ำหนักมากควรใช้กระดาษที่มีความแข็งแรงในการทนต่อแรงดึง แรงฉีก และแรงดันทะลุ เพื่อให้กระดาษที่ใช้มาทำเป็นบรรจุภัณฑ์รองรับน้ำหนักสินค้าที่มากได้ นอกจากนั้นยังมีถุงกระดาษหลายชั้น (Multiwall Paper Sack) สำหรับขนส่งสินค้าที่มีน้ำหนักมากกว่า 10 กิโลกรัม ได้แก่สินค้าจำพวกปูนซีเมนต์ อาหารสัตว์ สารเคมี หรือ เม็ดพลาสติก โดยส่วนใหญ่นิยมใช้กระดาษคราฟต์ (Kraft) ซึ่งมีความหนานำมาซ้อนเป็นผนังหลายชั้น (Multiwall Bag) หรือเคลือบผิวแตกต่างกันไปตามหน้าที่ใช้สอย

3.เยื่อกระดาษขึ้นรูป (Molded Pulp Container) มีทั้งชนิดที่ทำจากเยื่อบริสุทธิ์ซึ่งใช้บรรจุอาหารสำเร็จรูปและอาหารที่เข้าตู้อบไมโครเวฟได้ นอกจากนั้นยังมีชนิดที่ทำจากเยื่อเศษกระดาษซึ่งใช้บรรจุไข่ ผัก ผลไม้สด และยังนำมาทำเป็นวัสดุกันกระแทก

4.กระป๋องกระดาษ (Paper Composite Can) เป็นบรรจุภัณฑ์รูปทรงกระบอกที่ได้จากการพันกระดาษทับกันหลายๆชั้น พันแบบเกลียวหรือแบบแนวตรง ถ้าใช้กระดาษแต่เพียงอย่างเดียวจะเรียกว่า Paper Can นิยมใช้บรรจุของแห้ง แต่ถ้าใช้วัสดุร่วมระหว่างกระดาษ แผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ และแผ่นฟิล์มพลาสติกเรียกว่า Composite Can ซึ่งมักบรรจุอาหารประเภทขนมขบเคี้ยวต่าง ๆ โดยฝากระป๋องมักเป็นโลหะหรือพลาสติก การเลือกใช้ต้องพิจารณาคุณภาพของตะเข็บระหว่างตัวกระป๋องฝาและรอยต่อของการพัน เพื่อป้องกันมิให้เกิดการรั่วซึม

5.ถังกระดาษ (Fiber Drum) มีลักษณะแบบเดียวกับกระป๋องกระดาษ แต่มีขนาดใหญ่ ใช้ในการขนส่งเป็นหลัก ซึ่งโดย ส่วนใหญ่แล้วใช้บรรจุสารเคมี

6.กล่องกระดาษแข็ง (Paperboard Box) เป็นบรรจุภัณฑ์ขายปลีกที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก กระดาษแข็งมีหลายชนิด เช่น กระดาษขาวไม่เคลือบ เป็นกระดาษที่เนื้อหยาบมักนำมาใช้ทำเป็นกล่องรองเท้า เป็นต้น นอกจากนั้นกระดาษแข็งยังมีชนิดที่เป็น กระดาษการ์ด และกระดาษอาร์ตมัน เป็นต้น อาจมีการเคลือบวัสดุอื่น เช่น วานิช หรือพลาสติก เพื่อปรับสมบัติของกระดาษให้ดีขึ้น เพื่อใช้สำหรับการบรรจุสินค้าอุปโภคและบริโภค โดยรูปแบบของกล่องกระดาษแข็งแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ กล่องแบบพับได้ (Folding Carton) หรือ (Cardboard) และกล่องแบบคงรูป (Set-Up Box)

7.กล่องกระดาษลูกฟูก (Corrugated Box) เป็นบรรจุภัณฑ์ที่นิยมใช้ในการขนส่ง และมีปริมาณการใช้สูงสุด เนื่องจากเป็นกล่องที่มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง อีกทั้งยังสามารถพิมพ์ข้อความหรือรูปต่างๆได้เพื่อดึงดูดความสนใจนอกจากนี้ยังมีการพัฒนาออกแบบกล่องกระดาษลูกฟูกให้เป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งและชั้นวางสินค้า โดยโครงสร้างของกล่องกระดาษลูกฟูกขึ้นกับชนิดของกระดาษคราฟต์ที่นำมาใช้เป็นส่วนประกอบของกล่องกระดาษลูกฟูก ชนิดของลอน รูปแบบของกล่อง รอยต่อของกล่อง รวมทั้งรูปแบบการปิดฝากล่อง ในการออกแบบกล่องกระดาษลูกฟูก นั้นต้องคำนึงถึงชนิดและน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ด้วย หากเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถรับน้ำหนักได้ด้วยตัวเอง เช่น กระป๋อง หรือขวดแก้ว การออกแบบก็จะคำนึงการต้านทานแรงดันทะลุเป็นหลัก ในทางตรงข้ามถ้าหากผลิตภัณฑ์มีความเบาบอบบาง การออกแบบก็จะคำนึงถึงการต้านทานแรงกดทับเป็นหลัก

2.2 กระดาษชานอ้อย

กระดาษมักผลิตมาจากเส้นใยธรรมชาติซึ่งในปัจจุบันนิยมนำพืชเกษตร เช่น ข้าวโพด ใบตอง เนื่องจากสามารถหาได้ง่าย โดยที่เป็นที่นิยมมากที่สุดคือ ชานอ้อย เพราะชานอ้อยสามารถหาได้ง่ายจากเศษเหลือของลำต้นอ้อยมีลักษณะเป็นเส้นใยที่หีบเอาน้ำอ้อยหรือน้ำตาลออกจากท่อนอ้อยแล้ว เป็นวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล ประโยชน์ที่ได้จากชานอ้อย ได้แก่ การทำบรรจุภัณฑ์ โดยบรรจุภัณฑ์อาหารที่ทำจากเยื่อกระดาษชานอ้อยเป็นบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นผลผลิตจากเทคโนโลยีชีวภาพที่นำวัสดุเหลือใช้อย่างชานอ้อยที่เหลือจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลมาใช้ เนื่องจากประเทศไทยเป็นผู้ผลิตน้ำตาลจึงทำให้มีชานอ้อยที่เหลือจากการผลิตเป็นจำนวนมาก จึงสามารถนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับใส่อาหารทดแทนการใช้กล่องโฟมที่สร้างปัญหากับสิ่งแวดล้อมและมนุษย์ได้ โดยกระบวนการผลิตเริ่มจากการนำเยื่อกระดาษชานอ้อยไปผสมตีผ่านกระบวนการป้องกันการรั่วซึมของน้ำและสามารถขึ้นเป็นรูปบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เช่น จาน ชาม ถาด ถ้วยน้ำ และกล่องพร้อมฝาปิด เป็นต้น โดยเมื่อนำบรรจุภัณฑ์จากชานอ้อยมาเปรียบเทียบกับกล่องโฟมจะเห็นว่าบรรจุภัณฑ์ชานอ้อยจะมีสีหม่นไม่ขาวสะอาดเหมือนกล่องโฟม เนื่องจากในกระบวนการผลิตจะไม่ใช้คลอรีนฟอกสีทำให้สีที่ได้ไม่ขาวสะอาดแต่จะมีการฆ่าเชื้อก่อนถึงมือ ผู้บริโภคที่อุณหภูมิ 160 °C โดยในกระบวนการผลิตจะไม่เหลือของเสียจากการผลิตและสามารถนำกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่ได้ทั้งหมดและยังใช้เวลาในการย่อยสลายได้เองในธรรมชาติภายใน 30-45 วัน ในขณะที่โฟมไม่สามารถย่อยสลายได้เองและต้องสิ้นเปลืองพลังงานและสร้างของเสียจากกระบวนการผลิต และกระบวนการกำจัด ซึ่งต่างจากบรรจุภัณฑ์ชานอ้อยผลิตจากธรรมชาติ 100% สามารถทนความเย็นและความร้อนสูงได้ตั้งแต่ -40 ถึง 220 °C จึงสามารถใช้กับการแช่แข็งหรือใช้เป็นภาชนะในเตาไมโครเวฟหรือเตาอบได้โดยไม่ก่อให้เกิดสารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งเมื่อถูกความร้อนซึ่งต่างจากโฟมทั่วไปที่เป็นผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมีที่ต้องอาศัยการนำเข้าวัตถุดิบจากต่างประเทศถึงแม้ว่าบรรจุภัณฑ์ชานอ้อยจะเป็นมิตรกับมนุษย์และสิ่งแวดล้อมแต่ก็ยังไม่ค่อยเป็นที่นิยมในบ้านเราขณะที่ประเทศในแถบยุโรป อเมริกา หรือญี่ปุ่นกลายเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมมากกว่าโฟมเนื่องจากปลอดภัยต่อผู้บริโภคแต่มีราคาที่สูงกว่าโฟมประมาณ 2 เท่า สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการสนับสนุนที่ชัดเจน หากมีการสนับสนุนให้ใช้บรรจุภัณฑ์ชานอ้อยมากขึ้นอาจทำให้ราคาของบรรจุภัณฑ์ถูกลงได้ [7]

รูปที่ 1 กระบวนการผลิตเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ของบรรจุภัณฑ์ชานอ้อย[7]

2.3 พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ (Degradable plastic)

พลาสติกย่อยสลายได้หรือพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ (Degradable plastics) เป็นพลาสติกที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ทดแทนพลาสติกทั่วไปที่ใช้เวลาในการย่อยสลายหลายชั่วอายุคน ซึ่งการที่พลาสติกจะสามารถย่อยสลายได้นั้นจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้เฉพาะ ซึ่งก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการของพลาสติกไปโดยจะสามารถทดสอบการย่อยสลายตามมาตรฐานที่เหมาะสมได้ เช่น มาตรฐาน ISO (International Organization for Standardization) มาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) และมาตรฐาน DIN (Deutsches Institut fur Normung หรือ German Institute for Standardization) อย่างไรก็ตามมาตรฐานเหล่านี้ต่างก็มีหลักการที่คล้ายคลึงกัน เช่น การวัดความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradability) การวัดความสามารถการแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ (Disintegration) ของวัสดุทดสอบในสภาวะที่ย่อยสลายด้วยการหมักปุ๋ย (Compost) การประเมินการย่อยสลายเบื้องต้น รวมถึงปริมาณโลหะหนัก และความเป็นพิษต่อระบบนิเวศของปุ๋ยที่ได้จากการหมัก (Ecotoxicity of the compost) เป็นต้น [8]

2.3.1 วัตถุดิบ ที่ใช้ในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถแบ่งได้ตาม แหล่งวัตถุดิบ ซึ่งมี 2 ประเภท ได้แก่ วัตถุดิบจากปิโตรเคมี และวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ โดยทั้ง 2 แหล่งวัตถุดิบแตกต่างกันตรงที่วัตถุดิบจาก

ปิโตรเคมีนั้นไม่สามารถหามาทดแทนได้ เป็นแหล่งวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป เช่น น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน นอกจากนั้นกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้ยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมอีกด้วย แต่แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ ได้แก่ พืชผลทางการเกษตรจาก พวกแป้งและน้ำตาล เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี มันสำปะหลัง อ้อยและปาล์ม นอกจากพืชผลทางการเกษตรแล้ว ยังมีการนำผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมโคนม เช่น หางนม (Whey permeate) มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตมอนอเมอร์ เนื่องจากความต้องการในการลดต้นทุนการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงมีการแสวงหามวลชีวภาพ ประเภทอื่นที่มีศักยภาพและราคาต่ำมาเป็นวัตถุดิบอีกด้วย

2.3.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ พลาสติกที่ย่อยสลายได้สามารถจำแนกได้ตามกลไกของการย่อยสลายได้ดังต่อไปนี้

1. พลาสติกย่อยสลายเชิงกล (Mechanical degradation plastics) ย่อยสลายโดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นงานพลาสติกทำให้ส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้นซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการทำให้พลาสติกแตก เช่น บด หรือตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ เป็นต้น

2. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable plastics) พลาสติกที่ย่อยสลายได้ด้วยแสงนั้นจำเป็นต้องมีแสงอาทิตย์ หรือรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) เป็นตัวทำปฏิกิริยา พลาสติกชนิดนี้จะไม่สามารถย่อยสลายได้ภายในบ่อฝัง กลบขยะ หรือในสภาวะแวดล้อมที่ปิด ตลอดจนพลาสติกที่เคลือบผิวที่หนาจนเกินไปจนทำให้ตัวพลาสติกนั้นไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง ในการย่อยสลายได้ด้วยแสงนั้นจำเป็นต้องเติมสารที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกเพื่อให้หมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีไม่แข็งแรงแตกหักได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับรังสียูวี โดยข้อจำกัดของพลาสติกย่อยสลายประเภทนี้ คือ ต้องใช้ในภูมิประเทศที่มีแสงแดด สม่ำเสมอ เพื่อให้สลายตัวได้อย่างต่อเนื่อง

3. พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation plastics) ในบางครั้งเรียกว่าพลาสติกที่สลายตัวได้โดยไม่ต้องพึ่งพาจุลินทรีย์ (Bioerodable plastics) การย่อยสลายพลาสติกประเภทนี้จะค่อยๆ เป็นไปตามธรรมชาติอย่างช้าๆ จากการเติมออกซิเจนเข้าไปในโมเลกลุของพอลิเมอร์ โดยมีความร้อน และแสงแดด หรือแรงทางกล กระทำด้วยจนกลายเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์(Hydroperoxide, ROOH) ซึ่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ จะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและเสียสมบัติทางกลอย่างรวดเร็ว

4. พลาสติกย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation plastics) โดยทั่วไปปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) โดยที่ประเภทที่ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แบ่งย่อยได้อีก 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์ (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์ในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจาก ภายนอกมี 2 ชนิด คือ ใช้เอนไซม์ต่าง ๆ (Enzyme) ในการเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ ส่วนอีกชนิดไม่ใช้เอนไซม์ในการเร่งปฏิกิริยาซึ่งจัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี

5. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) เป็นพลาสติกที่มีสมบัติการใช้งานเช่นเดียวกับพลาสติกโดยทั่วไป แต่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ เอนไซม์ และแบคทีเรียในธรรมชาติ เมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมวลชีวภาพ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของพืชรวมถึง มันสำปะหลัง และข้าวโพด ที่เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ภาชนะบรรจุพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่กำลังได้รับความนิยมใน ปัจจุบันถูกผลิตขึ้นจากโมโนเมอร์ชีวภาพ เช่น พอลิคาโพรแล็กโตน (Polycaprolactone : PCL) ,พอลิแล็กติกแอซิด (Polylactic acid : PLA) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol : PVA) เป็นต้น [9]

- พอลิคาโพรแล็กโตน (Polycaprolactone : PCL) เป็นพลาสติกที่ได้จากการสังเคราะห์น้ำมันดิบ นิยมนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้ในธรรมชาติโดยผสมกับแป้ง เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มความสามารถในการย่อยสลาย ข้อดีของ PCL คือมีจุดหลอมเหลวต่ำ ไม่มีพิษ และสามารถต้านทานน้ำหรือน้ำมันได้ดี
- พอลิแล็กติกแอซิด (Polylactic acid : PLA) เป็นพลาสติกที่ผลิตจากกระบวนการหมักพืชจำพวกแป้ง เช่น ข้าวโพด ซึ่งในปัจจุบันกำลังได้รับความนิยมอย่างมาก เป็นอีกทางเลือกที่จะมาทดแทนพลาสติกที่ได้จากปิโตรเคมี โดย PLA นี้สามารถย่อยสลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ในเวลา 3 เดือน ในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ ในทางอุตสาหกรรมสามารถย่อยสลายในความร้อน และสามารถเป็นอาหารของเชื้อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายในถังขยะ หรือหลุมขยะได้ ข้อดีของ PLA คือ มีลักษณะใส มีความแวววาวสูง ขึ้นอยู่กับสารเติมแต่ง สามารถดักกลิ่นและรสชาติได้ดี มีความต้านทานต่อน้ำมัน และ ไขมันสูง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำสามารถแพร่ผ่านได้ดี

- พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol : PVA) เป็นพลาสติกสังเคราะห์ที่มักใช้ใน อุตสาหกรรมกาว อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ และงานเคลือบผิวต่าง ๆ เนื่องจาก PVA นี้มีข้อดีที่มีความเหนียว ทนต่อการเกิดรอยขูด หรือถลอก มีความสามารถต่อการต้านทานแรงดึงได้สูงใกล้เคียงกับพลาสติกทั่วไป

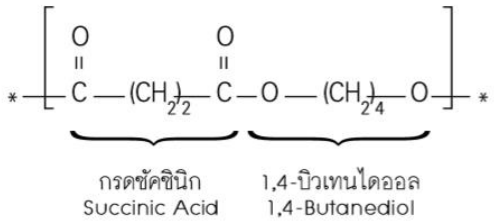
2.4 พอลิบิวทิลีนซักซิเนต (Poly(butylenesuccinate) : PBS)

พอลิบิวทิลีนซักซิเนต (Poly(butylenesuccinate) : PBS) เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่ได้รับความสนใจมากในพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) กลุ่มพอลิเอสเทอร์ สำหรับการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อการค้าอย่างแพร่หลายในปัจจุบันนี้ โดยพอลิเมอร์ชนิดนี้สามารถเตรียมได้จากแหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ [9]

<u>วัตถุดิบและกระบวนการผลิต PBS</u>

โดยวัตถุดิบที่ใช้นำมาผลิตPBS เป็นวัตถุดิบที่สามารถหามาทดแทนได้อย่างวัตถุดิบชีวมวล เช่น แป้งมันสำปะหลัง เพื่อลดต้นทุนการใช้เม็ดพลาสติกลง และไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการขึ้นรูปและการย่อยสลายทางชีวภาพเมื่อผ่านการใช้งานแล้ว สำหรับแป้งมันสำปะหลังที่นิยม คือแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ เช่น แป้งดัดแปรเอสเทอร์ (Ester modified starch : EMS), แป้งไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic starch : HBS) และแป้งพรีเจล (Pregelatinized starch : PGS) เพื่อนำมาใช้งานด้านการเกษตร เช่น พลาสติกคลุมหน้าดินทางการเกษตร (Mulch film), ถุงเพาะชำต้นกล้า เป็นต้น

ซึ่งพอลิบิวทีลีนซักซิเนต เป็นพอลิเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ ที่ผลิตได้จากกรดซักซินิก (Succinic Acid) และ 1,4 บิวเทนไดออล (1,4- butanediol) ซึ่งมอนอเมอร์ ทั้งสองชนิดนี้สามารถเตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมีและจากวัตถุดิบทางธรรมชาติ โดยผ่านกระบวนการหมักแป้งและน้ำตาลได้เป็นกรดซักซินิก เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิต ส่วน 1,4 – บิวเทนไดออล ผ่านการเตรียมเป็นมาเลอิคแอนไฮไดด์ เมื่อได้มอนอเมอร์ทั้ง 2 ชนิดจึงนำมาผ่านกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่น (Polycondensation) เกิดมาเป็นพอลิบิวทีลีนซักซิเนต



รูปที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของ PBS[9]

รูปที่ 3 กระบวนการเตรียมมอนอเมอร์ตั้งต้นจากกระบวนการหมัก[9]

<u>สมบัติของ PBS</u>

PBS มีลักษณะทางกายภาพเป็น เรซินสีขาวขุ่น มีความยืดหยุ่น (flexibility) เนื่องจากโครงสร้างเป็นโซ่ตรงและมีหมู่เอสเทอร์เป็นองค์ประกอบ ทำให้ PBS มีอุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting temperature) และความเป็นผลึกสูง อีกทั้งยังทนความร้อน ได้ถึง 200 °C สามารถขึ้นรูปได้ง่ายเหมือนเทอร์โมพลาสติกทั่วไป นอกจากนั้นยังมีการนำ PBS ไปใช้งานแทนที่พลาสติกที่ใช้อยู่ทั่วไป เช่น ในอตุสาหกรรมเกษตร มีการนำไปผลิตเป็นฟิล์มคลุมดิน กระถางต้นไม้ วัสดุห่อหุ้มหรือปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ฆ่าวัชพืช เป็นต้น หรือในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ จะเน้นผลิตภัณฑ์ประเภทใช้แล้วทิ้ง เช่น ฟิล์มเคลือบแก้ว กระดาษ หรือขวดน้ำ ฟิล์มบรรจุภัณฑ์และอาหาร เป็นต้น [10,11]

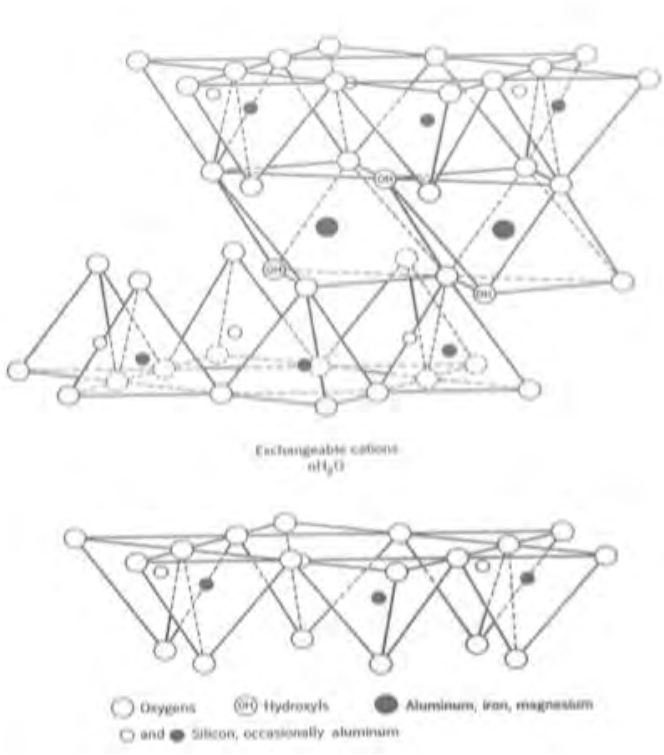
<u>การย่อยสลายทางชีวภาพ</u>

PBS สามารถย่อยสลายได้ดีในดินที่มีการถ่ายเทของอากาศที่ดี เพราะมีจุลินทรีย์และมีออกซิเจน ซึ่ง PBS สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะที่ อุณหภูมิ 55 °C เป็นเวลา 80 -97 วัน หากดินที่ใช้เป็นดินที่ผสมปุ๋ยหมักช่วยให้การย่อยสลายเกิดได้ดีและเร็วมากยิ่งขึ้นเนื่องจากจำนวนจุลินทรีย์มีผลต่อการย่อยสลาย เพราะจุลินทรีย์จะปลดปล่อยเอนไซม์ที่จำเพาะต่อการย่อยสลายสายพอลิเมอร์ส่งผลให้เกิดการแตกหักของชิ้นพลาสติกมากขึ้น และเป็นผลทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักของพลาสติก และการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลหลังจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยา Mineralization โดยผ่านทางการดูดซึมชีวภาพ (assimilation) ซึ่งจะเกิดขึ้นหลังจากโมเลกุลเล็กที่เกิดจากการย่อยสลายจะถูกขนส่งผ่านทางเยื่อหุ้มเซลล์และส่งเข้าสู่กระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ต่อไป [11]

2.5 แร่ดิน (Clay)

ปัจจุบันการปรับปรุงคุณภาพของพลาสติกให้มีความแข็งแรงขึ้นมีอยู่หลายวิธีแต่หนึ่งในวิธีที่น่าสนใจคือการเติมสารเสริมแรงจำพวกแร่ดินลงไป เนื่องจากแร่ดิน เนื่องจากเป็นสารเสริมแรงธรรมชาติที่สามารถหาได้ง่ายและมีศักยภาพเพียงพอในการที่จะดัดแปลงเป็นสารเสริมแรงที่มีขนาดเล็กในระดับนาโน ซึ่งชนิดของ clay ที่สามารถนำไปทำเป็น nanocomposite ได้ก็คือ montmorillonite (MMT) [12]

Montmorillonite เป็น clay ที่อยู่ในประเภท 2 : 1 phyllosilicates มีสูตรโมเลกุล คือ $M_X(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$ โดย M_X คือ monovalent cation และ x เป็น degree of isomorphous substitution (ส่วนมากอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.3) มีความยาวของอนุภาคประมาณ 100 – 150 nm ปริมาณของน้ำในโครงสร้างสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้เพราะในความเป็นจริงแล้วเมื่อน้ำถูกดูด ซึมโดยผลึกของmontmorillonite จะทำให้เกิดการพองตัวขึ้นมีปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งจุดนี้เอง ทำให้สามารถนำ montmorillonite ไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย



รูปที่ 4 Diagrammatic sketch of the structure of smectite [12]

โครงสร้างผลึกพื้นฐานของ montmorillonite เป็นแบบ smectites คือมีชั้น octahedral alumina อยู่ระหว่างชั้น tetrahedral silicates อะตอมในชั้นทั้งสองนี้จะเป็นอะตอมของออกซิเจน โดยส่วนที่เป็นชั้น 3 ชั้น จะติดอยู่กับอีกหน่วยหนึ่งข้างบนโดยออกซิเจนในชั้นใกล้เคียงที่อยู่ติดกัน ซึ่งตรงส่วนนี้เองที่ทำให้เกิดพันธะที่อ่อนแอ ทำให้น้ำหรือโครงสร้างของ mineral เกิดการขยายตัวใน tetrahedral coordination นั้น silicon อาจถูกแทนที่ได้โดย aluminium หรือ phosphorus ส่วนใน octahedral coordination aluminium นั้นอาจจะถูกแทนที่โดย magnesium, iron, lithium, chromium, zinc หรือ nickle ความ แตกต่างในการแทนที่กันภายใน lattice ในส่วนของตำแหน่งและชนิดของธาตุนี้เอง ทำให้ montmorillonite เป็น clay ที่มีความหลากหลายมาก

หลักการทั่วไปของ nanocomposite

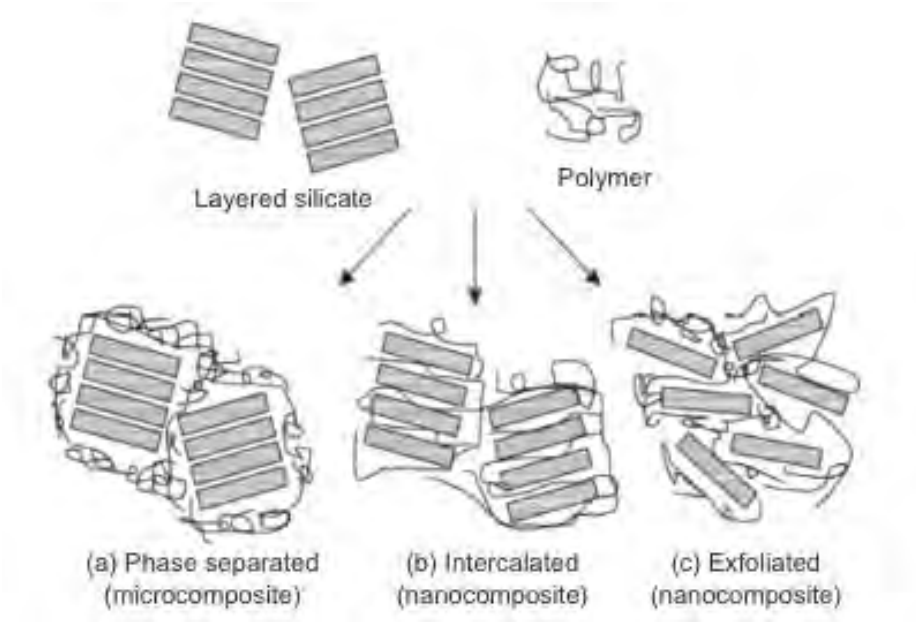
ในอุตสาหกรรมการผลิตพอลิเมอร์ที่มีการเติมอนุภาคบางชนิดลงไป เพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติบางอย่างของวัสดุ เช่น ความแข็ง (stiffness) ความเหนียว (toughness) ความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซความต้านทานต่อการติดไฟเป็นต้นซึ่งบางครั้งการเติมอนุภาคบางชนิดลงไปก็จะส่งผลเสียได้เช่น วัสดุเปราะแตกง่ายและไม่ใส

nanocomposite เป็นวัสดุเสริมแรงแบบใหม่ที่มีการเติมอนุภาคบางชนิดลงไปในพอลิเมอร์โดยอนุภาคมีขนาดด้านใดด้านหนึ่งที่มีขนาดเล็กอยู่ในระดับนาโนเมตรถ้าแบ่งชนิดของ nanoparticle ตามจำนวนด้านที่มีขนาดเล็กอยู่ในระดับนาโนเมตรจะสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดดังนี้ คือ [13]

1. ถ้าทุกด้านของอนุภาคขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรทุกด้านเช่น silica nanoparticle หรือ semiconductor nanocluster เป็นต้น
2. ถ้าอนุภาคมีด้านอยู่สองด้านที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรและอีกด้านหนึ่งมีขนาดที่ยาวมากจะเรียกอนุภาคชนิดนี้ว่า nanotube หรือ whisker ตัวอย่างเช่น carbon nanotube หรือ cellulose whisks
3. ถ้าอนุภาคมีขนาดอยู่ในระดับนาโนและสองด้านที่เหลือมีขนาดกว้างมากในกรณีนี้อนุภาคจะมีลักษณะเป็นแผ่นซึ่งมีความหนาอยู่ในระดับนาโนเมตรจะเรียก composite ที่อยู่ในกลุ่มนี้ว่า polymer layered crystal nanocomposite วัสดุในกลุ่มนี้มีการใช้งานกันอย่างหลากหลายทั้งแบบที่มีในธรรมชาติและสังเคราะห์ขึ้นเองการใช้ clay ที่อยู่ในกลุ่มของ layered silicate เป็นที่นิยมกันเป็นอย่างมากในการทำ nanocomposite เพราะว่า clay เป็นวัสดุที่หาง่ายและ intercalation chemistry ได้มีการศึกษากันมานานแล้วการที่จะทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรจะต้องทำให้อนุภาคมีการกระจายอยู่ที่ดีก่อน nanocomposite จะช่วยในการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนสมบัติการมองเห็นและสมบัติเชิงกลสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและลดความสามารถในการติดไฟได้ของวัสดุให้ดีขึ้นกว่าการทำเป็น composite แบบทั่วไป

2.6ลักษณะของการกระจายตัวของ Polymer/clay Nanocomposites

ลักษณะของการกระจายตัวของนาโนคอมพอสิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3ประเภท



รูปที่ 5 ลักษณะของการกระจายตัวของนาโนคอมโพสิตทั้ง 3 ประเภท[14]

2.6.1 Conventional Composites หรือ Microcomposite
การเกิดคอมพอสิตในลักษณะนี้ จะเหมือนกับการที่เคลย์ ทำหน้าที่เป็น Conventional filler โดยที่สายโซ่พอลิเมอร์จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างกลุ่มของชั้นเคลย์ที่ไม่เกิดการแตกออกจากกัน และในส่วนของสายโซ่พอลิเมอร์ก็ไม่มีการแทรกตัวเข้าไปในระหว่างชั้นเคลย์

2.6.2 Intercalated Nanocomposites
เป็นนาโนคอมพอสิตที่เกิดจากการแทรกตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เข้าไปใน โครงสร้างของ Layered silicates โดยการเกิดนั้น จะไม่ขึ้นกับสัดส่วนของเคลย์ที่มีต่อพอลิเมอร์และ สมบัติของ Intercalated nanocomposites นี้จะมีลักษณะคล้ายกับวัสดุพวกเซรามิก

2.6.3 Exfoliation Nanocomposites หรือ Delaminated Nanocomposites เป็นนาโนคอมพอสิตที่ชั้นของเคลย์แยกออกจากกันโดยเด็ดขาด และมีการกระจายตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โดยระยะทางเฉลี่ย ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของเคลย์ซึ่งโดยปกติแล้วปริมาณ ของ Exfoliated nanocomposites จะมีน้อยกว่าพวก Intercalated Nanocomposites [15]

2.7 การเคลือบกระดาษ (Coating)

การเคลือบสารเคลือบลงบนกระดาษสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเคลือบโดยใช้แท่งเคลือบ K bar การเคลือบแบบฉีดพ่น หรือการเคลือบแบบจุ่ม เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการเคลือบสารเคลือบลงบนกระดาษชานอ้อยโดยใช้ตัวทำละลาย ทำให้ต้องใช้ความเร็วในการทำการเคลือบสูงเพราะว่าตัวทำละลายระเหยออกได้เร็วสารเคลือบจะมีความหนืด ทำให้ไม่สามารถเคลือบได้ครอบคลุมบริเวณที่ต้องการ การเคลือบแบบจุ่มจึงเหมาะสมสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ เนื่องสามารถทำได้รวดเร็ว และยังสามารถเคลือบได้เต็มแผ่นได้ ดังนั้น ในการวิจัยครั้งนี้จึงใช้วิธีเคลือบแบบจุ่มเพียงอย่างเดียว

2.7.1 การเคลือบแบบจุ่ม (Dip Coating) เป็นวิธีการหนึ่งของการประยุกต์ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง โดยอาศัยหลักการเคลือบสารละลายบนพื้นผิวอย่างช้าๆ การจุ่มจะนำสารละลายมาเคลือบบนพื้นผิว อย่างช้าๆ ซึ่งมีการต้องควบคุมความเร็วในการดึงให้คงที่ เพื่อให้ผิวของวัสดุมีความเรียบสม่ำเสมอและ ความหนาของฟิล์มน้อย หากต้องการฟิล์มทีมีความหนาน้อยให้ใช้ความเร็วในการเคลือบแบบจุ่มเร็ว แต่ถ้าต้องการเคลือบแบบหนามากให้ใช้ความเร็วที่ช้า หรือจะทำการจุ่มหลายๆ ครั้งเพื่อเพิ่มความหนา ให้กับฟิล์มได้เช่นกัน การวิเคราะห์ความหนาของฟิล์มพิจารณาจากแรง Drag Flow เกิดจากผลของความหนืดของสารละลายและความเร็วในการจุ่ม (Dipping speed) ซึ่งตัวแปรทั้งสองจะส่งผลต่อความ หนาของฟิล์ม สารละลายที่ใช้มีความหนืดมาก และใช้ความเร็วในการเคลือบสูงมากขึ้น จะทำให้แรง Drag Flow มากขึ้น และทำให้เนื้อสารที่เคลือบบนพื้นผิววัสดุมากตามไปด้วย จึงทำให้ฟิล์มหนา ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับตัวแปรต่างๆ ในการเคลือบแบบจุ่ม[16] แสดงดังสมการนี้

$$h_0 = \frac{0.94(\eta U_0)^{\frac{2}{3}}}{\gamma_{Lv}^{\frac{1}{6}}(\rho g)^{\frac{1}{2}}}$$

เมื่อ η คือ ความหนืดของสาร

U_0 คือ ความเร็วในการดึง (Dipping Speed)

γ_{Lv} คือ แรงตึงผิวระหว่างของเหลวและก๊าซ (Liquid-Vapor Surface Tension)

ρ คือ ความหนาแน่นของสารละลาย

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

3.1 สารเคมี วัสดุ และอุปกรณ์

1. พลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซักซิเนต (poly(butylenesuccinate) : PBS) (density 1.26 g/cm^3, melting point 115 ^oC)
2. บิวทิลแอซิเตท (AR grade, Ajax)
3. เคลย์ (Dimethyl dehydrogenated tallow, quaternary ammonium)
4. กระดาษชานอ้อย ยี่ห้อ Home Fresh Mart
5. เครื่องทดสอบ porosity ยี่ห้อ TOYOSEIKI
6. Cobb tester
7. เครื่องวัดมุมสัมผัสอัตโนมัติ PGX
8. เครื่อง Tensile Strength Tester
9. เครื่องทดสอบ TABER Stiffness
10. ชุดการทดสอบ Wax Pick Test
11. เครื่องชั่งน้ำหนัก
12. เตาอบ
13. เครื่องกวนสาร

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 ขั้นตอนในการเตรียมกระดาษชานอ้อย

1. ตัดกระดาษชานอ้อยด้วยกรรไกรเป็นวงกลมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18.5 ซม.
2. นำกระดาษชานอ้อยจากข้อ 1. มาเก็บในซองพลาสติกที่มีซิปล็อคเพื่อป้องกันความชื้น (โดยกระดาษชานอ้อยที่นำมาใช้ควรมีปริมาณเส้นใยที่สม่ำเสมอเพื่อความแม่นยำในการทดสอบ)

3.2.2 การเตรียมสารเคลือบจากพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซักซิเนตผสมเคลย์

1. ทำการละลาย PBS ที่ 4% โดยน้ำหนัก ละลายในบิวทิลแอซิเตท ทำการปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กประมาณ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 90 °C จนได้สารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกัน
2. เติมเคลย์ในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังนี้ 0.5, 1, 3, 5 % โดยน้ำหนัก ลงในสารละลาย PBS จากข้อ 1. ทำการปั่นกวนสารละลายผสมเคลย์ด้วยแท่งแม่เหล็กประมาณ 30 นาที เพื่อให้ได้การกระจายที่ดีของเคลย์ในสารละลาย PBS

3.2.3 การเคลือบกระดาษ

1. ก่อนเคลือบกระดาษนำกระดาษที่เตรียมไว้ในข้อที่ 3.2.1 ไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 5 นาที เพื่อไล่ความชื้นในกระดาษ
2. ทำการเคลือบผิวกระดาษด้วยเทคนิคแบบจุ่ม (dip coating) โดยเทสารเคลือบผิวที่เตรียมจากข้อ3.2.2 ที่ปริมาตร 20 cc ลงในถาดอะลูมิเนียม ทำการจุ่มกระดาษให้สัมผัสกับสารเคลือบอย่างสม่ำเสมอ
3. หลังจากเคลือบกระดาษ แล้วนำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที
4. ทำการจุ่มซ้ำ 3 – 4 รอบ เพื่อให้ได้น้ำหนักสารเคลือบผิวตามเกณฑ์มาตรฐาน โดยหลังจากจุ่มแต่ละครั้งจะอบกระดาษที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 10 นาที

3.2.4 การทดสอบสมบัติกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิว

1. ทดสอบสมบัติเชิงกลของกระดาษ
   - ความแข็งแรงต่อแรงดึง (มาตรฐาน TAPPI: T 494 om-96)
   - ความต้านทานแรงฉีก (มาตรฐาน TAPPI: T414 om-98)
   - ความต้านทานการโค้งงอ (มาตรฐาน TAPPI: T 489 om-08)
   - ความแข็งแรงของผิวหน้า (มาตรฐาน TAPPI: T 459 om-93)
2. ทดสอบสมบัติทางโครงสร้างของกระดาษและผิวหน้ากระดาษ
   - การต้านทานอากาศของกระดาษ (มาตรฐาน TAPPI: T 460 om-11 (Gurley method))
   - การดูดซึมน้ำของกระดาษ (มาตรฐาน TAPPI: T 441 om-98 (Cobb test))
   - การเปียกผิวมุมสัมผัสของน้ำบนกระดาษ (มาตรฐาน TAPPI: T 558 om-97)

3.3 วิธีการคำนวณหาน้ำหนักสารเคลือบ

คำนวณหาพื้นของกระดาษชานอ้อย

คำนวณหาพื้นที่ของกระดาษชานอ้อย ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 18.5 ซม. ขนาดรัศมี(r) เท่ากับ 18.5 / 2 = 9.25 ซม. ซึ่งก็จะเท่ากับ

จากสูตรหาพื้นที่วงกลม = πr^2

= $\pi(9.25)^2$

= 268.80 cm^2

เปลี่ยนจาก cm^2 เป็น m^2

10,000 cm^2 มีค่าเท่ากับ 1 m^2

268.80 cm^2 มีค่าเท่ากับ (268.80 x 1) / 10,000 = 0.0268 m^2

หลังจากนั้นนำพื้นที่วงกลมที่คำนวณได้มาคำนวณหาน้ำหนักสารเคลือบเป็นกรัมต่อตารางเมตร

น้ำหนักสารเคลือบ = $\frac{\text{น้ำหนักกระดาษหลังเคลือบ} - \text{น้ำหนักกระดาษก่อนเคลือบ}}{\text{พื้นที่วงกลม}}$

= $\frac{\text{น้ำหนักกระดาษหลังเคลือบ} - \text{น้ำหนักกระดาษก่อนเคลือบ}}{0.0268}$ g / m^2

บทที่ 4

ผลการทดลอง

เนื่องจากเกิดการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัส COVID-19 การดำเนินงานจึงไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ ทำให้ผลการทดลองที่ได้ไม่ครบถ้วน ดังนั้นผลการทดลองในส่วนของขั้นตอนดำเนินงานที่ยังไปไม่ถึงจะมาจากการรวบรวมและศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นหลัก

4.1 น้ำหนักสารเคลือบ

4.1.1 น้ำหนักของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิว

จากข้อมูลในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 พบว่าน้ำหนักกระดาษก่อนนำไปเคลือบ PBS ผสมเคลย์ 0 %wt และ 1%wt มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักอยู่ที่ 335.49 ± 8.93 g/m^2 และ 336.75 ± 5.19 g/m^2 ตามลำดับ หลังจากทำการเคลือบผิว น้ำหนักกระดาษหลังเคลือบ PBS ผสมเคลย์ 0%wt และ 1%wt มีค่าเฉลี่ยน้ำหนักอยู่ที่ 354.18 ± 7.34 g/m^2 และ 355.22 ± 5.64 g/m^2 ตามลำดับ ที่ความชื้นในกระดาษประมาณ 4%

ตารางที่ 1 น้ำหนักกระดาษก่อนเคลือบผิวและหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ PBS ผสมเคลย์ที่ 0%wt

กระดาษ	น้ำหนักกระดาษก่อนเคลือบ (g/m^2)	น้ำหนักกระดาษหลังเคลือบ PBS ผสมเคลย์ 0 % (g/m^2)
1	352.24	367.54
2	351.87	367.16
3	330.60	349.25
4	329.85	348.51
5	328.73	354.10
6	335.82	352.99
7	332.09	354.10
8	330.97	348.88
9	330.60	351.87
10	332.09	347.39
ค่าเฉลี่ย	335.49	354.18
SD	8.93	7.34

ตารางที่ 2 น้ำหนักกระดาษก่อนเคลือบผิวและหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบ PBS ผสมเคลย์ที่ 1%wt

กระดาษ	น้ำหนักกระดาษก่อนเคลือบ (g/m^2)	น้ำหนักกระดาษหลังเคลือบ PBS ผสมเคลย์ 1 % (g/m^2)
1	329.10	353.73
2	333.58	347.39
3	332.09	350.37
4	335.45	354.10
5	342.54	361.19
6	341.79	359.70
7	342.91	363.43
8	336.57	351.87
ค่าเฉลี่ย	336.75	355.22
SD	5.19	5.64

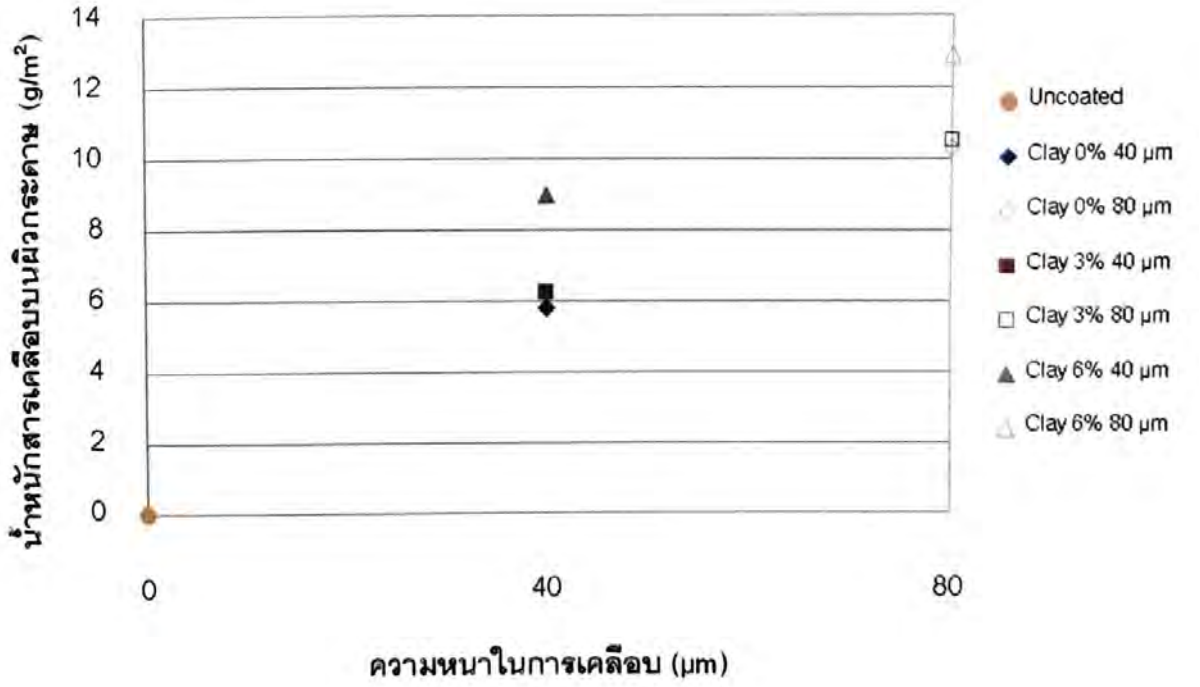
4.1.2 น้ำหนักของสารเคลือบ PBS

จากตารางที่ 3 พบว่าข้อมูลมีเพียงน้ำหนักสารเคลือบของกระดาษชานอ้อยที่เคลือบด้วย PBS ผสม clay 0% และ 1% โดยน้ำหนักสารเคลือบของกระดาษชานอ้อยที่เคลือบด้วย PBS ผสม clay 0%wt มีค่าเฉลี่ย 17.92 ± 2.31 g/m^2 ซึ่งเป็นผลจากการเคลือบซ้ำจำนวน 3 - 4 รอบด้วยเทคนิคการเคลือบผิวแบบจุ่ม (dip coating) และเพื่อให้ได้น้ำหนักสารเคลือบผิวตามเกณฑ์มาตรฐาน และน้ำหนักสารเคลือบของกระดาษชานอ้อยที่เคลือบด้วย PBS ผสมเคลย์ 1%wt มีค่าเฉลี่ย 18.45 ± 3.31 g/m^2 ซึ่งมีน้ำหนักสารเคลือบเฉลี่ยสูงกว่ากระดาษที่เคลือบด้วย PBS แสดงถึงผลจากน้ำหนักเคลย์ที่เติมที่ 1%wt

ตารางที่ 3 น้ำหนักสารเคลือบ PBS บนกระดาษชานอ้อย

ลำดับ	PBS/clay 0% (g/m^2)	PBS/clay 1% (g/m^2)	PBS/clay 3% (g/m^2)	PBS/clay 5% (g/m^2)
1	15.34	24.81	n/a	n/a
2	15.22	13.69	n/a	n/a
3	18.32	17.99	n/a	n/a
4	18.73	18.47	n/a	n/a
5	17.87	18.84	n/a	n/a
6	17.28	17.91	n/a	n/a
7	21.83	20.45	n/a	n/a
8	17.84	15.45	n/a	n/a
9	21.31	n/a	n/a	n/a
10	15.45	n/a	n/a	n/a
ค่าเฉลี่ย	17.92	18.45	n/a	n/a
SD	2.31	3.31	n/a	n/a

จากงานวิจัยของ กิตติยา และคณะ [17] ศึกษาผลของสารเคลือบผิวชนิดพอลิแล็กไทด์ ผสมนาโนเคลย์เคลือบบนกระดาษ Liner board ผลแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งได้มีการเคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบจากพอลิแล็กไทด์ผสมนาโนเคลย์ในอัตราส่วนต่างกัน คือ 0, 3, 6 %wt และเคลือบที่ความหนา 40 และ 80 ไมโครเมตร แล้วนำไปหาน้ำหนักของสารเคลือบบนผิวกระดาษ กระดาษที่เคลือบที่ความหนา 40 ไมโครเมตรด้วยสารเคลือบจากพอลิแล็กไทด์ผสมนาโนเคลย์ 0, 3, 6 %wt มีน้ำหนัก 5.80 ± 2.25 , 6.27 ± 2.02, 8.99 ± 1.60 m/g^2 ตามลำดับ ส่วนกระดาษที่เคลือบที่ความหนา 80 ไมโครเมตรด้วยสารเคลือบจากพอลิแล็กไทด์ผสมนาโนเคลย์ 0, 3, 6 %wt มีน้ำหนัก 10.29 ± 3.41, 10.53 ± 3.07, 12.90 ± 0.84 g/m^2 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเติมนาโนเคลย์ลงไปน้ำหนักของสารเคลือบผิวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสารเคลือบผิวกระดาษ และความหนาในการเคลือบ [ที่มา :กิติยา โมงขุนทด สวรรยา จรูญวัฒนา สิริวรรณ พัฒนาฤดี สารเคลือบกระดาษจากพอลิแล็กไทด์ผสมนาโนเคลย์, โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ปีการศึกษา 2551 สาขาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ]

4.2 ผลการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4.2.1 การทนต่อแรงดึง (Tensile Strength)

จากงานวิจัยของ Shankar และ Rhim [18] ศึกษาผลของสารเคลือบผิวชนิดพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท(Polybutylene adipate-co-terephthalate : PBAT)ผสมสารสกัดจากเมล็ดเกรปฟรุต (grapefruit) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เคลือบบนกระดาษคราฟต์ที่ความหนาต่างกัน ซึ่งกำหนดความหนาโดยใช้แท่งเคลือบ (coating bar) ขนาด 20, 30, 40, 50 และ 60 และได้ผลการทดสอบการทนต่อแรงดึงตามตารางที่ 4 ดังนี้

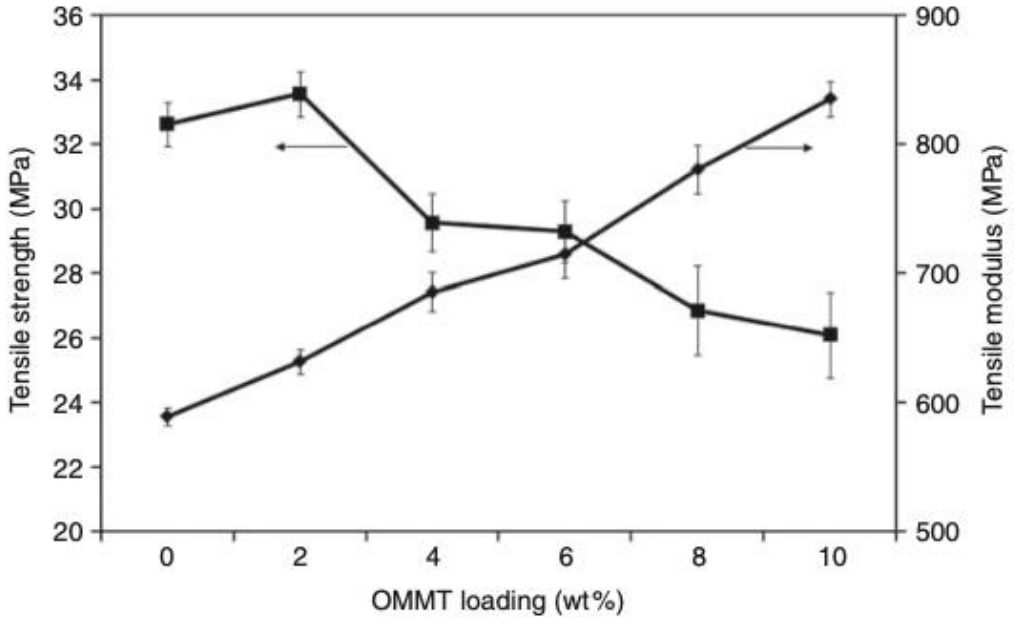
ตารางที่ 4 ความหนา น้ำหนักมาตรฐาน และความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษเคลือบ PBAT

กระดาษ	**ความหนา (μm)**	**น้ำหนักมาตรฐาน (g/m^2)**	**ความแข็งแรงต่อแรงดึง (MPa)**
กระดาษที่ไม่เคลือบ	211.7 ± 1.2	171.2 ± 1.7	36.1 ± 1.4
กระดาษเคลือบ PBAT (20)	263.7 ± 3.4	241.2 ± 7.6	52.0 ± 1.7
กระดาษเคลือบ PBAT (30)	266.5 ± 2.6	240.5 ± 10.8	63.5 ± 2.5
กระดาษเคลือบ PBAT (40)	270.5 ± 6.2	246.8 ± 5.7	66.5 ± 2.9
กระดาษเคลือบ PBAT (50)	294.6 ± 16.2	276.7 ± 16.8	62.0 ± 2.2
กระดาษเคลือบ PBAT (60)	322.2 ± 8.0	293.6 ± 16.5	53.5 ± 8.3

[ที่มา : S. Shankar J.W. Rhim (2018) Effects of poly(butylene adipate-co-terephthalate) coating on the waterresistant, mechanical, and antibacterial properties of Kraft paper, J.Organic Coating, 123,153-159.]

ผลจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นได้ว่าการเคลือบ PBAT ลงบนกระดาษคราฟต์ทำให้กระดาษมีความหนาและน้ำหนักมาตรฐานเพิ่มขึ้นโดยขึ้นกับขนาดของแท่งเคลือบยิ่งสูงจะยิ่งทำให้มีความหนาและน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง กระดาษที่ไม่เคลือบมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงอยู่ที่ 36.1 MPa และเมื่อเคลือบ PBAT ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเป็น 52.0, 63.5, 66.5, 62.0 และ 53.5 MPa เมื่อใช้แท่งเคลือบขนาด 20, 30, 40, 50 และ 60 ตามลำดับ ค่าความแข็งแรงของกระดาษจะมีค่าสูงสุดเมื่อใช้แท่งเคลือบขนาด 40 โดยมีน้ำหนักมาตรฐานอยู่ที่ 246.8 g/m^2 แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงจะเพิ่มเมื่อมีสารเคลือบเพิ่มขึ้นในระดับหนึ่ง และถ้ามากเกินไปความแข็งแรงต่อแรงดึงก็จะลดลง ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นได้จากชั้นของสารเคลือบผิวอาจจะมีความหนามากเกินไปจึงส่งผลต่อการยึดเกาะกับผิวกระดาษและเมื่อได้รับแรงดึงจึงทำให้เกิดการเสียหายได้

จากงานวิจัยของ Phua และคณะ [3] ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อน และการดูดซึมน้ำของฟิล์มพอลิบิวทิลีนซักซิเนต (PBS) ผสมออร์กาโนมอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (organo – montmorillonite: OMMT) ผลแสดงดังรูปที่ 7 โดยเติม OMMT นาโนคอมพอสิต ในปริมาณต่างๆ ดังนี้ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 %wt ได้ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง ดังนี้

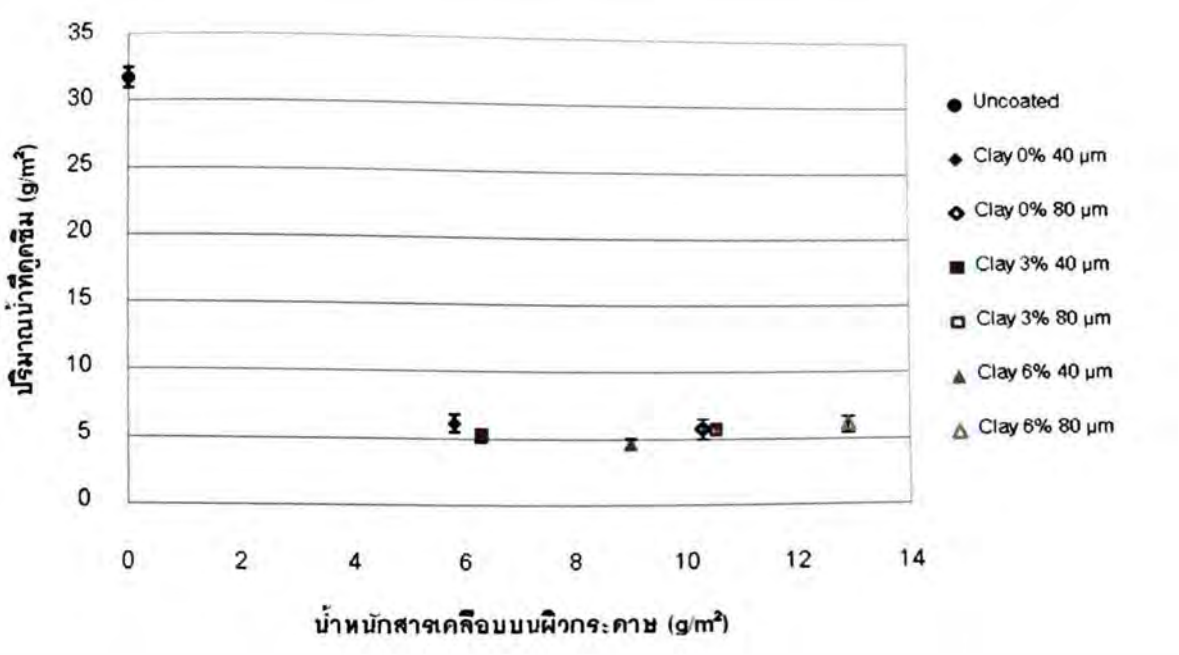


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของความแข็งแรงต่อแรงดึง และ Tensile modulus ของ PBS และ PBS/OMMT nanocomposites ในปริมาณต่างๆ [ที่มา : Y. J. Phua, W. S. Chow and Z. A. Mohd Ishak (2011) Poly(butylene succinate)/Organo-montmorillonite Nanocomposites: Effects of the Organoclay Content on Mechanical, Thermal, and Moisture Absorption Properties, J. Thermoplast. Compos. Mater., 24, 133-151.]

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเมื่อเติม OMMT นาโนคอมพอสิต ปริมาณ 2%wt เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลของ PBS กับหมู่เอมีนของ OMMT ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจน และมีโครงสร้างแบบ Exfoliated structure ซึ่งชั้นของเคลย์เกิดการแยกออกจากกันอย่างสมบูรณ์ และกระจายในเนื้อพอลิเมอร์ชีวภาพ ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีสมบัติการทนต่อแรงดึง ความสามารถในการยืดตัว และความสามารถในการโค้งงอเพิ่มขึ้นสูงสุด เมื่อเทียบกับการเติมปริมาณ OMMT นาโนคอมพอสิตเป็น 4% ขึ้นไป ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงมากเนื่องจากเกิดการจับกลุ่มก้อนของอนุภาค (agglomerate) ส่งผลให้ชิ้นงานนาโนคอมพอสิตมีสมบัติการทนต่อแรงดึงต่ำลง

4.2.2 การต้านทานการซึมน้ำ

จากงานวิจัยของ กิตติยา และคณะ [17] ศึกษาผลของสารเคลือบผิวชนิดพอลิแล็กไทด์ ผสมนาโนเคลย์ เคลือบบนกระดาษ Liner board ผลแสดงดังรูปที่ 8 ได้มีการเคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบจากพอลิแล็กไทด์ผสมนาโนเคลย์ในอัตราส่วนต่างกัน คือ 0, 3, 6 %wt และเคลือบที่ความหนา 40 และ 80 ไมโครเมตร แล้วนำไปทดสอบการดูดซึมน้ำ ด้วยวิธี TAPPI T 441 om - 4 ได้ผลดังนี้



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่กระดาษดูดซึม และน้ำหนักสารเคลือบของกระดาษก่อนเคลือบผิวและหลังเคลือบผิว [ที่มา :กิติยา โมงขุนทด สวรรยา จรูญวัฒนา สิริวรรณ พัฒนาฤดี สารเคลือบกระดาษจากพอลิแล็กไทด์ผสมนาโนเคลย์, โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ปีการศึกษา 2551 สาขาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ]

กระดาษที่ไม่ได้เคลือบผิวมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ที่ 31.74 g/m^2 ส่วนกระดาษที่เคลือบผิวด้วยพอลิแล็กไทด์ผสมนาโนเคลย์ แล้วค่าการดูดซึมน้ำลดลงไปอยู่ในช่วงประมาณ 5 g/m^2 แสดงว่าเมื่อมีการเคลือบผิวด้วยพอลิแล็กไทด์ผสมนาโนเคลย์แล้วจะทำให้ทนการดูดซึมของน้ำมากขึ้น และเมื่อพิจารณาการดูดซึมน้ำของกระดาษเคลือบผิวด้วยพอลิแล็กไทด์ผสมนาโนเคลย์อัตราส่วนต่าง ๆ และเคลือบที่ความหนาต่าง ๆ พบว่าการดูดซึมของน้ำไม่แตกต่างกันมากคืออยู่ในช่วงประมาณ 5 g/m^2 ซึ่งเป็นผลจากการเติมนาโนเคลย์ที่ช่วยปรับปรุงสมบัติขวางกั้นของกระดาษหลังเคลือบผิวด้วยสารเคลือบนาโนคอมพอสิต

จากงานวิจัยของ Shankar และ Rhim Rhim [18] ศึกษาผลของสารเคลือบผิวชนิดพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (Polybutylene adipate-co-terephthalate : PBAT) ผสมสารสกัดจากเมล็ดเกรปฟรุต (grapefruit) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เคลือบบนกระดาษคราฟต์ ผลแสดงดังตารางที่ 5 ซึ่งได้มีการนำกระดาษคราฟต์ที่เคลือบ PBAT ไปทดสอบ Cobb test ด้วยวิธี ASTM D 3258 - 93 ได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5 การดูดซึมน้ำของกระดาษเคลือบ PBAT

กระดาษ	**การดูดซึมน้ำ (g H_2O/ m^2)**
กระดาษที่ไม่เคลือบ	60.6 ± 6.5
กระดาษเคลือบ PBAT (20)	1.1 ± 0.3
กระดาษเคลือบ PBAT (30)	0.9 ± 0.5
กระดาษเคลือบ PBAT (40)	0.8 ± 0.1
กระดาษเคลือบ PBAT (50)	1.4 ± 0.2
กระดาษเคลือบ PBAT (60)	1.1 ± 0.1

[ที่มา : S. Shankar J.W. Rhim (2018) Effects of poly(butylene adipate-co-terephthalate) coating on the waterresistant, mechanical, and antibacterial properties of Kraft paper, J.Organic Coating, 123,153-159.]

ค่าการดูดซึมน้ำแสดงให้เห็นถึงการต้านทานน้ำของกระดาษซึ่งมีความสำคัญมากสำหรับกระดาษที่ใช้ในการทำบรรจุภัณฑ์ โดยจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่ากระดาษคราฟต์ที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบมีค่าการดูดซึมน้ำอยู่ที่ 60.6 ± 6.5 g/m^2 และเมื่อนำไปเคลือบด้วย PBAT ค่าการดูดซึมน้ำลดลงไปเหลือเพียง 0.8-1.4 g/m^2 เนื่องจากเมื่อทำการเคลือบ PBAT ลงไปบนกระดาษคราฟต์สารเคลือบที่มีความไม่ชอบน้ำจะปิดรูพรุนที่ผิวหน้าของกระดาษทำให้กระดาษคราฟต์ที่ผ่านการเคลือบมีความทนทานน้ำที่สูงมาก

4.2.3 มุมสัมผัสของน้ำ

จากงานวิจัยของ Shankar และ Rhim [18] ศึกษาผลของสารเคลือบผิวชนิดพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (Polybutylene Adipate-co-Terephthalate : PBAT) ผสมสารสกัดจากเมล็ดเกรปฟรุต (grapefruit) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เคลือบบนกระดาษคราฟต์ ผลแสดงดังตารางที่ 6 ได้มีการนำกระดาษคราฟต์ที่เคลือบ PBAT ไปวัดมุมสัมผัสของน้ำด้วยปริมาตรของหยดประมาณ 10 ไมโครลิตร การทดสอบมุมสัมผัสของน้ำสามารถบอกได้ถึงสมบัติความไม่ชอบน้ำและการเปียวผิวของผิวหน้า โดยจากผลการทดลองพบว่าค่ามุมสัมผัสของกระดาษที่ไม่เคลือบผิวมีค่า 72.1° และมีค่าใกล้เคียงกับกระดาษเคลือบ PBAT (72-75°) เนื่องจากสภาพของพื้นผิวอาจมีความคล้ายคลึง

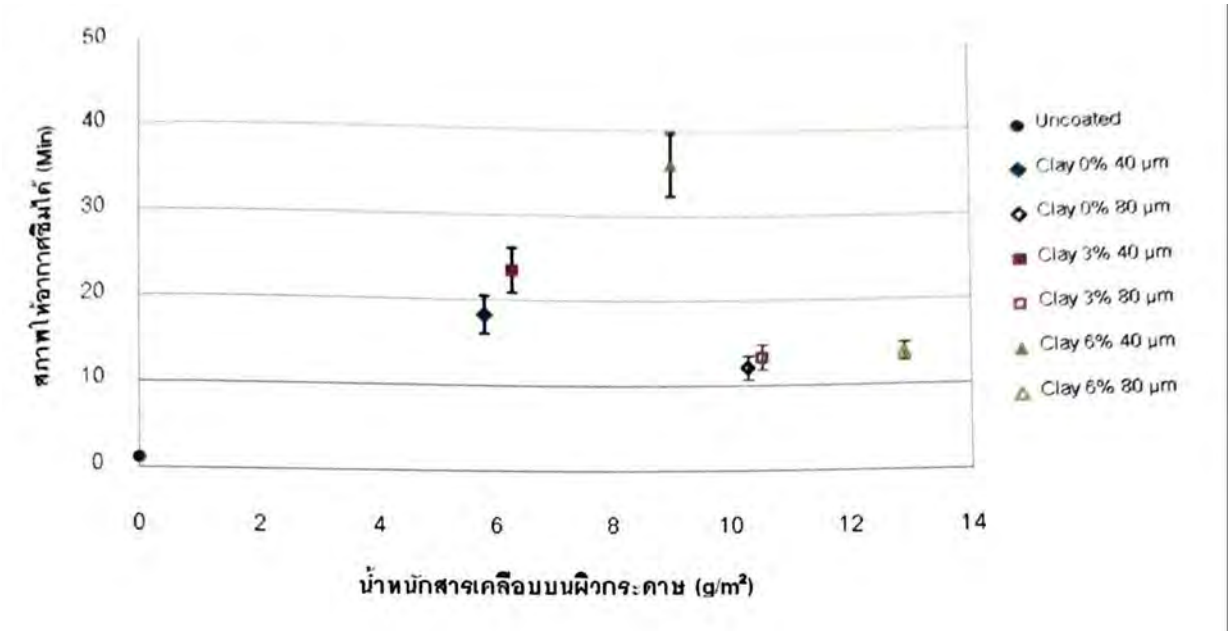
ตารางที่ 6 มุมสัมผัสของกระดาษเคลือบ PBAT

กระดาษ	มุมสัมผัสของน้ำ (°)
กระดาษที่ไม่เคลือบ	72.1 ± 0.1
กระดาษเคลือบ PBAT (20)	74.7 ± 2.6
กระดาษเคลือบ PBAT (30)	72.0 ± 2.1
กระดาษเคลือบ PBAT (40)	72.4 ± 1.2
กระดาษเคลือบ PBAT (50)	72.1 ± 3.9
กระดาษเคลือบ PBAT (60)	71.9 ± 2.4

[ที่มา S. Shankar J.W. Rhim (2018) Effects of poly(butylene adipate-co-terephthalate) coating on the waterresistant, mechanical, and antibacterial properties of Kraft paper, *J.Organic Coating*, 123,153-159.]

4.2.4 สภาพให้อากาศซึมได้

จากงานวิจัยของ กิตติยา และคณะ [17] ศึกษาผลของสารเคลือบผิวชนิดพอลิแล็กไทด์ผสมนาโนเคลย์เคลือบบนกระดาษ Liner board ผลแสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งได้มีการเคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบจากพอลิแล็กไทด์ผสมนาโนเคลย์ในอัตราส่วนต่างกัน คือ 0, 3, 6 %wt และเคลือบที่ความหนา 40 และ 80 ไมโครเมตร แล้วนำไปทดสอบสภาพให้อากาศซึมได้ ด้วยวิธี TAPPI T 460 om - 02 (Gurley method) ได้ผลดังนี้

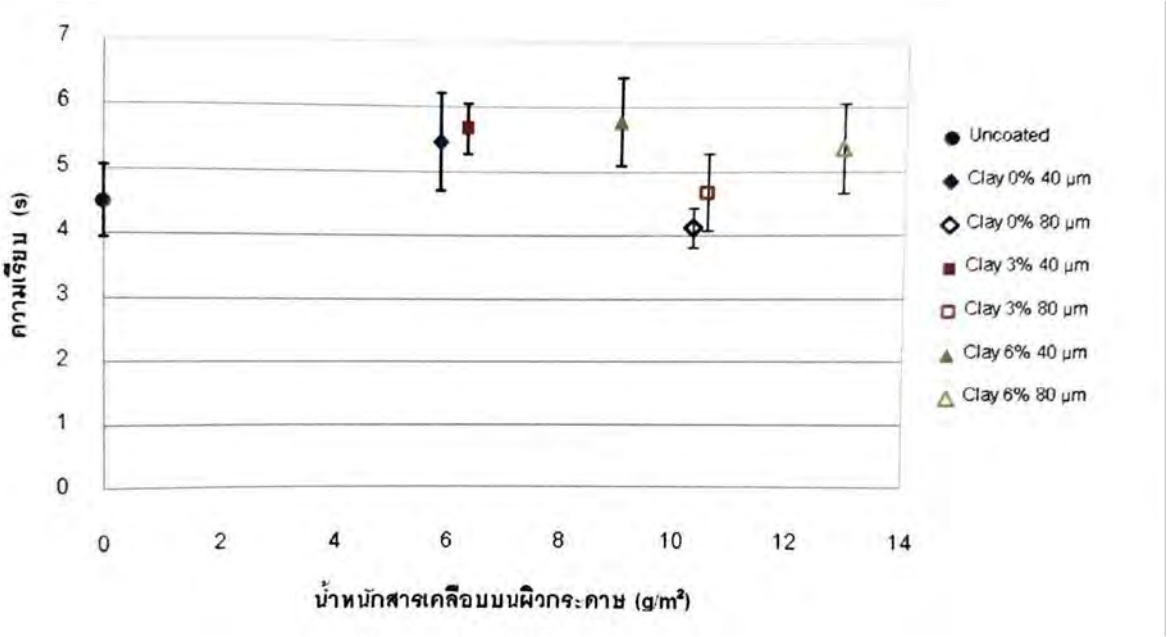


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ให้อากาศผ่านได้ และน้ำหนักสารเคลือบของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิว [ที่มา : กิตติยา โมงขุนทด สวรรยา จรูญวัฒนา สิริวรรณ พัฒนาฤดี สารเคลือบกระดาษจากพอลิแล็กไทด์ผสมนาโนเคลย์, โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ปีการศึกษา 2551 สาขาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ]

กระดาษที่ไม่ได้เคลือบผิวด้วยพอลิแล็กไทด์ให้อากาศซึมผ่านได้ใช้เวลาเฉลี่ย 1.2 นาที ส่วนกระดาษที่เคลือบผิวด้วยพอลิแล็กไทด์ผสมนาโนเคลย์ให้อากาศซึมผ่านได้ใช้เวลาอยู่ในช่วง 10 นาที ถึง 40 นาที ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเคลือบผิวด้วยพอลิแล็กไทด์สามารถทำให้กระดาษมีสมบัติในการขวางกั้นอากาศได้ดีขึ้นและเมื่อพิจารณาจากความหนาของการเคลือบพบว่าการเคลือบที่ความหนา 40 ไมโครเมตร ให้สมบัติการขวางกั้นอากาศได้มากกว่าการเคลือบที่ความหนา 80 ไมโครเมตร อาจเป็นเพราะว่าที่ความหนา 80 ไมโครเมตร สารเคลือบบนผิวหน้าอาจจะไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดช่องว่างให้อากาศผ่านไปได้ ในส่วนของอัตราส่วนที่เพิ่มนาโนเคลย์ลงไปพบว่าที่ 6% ทำให้กระดาษมีสมบัติการขวางกั้นมากที่สุด โดยให้อากาศผ่านได้ ใช้เวลา 35.99 นาที

4.2.5 ความเรียบของผิวหน้า

จากงานวิจัยของ กิตติยา และคณะ [17] ศึกษาผลของสารเคลือบผิวชนิดพอลิแล็กไทด์ ผสมนาโนเคลย์เคลือบบนกระดาษ Liner board ผลแสดงดังรูปที่ 10 ซึ่งได้มีการเคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบจากพอลิแล็กไทด์ผสมนาโนเคลย์ในอัตราส่วนต่างกัน คือ 0, 3, 6 %wt และเคลือบที่ความหนา 40 และ 80 ไมโครเมตร แล้วนำไปทดสอบความเรียบของผิวกระดาษ ได้ผลดังนี้



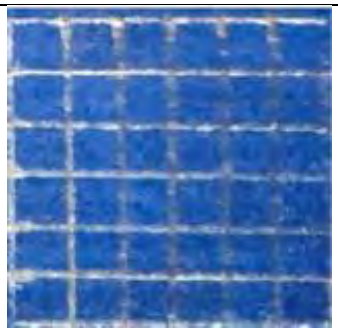
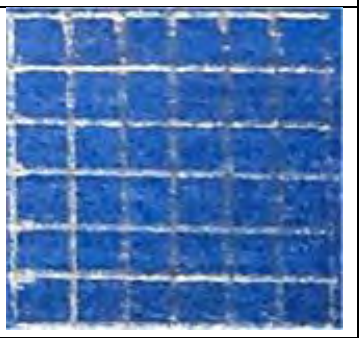
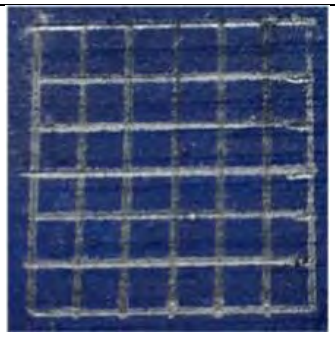
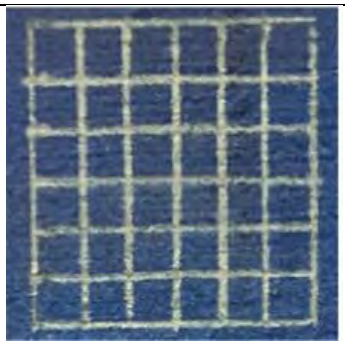
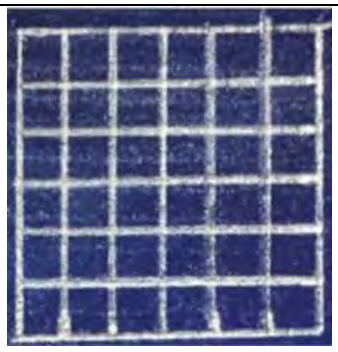
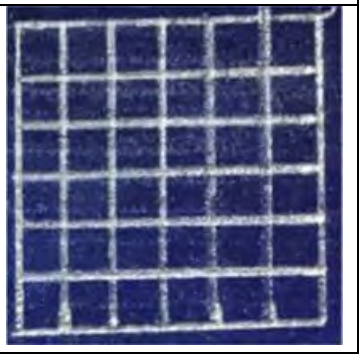
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเรียบและน้ำหนักสารเคลือบของกระดาษก่อนและหลังเคลือบผิว [ที่มา :กิติยา โมงขุนทด สวรรยา จรูญวัฒนา สิริวรรณ พัฒนาฤดี สารเคลือบกระดาษจากพอลิแล็กไทด์ผสมนาโนเคลย์, โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ปีการศึกษา 2551 สาขาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ]

จากผลการทดลองในรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่ากระดาษที่ไม่ได้เคลือบผิวและกระดาษที่มีการเคลือบผิวด้วยพอลิแล็กไทด์มีค่าความเรียบที่ใกล้เคียงกัน และสำหรับความหนาที่ต่างกันจะมีค่าความเรียบที่ต่างกันเล็กน้อยโดยการเคลือบที่ความหนา 40 ไมโครเมตรจะให้ความเรียบได้มากกว่าการเคลือบที่ความหนา 80 ไมโครเมตร อาจเป็นผลมาจากการกระจายตัวระหว่างการเคลือบผิว แสดงว่าสารเคลือบผิวพอลิแล็กไทด์ผสมนาโนเคลย์ไม่ได้ส่งผลต่อความเรียบของกระดาษ

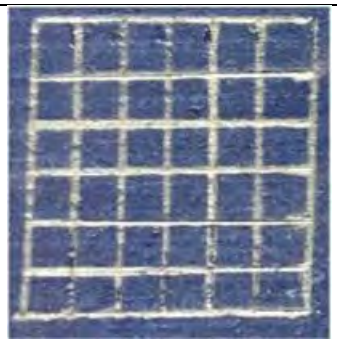
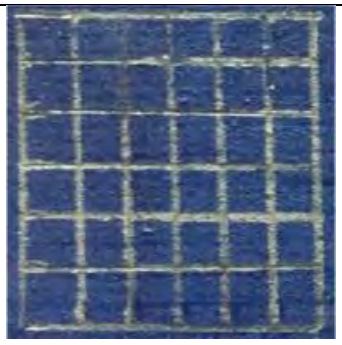
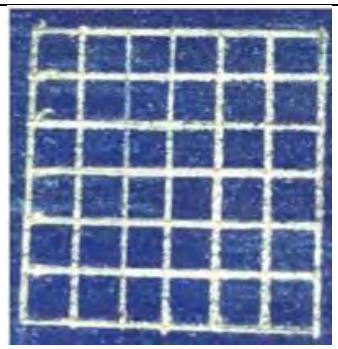
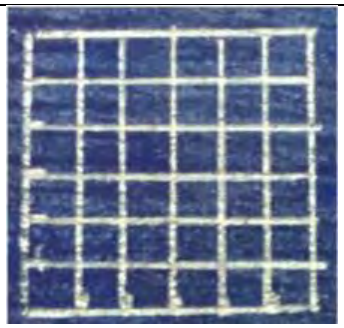
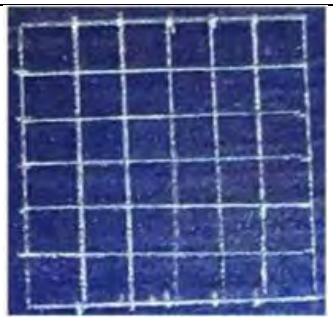
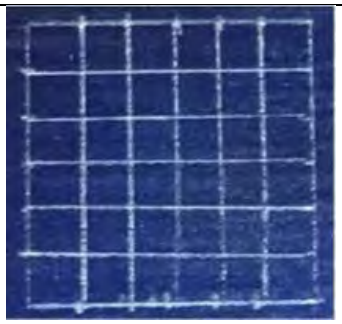
4.2.6 ความสามารถในการยึดติดหมึกของหมึกพิมพ์

จากงานวิจัยของธนพร และคณะ [19] ศึกษาผลของสารเคลือบผิวชนิดพอลิแล็กติกแอซิด (PLA) ผสม Plasticizer เคลือบบนกระดาษ ในอัตราส่วนต่างกัน ดังนี้ 0, 6, 9, 12, 15 %wt แล้วนำไปทดสอบความสามารถในการยึดติดของหมึกพิมพ์โดยการพิมพ์พื้นตายด้วยหมึกพิมพ์เฟล็กโซฐานน้ำ สีไซแอน แล้วทำการวัดการยึดติดด้วยวิธี Tape test ASTM D3359 - 09 ใช้วิธีการทดสอบแบบ B ได้ผลดังตารางที่ 7 จากผลการทดลองพบว่ากระดาษที่ไม่เคลือบผิว และกระดาษที่เคลือบผิวด้วย PLA ผสม Plasticizer ในอัตราส่วนต่าง ๆ มีค่าการยึดติดอยู่ที่ระดับ 4B นั่นคือมีการหลุดลอกเล็กน้อย น้อยกว่า 5% ของพื้นที่ทดสอบ แสดงว่าหมึกพิมพ์มีการเปียกผิวและยึดติดได้ดีทั้งกระดาษที่ไม่เคลือบผิวและกระดาษที่เคลือบผิวด้วย PLA ผสม Plasticizer ในอัตราส่วนที่ต่างกัน อาจเป็นเพราะว่าสภาพพื้นผิวของกระดาษมีสภาพคล้ายคลึงกัน

ตารางที่ 7 ความสามารถในการยึดติดของกระดาษเคลือบผิวด้วย PLA ผสม Plasticizer

กระดาษ	ก่อน	หลัง
กระดาษไม่เคลือบ		
กระดาษเคลือบ PLA + PZ 0%		
กระดาษเคลือบ PLA + PZ 6%		

ตารางที่ 7 (ต่อ)

กระดาษ	ก่อน	หลัง
กระดาษเคลือบ PLA + PZ 9%		
กระดาษเคลือบ PLA + PZ 12%		
กระดาษเคลือบ PLA + PZ 15%		

[ที่มา: ธนพร อุทัยน้อย ณภัทร ดวงรัศมี สิริวรรณ พัฒนาฤดี ผลของสารเสริมสภาพพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมต่อสารเคลือบผิวสำหรับกระดาษ โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ปีการศึกษา 2561 สาขาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ]

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การเคลือบกระดาษชานอ้อยด้วยสารเคลือบจากพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนซักซิเนตผสมเคลย์ที่ 0%wt และ 1%wt ผลพบว่าน้ำหนักของกระดาษหลังเคลือบผิวเพิ่มขึ้นจากน้ำหนักกระดาษก่อนเคลือบผิวอย่างชัดเจน น้ำหนักหลังเคลือบผิวของสารเคลือบ PBS ผสมเคลย์ 0%wt และ ผสมเคลย์ 1%wt มีค่าใกล้เคียงกัน จากผลงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องพบว่าการเคลือบผิวด้วยพลาสติกชีวภาพจะเพิ่มสมบัติการขวางกั้นน้ำดีขึ้น และการเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผสมนาโนเคลย์ในปริมาณต่ำช่วยเพิ่มสมบัติการทนต่อแรงดึง การขวางกั้นอากาศ และความเรียบ แต่ถ้าใส่ในปริมาณมากจะทำให้สมบัติดังกล่าวลดลง ในส่วนของสมบัติของสารเคลือบ PBS และการผสมเคลย์ในปริมาณต่างที่แตกต่างกัน จะมีการทดสอบและศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การกำหนดขนาดของพื้นที่ที่ใช้ในการเคลือบผิวสำหรับกระดาษแต่ละแผ่นจะส่งผลต่อน้ำหนักกระดาษหลังเคลือบ
2. ควรระวังปัจจัยของความชื้นในกระดาษก่อนเคลือบ
3. การจุ่มเคลือบกระดาษในสารเคลือบควรทำอย่างรวดเร็วเนื่องจากตัวทำละลายระเหยได้รวดเร็ว

เอกสารอ้างอิง

[1] โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ, บทที่ 8 พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (Polybuthylene succinate), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, สืบค้นเมื่อ 21 มกราคม 2563, จาก http://asp.plastics.or.th

[2] A. Kalendova et al. (2019) Transport Properties of Poly(lactic acid)/Clay Nanocomposites, *Polym. Eng. Sci.*, 59(12), 2498-2501.

[3] Y. J. Phua, W. S. Chow and Z. A. Mohd Ishak (2011) Poly(butylene succinate)/Organo-montmorillonite Nanocomposites: Effects of the Organoclay Content on Mechanical, Thermal, and Moisture Absorption Properties, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 24, 133-151.

[4] R. Khankrua, S. Pivsa-Art, H. Hiroyuki, S. Suttiruengwong (2013) Thermal and Mechanical Properties of Biodegradable Polyester/Silica Nanocomposites, *Energy Procedia*, 34, 705-713.

[5] Y. Someya, T. Nakazato, N. Teramoto, M. Shibata (2004) Thermal and Mechanical Properties of Poly(butylene succinate) Nanocomposites with Various Organo-Modified Montmorillonites, *J. Appl. Polym. Sci*., 91, 1463– 1475.

[6] ฐานข้อมูลอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, รูปแบบของบรรจุภัณฑ์กระดาษ, สืบค้นเมื่อ 26 มีนาคม 2563, จาก https://packaging.oie.go.th/new/admin_control_new/html-demo/file_technology/2435197680.pdf

[7] สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย กระทรวงอุตสาหกรรม, การใช้ประโยชน์จากอ้อยและผลิตภัณฑ์จากอ้อย สืบค้นเมื่อ 26 มีนาคม 2563, จาก http://www.ocsb.go.th/upload/bioindustry/fileupload/9659-4776.pdf

[8] นที ฐานมั่น (2557). การพัฒนาภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลำต้นมันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสุรนารี. นครราชสีมา

[9] บริษัท พีทีที โพลีเมอร์ มาร์เก็ตติ้ง จำกัด (2553). พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพทางเลือกใหม่ที่ใส่ใจสิ่งแวดล้อม, สืบค้นเมื่อ 26 มีนาคม 2563, จาก http://polymersplace.com/pdf1-10/pdf10.pdf

[10] ณัฐพันธุ์ ศุภกา (2555). พลาสติกฐานชีวภาพ, สืบค้นเมื่อ 26 มีนาคม 2563, จาก http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/p27-30.pdf

[11] ชมณัฏฐ์ชา บุญมี (2558). การย่อยสลายพลาสติย่อยสลายได้ทางชีวภาพใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจนและสภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ

[12] เฟื่องฉัตร ธรรมรักษ์เจริญ (2551). การศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการเสริมแรงด้วย momtmorillonite. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. นครปฐม

[13] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (2558). แร่ดิน. รายงานวิชาการชุดแร่วิทยา เล่มที่ 4, สืบค้นเมื่อ 26 มีนาคม 2563, จาก http://www.sec.psu.ac.th/th/file/ebook/report/clay/clay.pdf

[14] Y. Zhang, C. Rempel and D. McLaren (2014). Chapter 16 - Thermoplastic Starch, *in Food Science and Technology, Innovations in Food Packaging (Second Edition)*, Academic Press, 391-412.

[15] วรนัฐ เริงโกสุม (2550). การศึกษาสมบัติพอลิเอทีลีน/เคลย์ นาโนคอมโพสิต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. นครปฐม

[16] เอกรัตน์ วงษ์แก้ว (2557) การสังเคราะห์ฟิล์มโลหะออกไซด์ผสมเพื่อคุณสมบัติการกระตุ้นด้วยแสงสำหรับใช้ในงานกระจกไร้คราบ. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. ชลบุรี

[17] กิติยา โมงขุนทด สวรรยา จรูญวัฒนา สิริวรรณ พัฒนาฤดี สารเคลือบกระดาษจากพอลิแล็กไทด์ผสมนาโนเคลย์, โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ปีการศึกษา 2551 สาขาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ

[18] S. Shankar J.W. Rhim (2018) Effects of Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Coating on the Waterresistant, Mechanical, and Antibacterial properties of Kraft paper, *J.Organic Coating*, 123,153-159.

[19] ธนพร อุทัยน้อย ณภัทร ดวงรัศมี สิริวรรณ พัฒนาฤดี ผลของสารเสริมสภาพพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมต่อสารเคลือบผิวสำหรับกระดาษ โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ปีการศึกษา 2561 สาขาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ

ภาคผนวก

<u>รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม : Synergistic reinforcing of poly(lactic acid)- based systems by polybutylene succinate and nano-calcium carbonate</u>

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เตรียมตัวอย่างจากพอลิแล็กไทด์ แอซิด (PLA) พอลิบิวทิลีนซักซิเนต (PBS) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (nano-$CaCO_3$) ด้วยเทคนิคการผสมแบบสารละลาย (solution blending) ตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิคที่แตกต่างกันดังนี้ การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability), ทดสอบความต้านทานการแตกหัก (fracture toughness), ทดสอบสมบัติเชิงกล (mechanical properties) และลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology) โดยลักษณะสัณฐานวิทยาจะสามารถสังเกตได้จากเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) และเทคนิค transmission electron microscopy (TEM) ผลพบว่าเมื่อเติม PBS และ nano-$CaCO_3$ ส่งผลให้สมบัติความต้านทานการแตกหักและการโค้งงอเพิ่มขึ้น ค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่น (elastic modulus) เมื่อเติม PBS ลงไปใน PLA เพียงอย่างเดียวมีค่าลดลง แต่เมื่อผสม PBS และ nano-$CaCO_3$ จะทำให้ค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ได้มีการรณรงค์และสนับสนุนให้ใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแทนที่การใช้วัสดุพอลิเมอร์ที่มาจากการสังเคราะห์ปิโตรเลียม เพื่อป้องกันการเกิดมลพิษที่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งก็ได้มีการคิดค้น และพัฒนาพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ โดยสังเคราะห์มาจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน หรือทรัพยากรที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้

พอลิแล็กติกแอซิด (PLA) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดพอลิเอสเทอร์แบบเส้นตรงที่สามารถนำกลับมาประยุกต์ใช้ใหม่ และย่อยสลายได้เนื่องจากสามารถสังเคราะห์มาจากแหล่งเกษตรกรรม อาทิเช่น แป้ง และน้ำตาล ซึ่ง PLA ที่เหมาะสำหรับการนำมาใช้ในอุตสากรรม เนื่องจากมีข้อได้เปรียบมากมายเช่น มีแหล่งในการผลิตที่อุดมสมบูรณ์, มีสมบัติเชิงกลที่ดี, มีความสามารถในการดูดซับและความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดี, มีความสามารถในการทนต่อสารเคมีและการย่อยสลายทางชีวภาพที่สูง เมื่อเกิดการย่อยสลายจะผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ อย่างไรก็ตามแม้จะมีโมดุลัสแรงดึงและความแข็งแรงที่สูง แต่ PLA ยังมีความเปราะทำให้มีความต้านทานในการทนต่อการแตกได้ค่อนข้างต่ำจึงไม่เหมาะสมสำหรับจะนำมาใช้งานด้านวิศวกรรมและงานที่แปรสภาพพลาสติกที่ต้องใช้แรงเค้นสูง

จึงต้องมีการนำ PLA มาปรับปรุงให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นด้วยการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีความเหนียวเหมาะสำหรับการใช้งาน และราคาประหยัด โดยมีพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพเป็นจำนวนมากที่ผสมเข้ากันได้กับ PLA ได้แก่ พอลิคาโพรแล็กโตน (PCL), พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG), พอลิไฮดรอกซีบิวทิเลต (PHB), แป้ง, เซลลูโลส และพอลิบิวทิลีนซักซิเนต (PBS) ซึ่งจากพอลิเมอร์ที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ PBS เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดพอลิเอสเทอร์แบบเส้นตรง ที่ผลิตมาจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน ซึ่ง PBS มีประโยชน์มากมาย ได้แก่ มีความยืดหยุ่นที่ดี, มีความสามารถในการผลิตสูง, ความเสถียรต่อความร้อนที่ดี และมีความเหนียวสูง จึงเหมาะสำหรับเป็นสารเพิ่มความแข็งแกร่งให้กับ PLA

นอกจากนี้อนุภาคอนินทรีย์ยังเป็นที่นิยมอย่างมากในการใช้งานเป็นสารเพิ่มความแข็งแกร่งให้กับวัสดุพอลิเมอร์โดยมีอนุภาคอนินทรีย์หลากหลายมากที่มีคุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ในการนำมาเป็นส่วนประกอบเพื่อเพิ่มความแข็งแกร่งให้กับ PLA ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite), นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (nano-$CaCO_3$), นาโนซิลิกอนไดออกไซด์ (nano-SiO_2) และนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (nano-TiO_2) ซึ่งจากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ nano-$CaCO_3$ เหมาะสมที่สุดเนื่องจาก มีราคาที่ประหยัด, มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่ และมีความแข็งแรงสูง

ซึ่งในงานวิจัยนี้กล่าวถึงการเตรียม PLA ที่ผสมเข้ากับ PBS และ nano-$CaCO_3$ ด้วยเทคนิคการผสมแบบละลาย ตรวจวิเคราะห์ตัวอย่าง ดังนี้ การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน (thermal stability), ทดสอบความต้านทานการแตกหักของตัวอย่างทดสอบ (fracture toughness), ทดสอบสมบัติเชิงกล (mechanical properties) และลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology), น้ำหนักสูญหายภายใต้อุณหภูมิ (TGA) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ SEM และ TEM

2. การทดลอง

2.1 <u>วัสดุ</u>

เม็ดพลาสติก PLA (Lehua Plastic Material Firm, Dongguan, China) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 200,000 กรัมต่อโมล PBS จาก Mingyuanxinchong Co., Ltd. (Dongguan, China) และนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 40 – 70 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิว 20 – 30 m^2/g ปริมาณกรดสเตียริกบนผิวของ nano-$CaCO_3$ พบที่ 3.5 wt% เลือกใช้ทำละลายชนิด ไดคลอโรมีเทน (CH_2Cl_2) (YongDa Chemical Reagent Co., Tianjin, China)

2.2 <u>การเตรียมตัวอย่างทดสอบ</u>

- การเตรียม PLA/PBS โดยเตรียม PLA : PBS ที่อัตราส่วนต่างๆดังนี้ 100 : 0, 95 : 5, 90 : 10, 85 : 15 และ 80 : 20 ตามลำดับ ซึ่งเตรียมในตัวทำละลาย CH_2Cl_2 และทำการปั่นกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการไล่ตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 200 °C ภายใต้ความดันต่ำ จากนั้นนำส่วนผสมดังกล่าวไปอัดลงไปในแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ด้วยการให้ความร้อนและอัดขึ้นรูป (compression-molded) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 180 °C ถึง 200 °C ความดัน 4 MPa
- การเตรียม PLA/nano-$CaCO_3$ โดยมีการเติม nano-$CaCO_3$ ที่ปริมาณตั้งแต่ 0.25 ถึง 1 %wt โดยเตรียม PLA ผสม nano-$CaCO_3$ ในตัวทำละลาย CH_2Cl_2 และปั่นกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการไล่ตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 200 °C ภายใต้ความดันต่ำ จากนั้นนำส่วนผสมดังกล่าวไปอัดลงไปในแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ด้วยการให้ความร้อนและอัดขึ้นรูป (compression-molded) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 180 °C ถึง 200 °C ความดัน 4 MPa
- การเตรียม PLA/PBS/nano-$CaCO_3$ โดยมีการเตรียม PBS ที่น้ำหนัก 10 %wt และเติม nano-$CaCO_3$ ที่ปริมาณตั้งแต่ 0.25 ถึง 1 %wt โดยเตรียม PLA ที่เติม PBS และ nano-$CaCO_3$ ในตัวทำละลาย CH_2Cl_2 และปั่นกวนให้เข้ากันเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการไล่ตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 200 °C ภายใต้ความดันต่ำ จากนั้นนำส่วนผสมดังกล่าวไปอัดลงไปในแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ด้วยการให้ความร้อนและอัดขึ้นรูป (compression-molded) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 180 °C ถึง 200 °C ความดัน 4 MPa

2.3 <u>คุณลักษณะเฉพาะและการตรวจวิเคราะห์</u>

การวัดเสถียรภาพทางความร้อน จะใช้วิธีการวัดสารตัวอย่างด้วยวิธี TGA (NETZSCH TG 209 F3) เป็นวิธีการวัดด้วยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ (30 - 600 °C) และอัตราการเพิ่มความร้อนเฉลี่ย 10 °C/นาที ภายใต้สภาพบรรยากาศที่เป็นแก๊สไนโตรเจน

การตรวจวิเคราะห์ตัวแปร critical stress intensity factor (K_{ic}) ด้วยวิธีการทดสอบแบบ single – edge notched (SEN) ตัวอย่างทดสอบมีขนาด 5 มม. X 10 มม. X 50 มม. ทดสอบด้วยเครื่อง Instron Model WDW3010 มาตรฐาน ASTM E-399 ส่วนการทดสอบความแข็งแกร่งต่อการโค้งงอทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790-86 ตัวอย่างที่มีขนาด 5 มม. X 10 มม. X 100 มม.

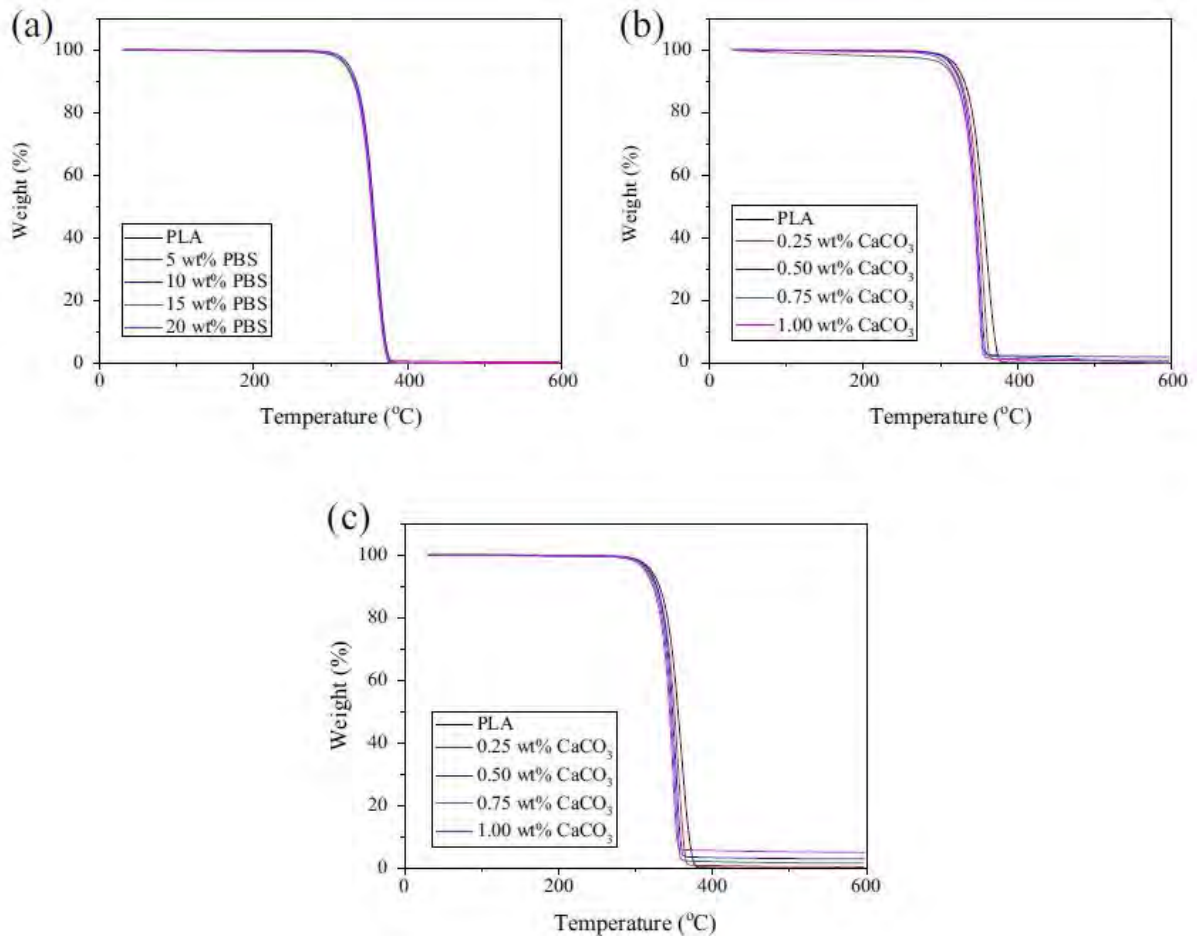
ลักษณะทางสัณฐานวิทยา จะทดสอบจากตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบความแข็งแกร่ง ทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ SEM (FE-SEM, S-4300/HITACHI) และลักษณะการกระจายตัวของ nano-$CaCO_3$ ใน PLA ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ TEM (FE-TEM, JEM2100/JEOL)

3. ผลและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability)

การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA ด้วยเทคนิค TGA อัตราการเพิ่มความร้อนเฉลี่ยอยู่ที่ 10 °C/นาที ภายใต้สภาพบรรยากาศที่เป็นแก๊สไนโตรเจน โดยจากตารางที่ 1 จะเห็นว่าปัจจัยในการวัดเสถียรภาพทางความร้อน จะวัดอุณหภูมิที่น้ำหนักหายไปที่ปริมาณ 5%, 10% และ 50% ($T_{5\%}$, $T_{10\%}$, $T_{50\%}$) ดังแสดงใน TGA Thermogram

อุณหภูมิที่ทำให้น้ำหนักหายไปเป็นปริมาณ 5%, 10% และ 50% ($T_{5\%}$, $T_{10\%}$, $T_{50\%}$) ของตัวอย่างที่ผสม PLA/PBS ไม่มีความต่างแบบมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบPLA บริสุทธิ์ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า PBS ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงความร้อนของ PLA ในขณะที่ $T_{5\%}$, $T_{10\%}$, $T_{50\%}$ ของตัวอย่างที่ผสม PLA/ nano-$CaCO_3$ มีการลดลงของอุณหภูมิเมื่อปริมาณของ nano-$CaCO_3$ เพิ่มขึ้น เนื่องจาก nano-$CaCO_3$ ส่งผลให้สมบัติเชิงความร้อนของ PLA ต่ำลง ส่วน $T_{5\%}$, $T_{10\%}$, $T_{50\%}$ ของตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/PBS/ nano-$CaCO_3$ มีการลดลงของอุณหภูมิลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณของ nano-$CaCO_3$ เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงพบว่าตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/PBS/ nano-$CaCO_3$ มีค่าเสถียรภาพทางความร้อนดีกว่าตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/ nano-$CaCO_3$ แม้ว่าจะเติม nano-$CaCO_3$ ในปริมาณที่เท่ากัน



ภาพที่ 1 TGA Thermogram ของ (a) ตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/PBS (b) ตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/ nano-$CaCO_3$ (c) ตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/PBS/ nano-$CaCO_3$[1]

ตารางที่ 1 อุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวของตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/PBS, PLA/nano-$CaCO_3$และPLA/PBS/nano-$CaCO_3$ [1]

PBS content (wt%)	$CaCO_3$ content (wt%)	$T_{5\%}$ (°C)	$T_{10\%}$ (°C)	$T_{50\%}$ (°C)
0	0	320.1	330.9	350.9
5	0	320.1	329.6	353.5
10	0	322.5	333.2	355.7
15	0	320.2	331.0	354.6
20	0	320.2	330.5	353.6
0	0.25	316.3	326.6	349.6
0	0.5	315.1	325.1	346.3
0	0.75	308.5	320.8	344.4
0	1.0	304.9	319.3	344.1
10	0.25	316.4	327.1	350.1
10	0.5	317.7	327.2	347.7
10	0.75	314.2	324.5	346.2
10	1.0	312.4	322.7	345.3

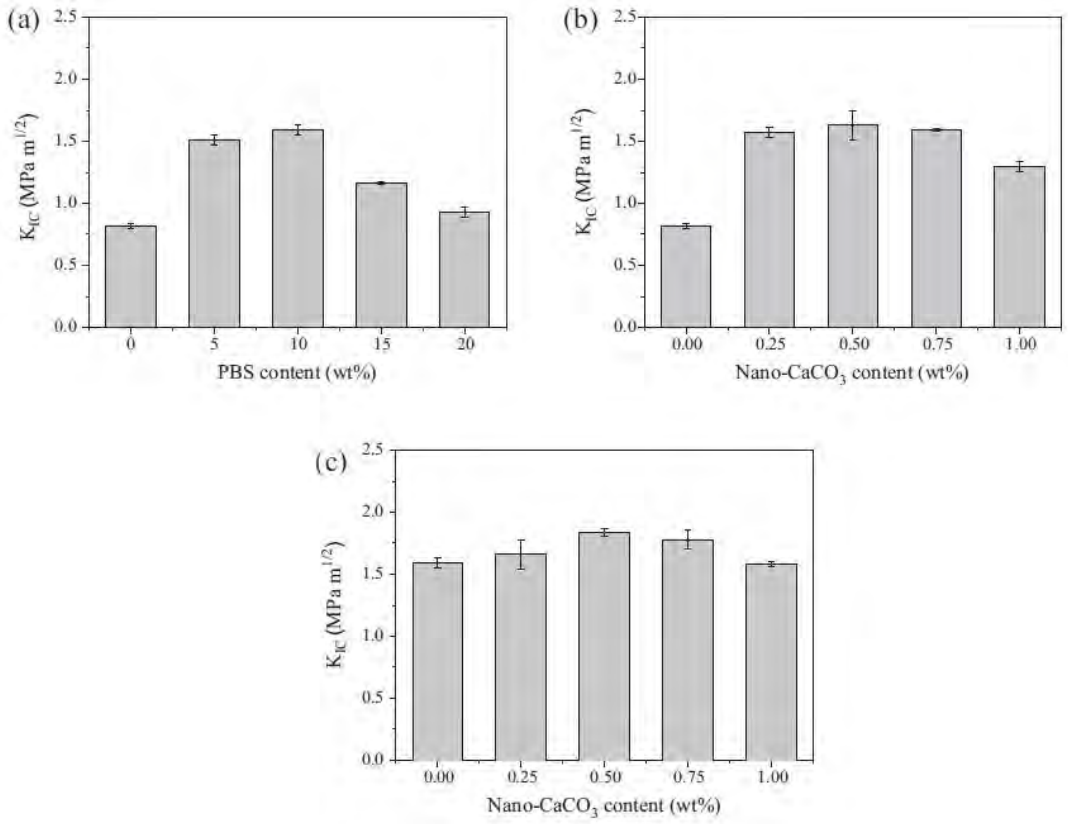
3.2 ทดสอบความต้านทานการแตกหัก (fracture toughness)

โดยการคำนวณความต้านทานการแตกหักคำนวณได้จากตัวแปรความเค้นวิกฤต (K_{ic}) ซึ่งคำนวณได้จากสูตร $K_{ic} = PBW^{1/2}$ Y โดยกำหนดให้ P เท่ากับแรงที่ทำให้ชิ้นงานแตกหัก (หน่วย kN), B เท่ากับความหนาของตัวอย่างทดสอบ (หน่วย ซม.) , W เท่ากับความกว้างของตัวอย่างทดสอบ (หน่วย ซม.) และ Y เท่ากับ geometrical factor

จากภาพ 2(a) แสดงให้เห็นถึงค่า K_{ic} ของตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/PBS ซึ่งค่า K_{ic} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม PBS โดย PLA มีความเปราะทำให้มีค่า K_{ic} อยู่ที่ 0.82 MPa $m^{1/2}$ เมื่อเติม PBS 5 และ 10 %wt จะได้ค่า K_{ic} อยู่ที่ 1.51 และ 1.59 MPa $m^{1/2}$ ตามลำดับ นั่นแสดงถึงค่า K_{ic} เพิ่มขึ้นจากตัวอย่างทดสอบที่ PLA บริสุทธิ์ถึง 84% และ 94% ตามลำดับ จึงทำให้พบว่าการเติม PBS ลงไปตัวอย่างทดสอบจะทำให้มีความยืดหยุ่น และดูดซับพลังงานได้ดียิ่งขึ้น รวมไปถึงยังช่วยรองรับแรงจากภายนอกที่มากระทำได้

จากภาพ 2(b) แสดงให้เห็นถึงค่า K_{ic} ของตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/ nano-$CaCO_3$ ซึ่งค่า K_{ic} มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม nano-$CaCO_3$ โดยเติมลงไปในปริมาณ 0.25 และ 0.5 %wt จะได้ค่า K_{ic} อยู่ที่ 1.57 และ 1.63 MPa $m^{1/2}$ ตามลำดับ นั่นแสดงถึงค่า K_{ic} เพิ่มขึ้นจากตัวอย่างทดสอบที่มี PLA บริสุทธิ์ ถึง 91% และ 98% ตามลำดับ แสดงถึงผลของการเติม nano-$CaCO_3$ ลงไปตัวอย่างทดสอบจะทำให้มีการเพิ่มพื้นที่การสัมผัสกันระหว่าง nano-$CaCO_3$ และ PLA โดยจะไปเพิ่มอันตรกริยาระหว่างโมเลกุลระหว่างหมู่คาร์บอนิล หรือหมู่ไฮดรอกซิลบนผิว nano-$CaCO_3$ และ PLA เพิ่มยิ่งขึ้น

จากการศึกษาผลของการเสริมแรงโดยการเติม PBS และ nano-$CaCO_3$ ลงใน PLA ทำให้ได้ตัวอย่างทดสอบที่มีการผสมกันของ PLA/PBS/ nano-$CaCO_3$ ซึ่งมีการเติม nano-$CaCO_3$ ในปริมาณต่างๆ โดยปริมาณที่สูงที่สุดที่เติมคือ 1%wt โดยในภาพ 2(c) แสดงให้เห็นถึงค่า K_{ic} ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม nano-$CaCO_3$ โดยค่า K_{ic} ของตัวอย่างทดสอบที่มีการผสม PBS 10%wt ลงไปใน PLA มีค่า K_{ic} อยู่ที่ 1.59 MPa $m^{1/2}$ ในขณะที่ตัวอย่างทดสอบที่มีการเติม PBS 10%wt และเติม nano-$CaCO_3$ 0.5%wt ลงไปใน PLA มีค่า K_{ic} อยู่ที่ 1.84 MPa $m^{1/2}$ นั่นแสดงถึงค่า K_{ic} เพิ่มขึ้นจากตัวอย่างทดสอบที่มี PLA ผสมกับ PBS เพียงอย่างเดียวถึง 15% จึงทำให้พบว่าเมื่อมีการเติม PBS และ nano-$CaCO_3$ ผสม PLA จะช่วยปรับปรุงสมบัติความยืดหยุ่น



ภาพที่ 2 (a) การทดสอบความต้านทานการแตกของตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/PBS (b) การทดสอบความต้านทานการแตกของตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/ nano-$CaCO_3$ (c) การทดสอบความต้านทานการแตกของตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/PBS/ nano-$CaCO_3$ (โดยเติม PBS 10%wt) [1]

3.3 ทดสอบสมบัติเชิงกล (mechanical properties)

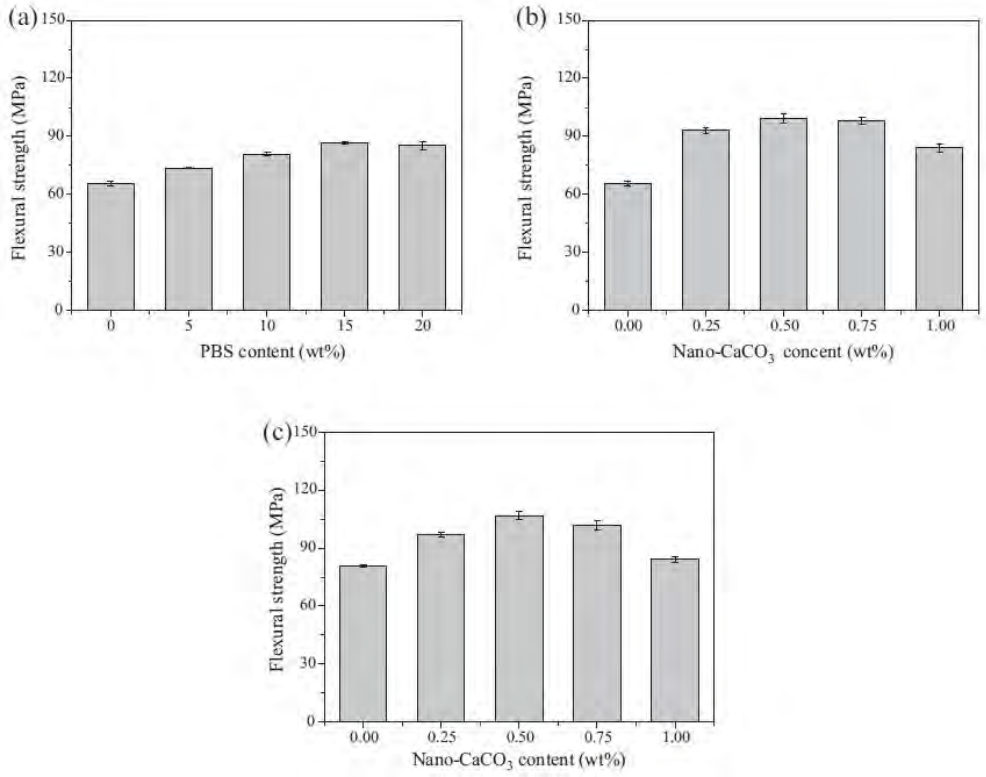
โดยการทดสอบสมบัติเชิงกลแบ่งออกเป็น การวัดความแข็งแกร่งต่อการโค้งงอ (flexural strength) และวัดค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่น

จากภาพ 3(a) แสดงให้เห็นถึงความแข็งแกร่งต่อการโค้งงอของตัวอย่างทดสอบที่มีการผสม PBS และ PLA โดยค่าความแข็งแกร่งต่อการโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม PBS ซึ่งค่าความแข็งแกร่งของ PLA บริสุทธิ์ มีค่าอยู่ที่ 65.5 MPa ในขณะที่ตัวอย่างทดสอบ PLA ที่มีการเติม PBS 10 และ 15%wt มีค่าอยู่ที่ 80.9 และ 86.7 MPa ตามลำดับ นั่นแสดงถึงค่าความแข็งแกร่งต่อการโค้งงอที่เพิ่มขึ้นจากตัวอย่างทดสอบที่มี PLA บริสุทธิ์ ถึง 23% และ 32% ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลจากการยึดติดระหว่างผิวของ PBS และ PLA

จากภาพ 3(b) แสดงให้เห็นถึงความแข็งแกร่งต่อการโค้งงอของตัวอย่างทดสอบที่มีการผสม nano-$CaCO_3$ และ PLA โดยค่าความแข็งแกร่งต่อการโค้งงอมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม nano-$CaCO_3$ โดยเติมลงไปในปริมาณ 0.25 และ 0.5%wt มีค่าอยู่ที่ 93 และ 99 MPa ตามลำดับ นั่นแสดงถึงค่าความแข็งแกร่งต่อการโค้งงอที่เพิ่มขึ้น

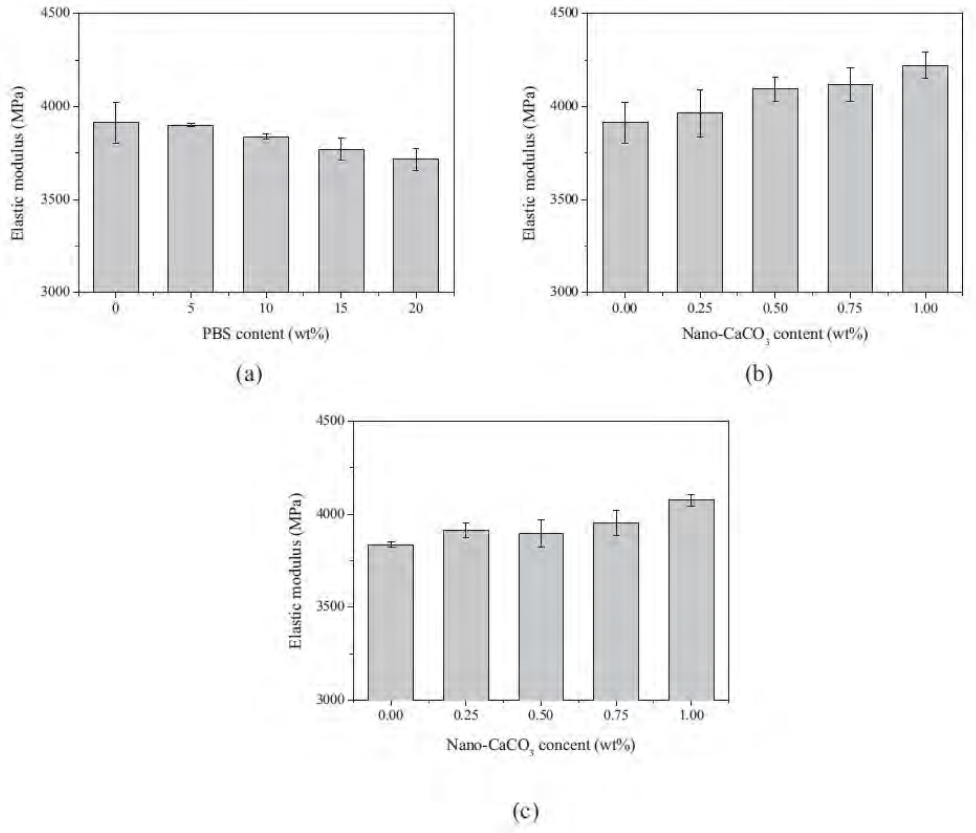
จากตัวอย่างทดสอบที่มี PLA บริสุทธิ์ ถึง 41% และ 51% ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลจากการยึดติดระหว่างผิวของ nano-$CaCO_3$ กับ PLA

จากภาพ 3(c) แสดงให้เห็นถึงความแข็งแกร่งต่อการโค้งงอของตัวอย่างทดสอบที่มีการผสมกันของ PLA/PBS/ nano-$CaCO_3$ โดยค่าความแข็งแกร่งต่อการโค้งงอของตัวอย่างทดสอบที่มีการผสม PBS 10%wt ลงไปใน PLA มีค่าความแข็งแกร่งต่อการโค้งงออยู่ที่ 80.9 MPa และตัวอย่างทดสอบที่มีการเติม PBS 10%wt และเติม nano-$CaCO_3$ 0.5%wt ลงไปใน PLA มีค่าความแข็งแกร่งต่อการโค้งงออยู่ที่ 106.7 MPa จึงทำให้พบว่า PLA มีค่าความแข็งแกร่งต่อการโค้งงอเพิ่มขึ้นเมื่อเติม PBS และ nano-$CaCO_3$ ลงไป



ภาพที่ 3 (a) การทดสอบความแข็งแกร่งต่อการโค้งงอของตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/PBS (b) การทดสอบความแข็งแกร่งต่อการโค้งงอของตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/ nano-$CaCO_3$ (c) การทดสอบความแข็งแกร่งต่อการโค้งงอของตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/PBS/ nano-$CaCO_3$ (โดยเติม PBS 10%wt) [1]

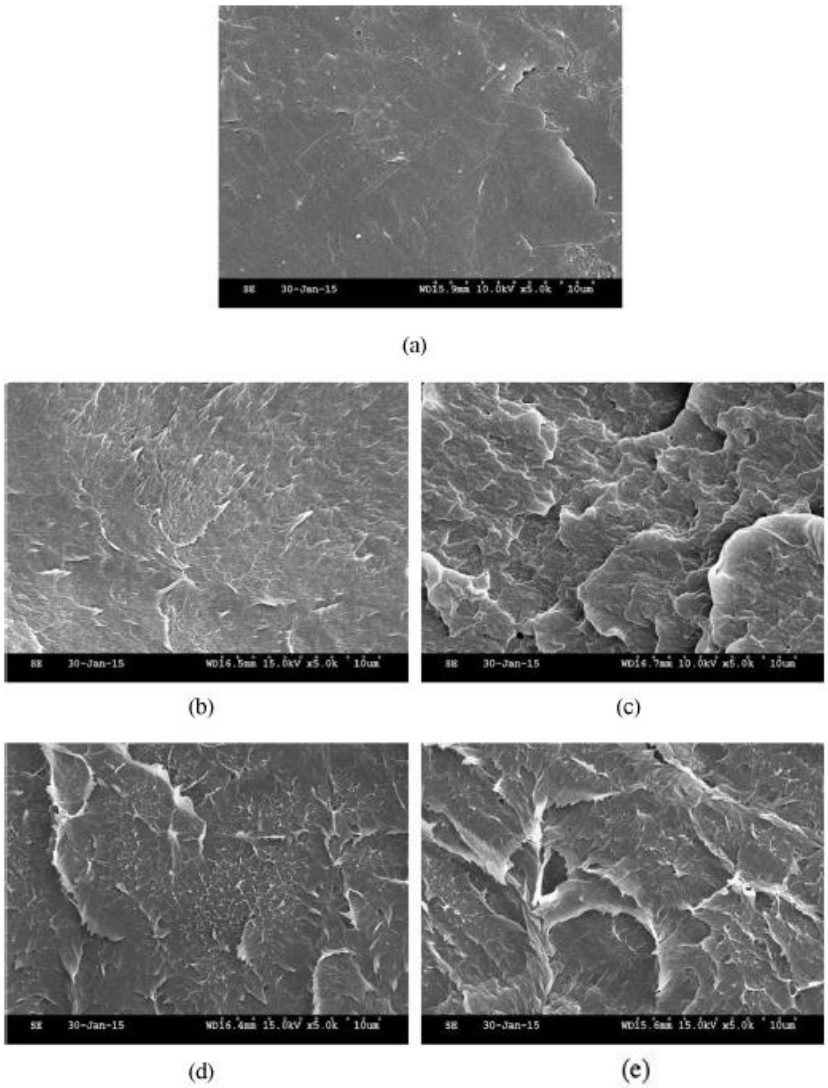
นอกจากนั้น ภาพที่ 4 แสดงให้เห็นถึงค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นของตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/PBS, PLA/ nano-$CaCO_3$ และ PLA/PBS/ nano-$CaCO_3$ จากภาพที่ 4(a) ค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นของตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/PBS มีการลดลงอย่างต่อเนื่อง จาก 3912 ถึง 3715 MPa เมื่อปริมาณของ PBS เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 ไปจนถึง 20%wt อย่างไรก็ตามในภาพที่ 4(b) จะเห็นว่าค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นของตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/ nano-$CaCO_3$ มีการเพิ่มขึ้นจาก 3912 ถึง 4220 MPa เมื่อปริมาณของ nano-$CaCO_3$ เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 ไปจนถึง 1%wt ซึ่งเป็นผลจากอันตรกิริยาระหว่างผิว (interfacial interaction) ของ nano-$CaCO_3$ กับ PLA แข็งแรงมากยิ่งขึ้น ส่วนในภาพที่ 4(c) จะเห็นว่าค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นของตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/PBS/nano-$CaCO_3$ มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเติม nano-$CaCO_3$ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นของตัวอย่างทดสอบ PLA จะลดลงก็ต่อเมื่อเติม PBS แต่ในขณะที่ถ้าเติมทั้ง PBS และ nano-$CaCO_3$ จะปรับปรุงสมบัติของตัวอย่างทดสอบให้ดีขึ้น



ภาพที่ 4 (a) ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างที่ผสม PLA/PBS (b) ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างที่ผสม PLA/ nano-$CaCO_3$ (c) ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของตัวอย่างที่ผสม PLA/PBS/ nano-$CaCO_3$ (โดยเติม PBS 10%wt) [1]

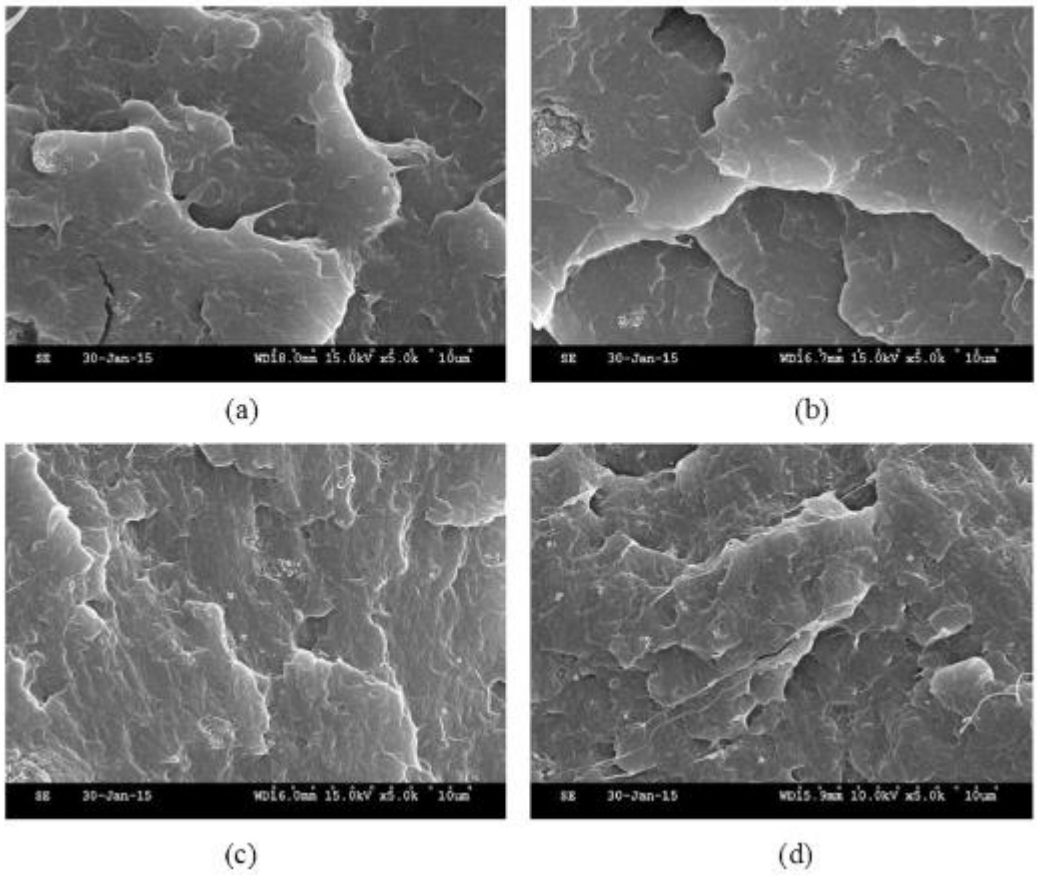
3.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology)

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาทดสอบหลังจากการทำการทดสอบ K_{ic} ซึ่งสังเกตได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) จากภาพที่ 5(a) จะเป็นลักษณะของตัวอย่างทดสอบที่มีส่วนผสมเป็น PLA บริสุทธิ์ โดยจะมีลักษณะที่ค่อนข้างเรียบ แสดงถึงความเปราะของ PLA เมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบที่มีการผสม PLA/PBS ที่มีการเติม PBS ที่ปริมาณต่างๆ ซึ่งจะมีความเหนียวมากกว่า โดยจะดูได้จากภาพที่ 5(b-e) สังเกตเห็นแนวเส้นที่มีการยืดตัวออก แสดงถึงลักษณะ plastic deformation ก่อนการแตกหัก



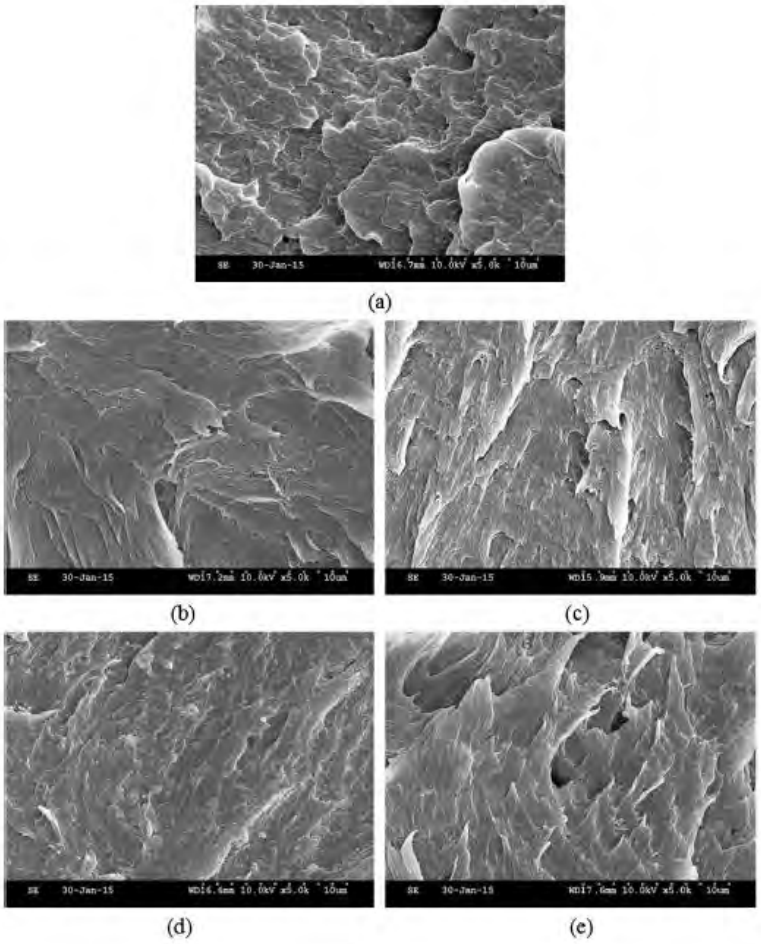
ภาพที่ 5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน SEM ของตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/PBS หลังการทดสอบ K_{ic} (a) unmodified PLA (b) 5%wt PBS (c) 10%wt PBS (d) 15%wt PBS (e) 20%wt PBS (ที่กำลังขยาย 5000 เท่า)[1]

จากภาพที่ 6 แสดงให้เห็นตัวอย่างทดสอบผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบ SEM ซึ่งจะเป็นลักษณะของตัวอย่างทดสอบที่มีส่วนผสมของ PLA กับ nano-$CaCO_3$ โดยภาพที่เห็นผิวมีลักษณะหยาบและมีรอยแตกที่ผิวหน้ามากกว่าตัวอย่างทดสอบ PLA บริสุทธิ์ เมื่อมีรอยแตกเกิดขึ้นจะส่งผลต่อการยึดติดระหว่างผิวของ nano-$CaCO_3$ และ PLA ลดต่ำลง ทำให้เกิดรอยแตกเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากการขยายของรอยแตก (crack propagation) เพิ่มขึ้น และการดูดซับพลังงานได้มากขึ้นในระหว่างการแตกหัก



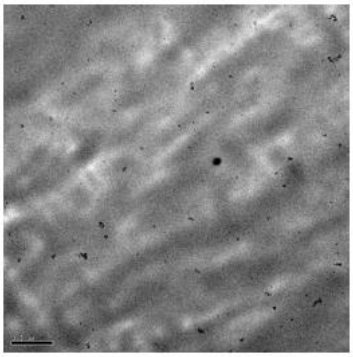
ภาพที่ 6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน SEM ของตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/ nano-$CaCO_3$ หลังการทดสอบ K_{ic} (a) 0.25%wt nano-$CaCO_3$ (b) 0.5%wt nano-$CaCO_3$ (c) 0.75%wt nano-$CaCO_3$ (d) 1%wt nano-$CaCO_3$ (ที่กำลังขยาย 5000 เท่า) [1]

จากภาพที่ 7 แสดงให้เห็นตัวอย่างทดสอบผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบ SEM ซึ่งจะเป็นลักษณะของตัวอย่างทดสอบที่มีส่วนผสมของ PLA/PBS/nano-$CaCO_3$ ซึ่งจากภาพที่ 7(a) จะเป็นลักษณะของตัวอย่างทดสอบที่มีส่วนผสมเป็น PLA และ PBS ปริมาณ 10%wt ซึ่งก็จะมีลักษณะผิวหน้าที่มีรอยแตก และมีแนวเส้นเป็นจำนวนมาก แต่เมื่อเทียบกับภาพที่ 7(b-e) ที่มีการเติม nano-$CaCO_3$ จะเห็นได้ชัดว่าที่ผิวหน้ามีความหยาบ และรอยแตกที่มากกว่าตัวอย่างทดสอบที่มีส่วนผสมเป็น PLA และ PBS



ภาพที่ 7 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน SEM ของตัวอย่างทดสอบที่ผสม PLA/PBS/nano-$CaCO_3$ หลังการทดสอบ K_{ic} (a) PLA/PBS ปริมาณ 10%wt (b) 0.25%wt nano-$CaCO_3$ (c) 0.5%wt nano-$CaCO_3$ (d) 0.75%wt nano-$CaCO_3$ (e) 1%wt nano-$CaCO_3$ (ที่กำลังขยาย 5000 เท่า) [1]

นอกจากนั้นยังมีการสังเกตการกระจายตัวของ nano-$CaCO_3$ ใน PLA โดยสังเกตผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน TEM ซึ่งจากภาพที่ 8 เป็นภาพจาก TEM ที่แสดงให้เห็นว่า nano-$CaCO_3$ กระจายตัวใน PLA ได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 8 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ TEM ของตัวอย่างทดสอบที่มีส่วนผสมของ PLA กับ nano-$CaCO_3$ (scale bar 0.5 ไมโครเมตร) [1]

4. สรุป

การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน ตัวอย่างทดสอบที่มีการเติม PBS และ nano-$CaCO_3$ ค่าที่ได้มีการลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบ PLA บริสุทธิ์ ส่วนการทดสอบความต้านทานการแตกหัก และความแข็งแกร่งต่อการโค้งงอ ตัวอย่างทดสอบที่มีการเติม PBS และ nano-$CaCO_3$ มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น และมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ส่วนมอดุลัสของความยืดหยุ่นจะมีค่าลดลงเมื่อตัวอย่างทดสอบมีการเติม PBS ในขณะที่ตัวอย่างทดสอบ เติม nano-$CaCO_3$ มีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบ PLA บริสุทธิ์จากภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบ SEM แสดงถึงผลการเติม PBS และ nano-$CaCO_3$ ช่วยปรับปรุงสมบัติความเหนียวและเสริมแรงให้กับ PLA ได้

เอกสารอ้างอิง

[1] F-L Jin , Q – Q Pang and T – Y Zhang (2015). Synergistic reinforcing of poly(lactic acid)-based systems by polybutylene succinate and nano-calcium carbonate, J. Ind.Eng. Chem., 32, 77-84.

<u>รายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม : คุณลักษณะของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตนาโนคอมพอสิตผสมแผ่นนาโนกราฟีน</u>

บทคัดย่อ

พอลิบิวทิลีนซักซิเนต (PBS) จัดเป็นพอลิเอสเทอร์แบบเส้นตรงที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพและมีโครงสร้างกึ่งผลึก (semicrystalline) มีการใช้งานทางวิศวกรรมอย่างแพร่หลายเนื่องจากขึ้นรูปได้ง่ายและมีสมบัติเชิงกลที่ดี PBS นาโนคอมพอสิตผสมแผ่นนาโนกราฟีน (graphene nanosheets) เตรียมได้จากวิธี การหลอมผสม (melt compounding) โดยรายงานผลในเชิงโครงสร้าง สมบัติเชิงความร้อน สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติเชิงกล ผลพบว่านาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ทำให้มีความเสถียรต่อความร้อนเพิ่มขึ้น 35^{o}C เทียบกับ PBS บริสุทธิ์ นอกจากนี้ยังพบปรากฏการณ์ที่น่าสนใจจากการวิเคราะห์ FTIR พบว่า PBS ผสมกราฟีน นาโนคอมพอสิตก่อให้เกิดโครงสร้างผลึกของ PBS แบบ β ที่การผสมกราฟีน 5%wt ซึ่งโดยปกติจะเกิดขึ้นกับ PBS บริสุทธิ์ภายใต้ความเค้น และค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นสูงมาก (10^{5}) เมื่อมีการผสมกราฟีน 5%wt

1. บทนำ

พลาสติกมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำเนินชีวิตประจำวันของเรา แต่ในขณะเดียวกันเป็นส่วนสำคัญในการก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการอนุรักษ์และการปกป้องสิ่งแวดล้อมถือเป็นความท้าทายเพื่อการพัฒนาคุณภาพชีวิต วัสดุพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงเป็นทางเลือกที่จะทดแทนกลุ่มพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ โดยการพัฒนาสมบัติของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้กลายเป็นที่นิยมของทั่วโลก พอลิบิวทิลีนซักซิเนต (PBS) จัดเป็นพอลิเอสเทอร์แบบเส้นตรงที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งสังเคราะห์มาจาก ไดออล และกรดคาร์บอกซิลิก สามารถนำไปใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ทางเลือกในการลดปัญหามลพิษ เนื่องจากมีความยืดหยุ่นคล้ายกับพอลิเอทิลีน (PE) ต้นทุนการผลิตต่ำ อย่างไรก็ตาม PBS ยังขาดสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อน ซึ่งเป็นที่ต้องการสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรม ดังนั้นการผสมวัสดุอื่นที่เหมาะสมเสริมเข้าไปใน PBS อาจจะช่วยเพิ่มประโยชน์ของ PBS อย่างมีประสิทธิภาพได้

การเตรียมและการศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตเป็นที่น่าสนใจอย่างมากในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เนื่องจากมีการปรับปรุงคุณสมบัติที่ดีขึ้น ได้แก่ ความแข็งแรงเชิงกล, สมบัติการขวางกั้น, เสถียรภาพทาง

ความร้อนและ Heat deflection temperature การปรับปรุงคุณสมบัตินี้ส่วนใหญ่มาจากการเติมสารเสริมแรงขนาดนาโนที่มีค่า aspect ratio สูงและความหนาแน่นต่ำ โดยทั่วไปสารเสริมแรงระดับนาโน ได้แก่ ออร์กาโนเคลย์, คาร์บอนนาโนทิวบ์ (CNTs), กราไฟต์, polyhedral oligomeric silsesquioxanes และ SiO_2 เป็นต้น กราไฟต์มีโครงสร้างแบบชั้นคล้ายกับโครงสร้างเคลย์ ซึ่งประกอบด้วยแผ่นนาโนกราฟีนจำนวนมากซึ่งยึดติดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยจับกลุ่มก้อนขนาดเล็ก (aggregates) เมื่อกระจายไปในพอลิเมอร์เนื่องจากแผ่นนาโนกราฟีนมีความเข้ากันได้กับเนื้อพอลิเมอร์ต่ำ ดังนั้นจึงมีการดัดแปรผิวหน้ากราไฟต์ในแผ่นกราฟีนเพื่อปรับปรุงการกระจายได้ดีในเนื้อของพอลิเมอร์ ส่วนผลในทางคอมพอสิตทำให้สมบัติเชิงกลและเชิงไฟฟ้าดีเยี่ยม

งานวิจัยก่อนหน้านี้ศึกษาเกี่ยวกับ PBS นาโนคอมพอสิตกับสารเติมแต่งเช่น TiO_2, ซิลิกา, เคลย์, คาร์บอนแบล็ค, CNT แต่ยังคงมีการศึกษาเกี่ยวกับกราฟีนและกราฟีนออกไซด์อย่างจำกัด ในส่วนของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ PBS เป็นที่น่าสนใจเพราะความสามารถในการย่อยสลาย การนำกลับมาใช้ใหม่ และกระบวนการผลิตดีเยี่ยม อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงกลและเชิงความร้อน จำเป็นต้องมีการปรับปรุงสำหรับการใช้งานในการค้าและอุตสาหกรรม จากงานวิจัยที่ผ่านมากราฟีนสามารถทำให้วัสดุพอลิเมอร์มีความแข็งแรงและความทนทานมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียม PBS/แผ่นนาโนกราฟีน นาโนคอมพอสิต โดยตรวจวิเคราะห์โครงสร้าง รูปร่างลักษณะ สมบัติเชิงความร้อน เชิงไฟฟ้า และเชิงกลของ PBS นาโนคอมพอสิตเปรียบเทียบกับ PBS บริสุทธิ์

2. การทดลอง

<u>วัสดุ</u>

1. PBS (Bionelle 1050 จาก Showa Highpolymer, ญี่ปุ่น)
2. กราฟีนที่สังเคราะห์โดยใช้ความร้อนและผ่านการรีดิวซ์ ผลิตจากกราไฟต์ออกไซด์ด้วยวิธีการของ Hummer

<u>ขั้นตอนการเตรียมกราฟีนดัดแปร</u>

1. เติมผงกราไฟต์ปริมาณ 5 กรัม ในกรดซัลฟุริกเข้มข้น 125 มล. และเติมโซเดียมไนเตรทปริมาณ 2.5 กรัม
2. ทำการปั่นกวนของผสมจากข้อ 1 เป็นเวลา 30 นาทีในอ่างน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 5°C

3. เติม $KMnO_4$ ปริมาณ 15 กรัม และปรับอุณหภูมิเป็น 100°C
4. ลดอุณหภูมิของของผสมและทำการเจือจางด้วยน้ำที่ไม่มีประจุปริมาตร 1.5 L
5. เติม 30% H_2O_2 จนกระทั่งฟองไฮโดรเจนหมด
6. ทำการกรองสารละลายและแยกตะกอน
7. ทำการกระจายตะกอนในน้ำที่ไม่มีประจุปริมาตร 2 L และเติมกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง (6%) ปริมาตร 2 L เพื่อกำจัดไอออน SO_4^{2-}
8. ทำการกรองและแยกตะกอน
9. ตรวจวิเคราะห์ไอออน SO_4^{2-} และ Cl^- ด้วย $BaSO_4$ และ $AgNO_3$
10. อบกราไฟต์ออกไซด์ในภาวะสุญญากาศที่อุณหภูมิ 60°C 24 ชม.
11. ทำการดัดแปรผิวหน้ากราฟีนด้วยวิธี thermal exfoliation ของกราไฟต์ออกไซด์
12. เติมกราไฟต์ออกไซด์ 1 กรัมในหลอดแก้วควอซท์ขนาดความกว้าง 25 มม. และปิดปลายด้านหนึ่ง
13. ไล่อากาศออกจากหลอดและแทนที่ด้วยแก๊สไนโตรเจน
14. ใส่หลอดในเตาเผาที่อุณหภูมิ 1,050°C เป็นเวลา 30 วินาที
15. ตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนกราฟีนด้วยเทคนิค Raman spectroscopy และ X-ray diffraction

<u>การเตรียมตัวอย่าง</u>

- ก่อนที่จะทำการหลอมนำเม็ด PBS ไปอบสุญญากาศที่ 80°C ข้ามคืนเพื่อกำจัดความชื้นซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการย่อยสลายด้วยน้ำระหว่างกระบวนการได้
- การเตรียม PBS/กราฟีน นาโนคอมพอสิต ใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่แบบหมุนทางเดียวกัน (co-rotating twin screw-extruder)
- อุณหภูมิของการผสมที่ 170°C โดยใช้ความเร็ว 270 รอบ/นาที
- ตัวอย่างที่เป็นรูปแผ่นกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม. มีความหนา 1 มม. ส่วนตัวอย่างที่เป็นสี่เหลี่ยมเตรียมโดยใช้ความร้อน 150°C และใช้แรงกด 10 kPa

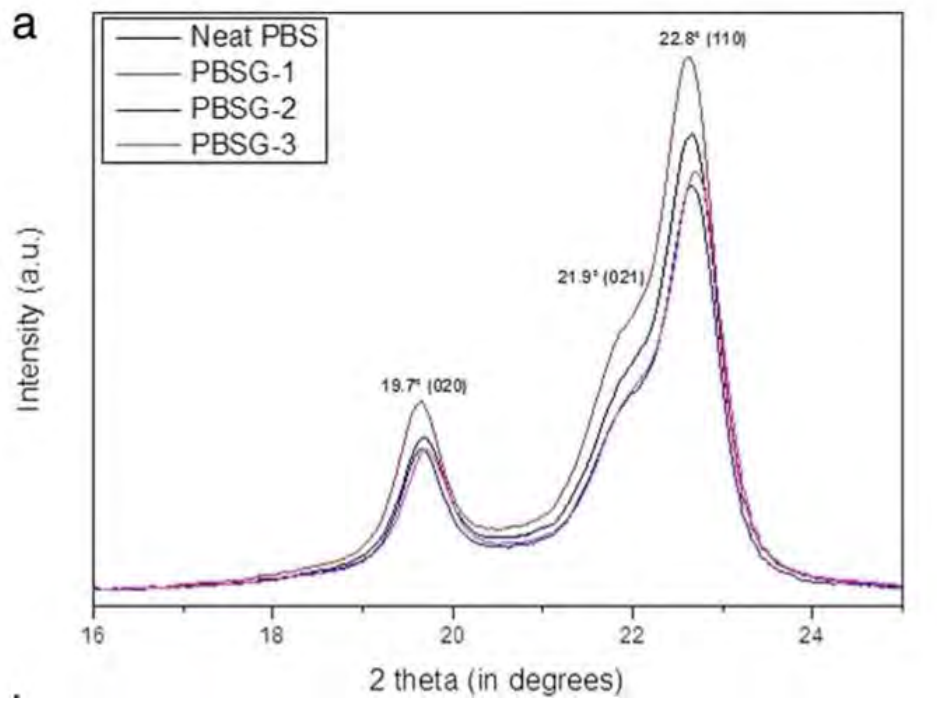
เทคนิคการตรวจวิเคราะห์

1. X-ray diffraction (XRD), Bruker GADDS, CuK_{α} , λ = 0.154 *nm*
2. Differential scanning calorimeter (DSC) ตรวจวิเคราะห์อุณหภูมิหลอมและอุณหภูมิการเกิดผลึก
3. Dielectric analyser (DEA)
4. MicroXact 8 A4P-200 4 point probe resistivity mapping system และ nanoindentation ตรวจวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้า (conductivity)
5. Polarized optical microscopy (POM) ที่มีการให้ความร้อน ตรวจวิเคราะห์ลักษณะของผลึกและการเติบโตของ spherulite
6. Tranmission electron microscopy (TEM), JEOL 2000EX(II) (JEOL, โตเกียว, ญี่ปุ่น) ตรวจวิเคราะห์ลักษณะผิวหน้า
7. Netzsch thermogravimetric analyzer (TGA) ตรวจวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ทดสอบที่อุณหภูมิ 50-700^{O}C ที่อัตราความร้อน 20^{O}C ต่อนาที
8. FTIR-ATR, Bruker VERTEX70 spectrometer ตรวจวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

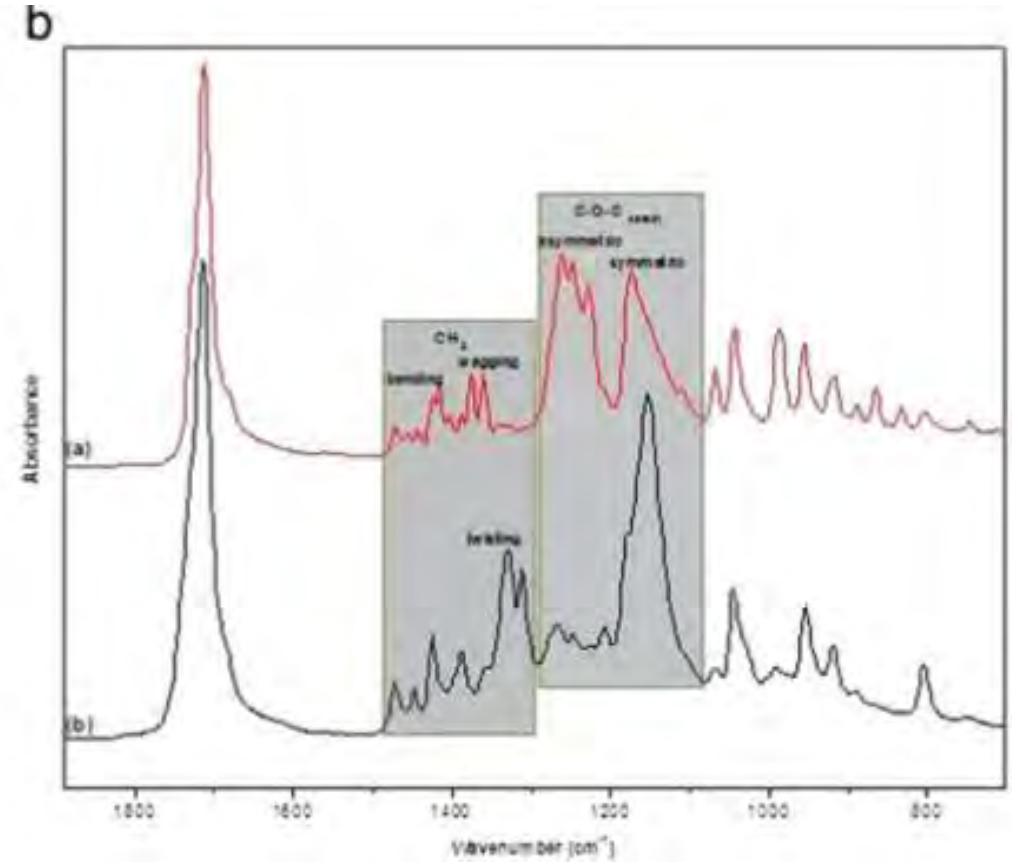
ผลของสมบัติเชิงโครงสร้างของ PBS และ PBS/กราฟีน นาโนคอมพอสิต

XRD เป็นเครื่องมือสำคัญในการระบุความเป็นระเบียบโครงสร้างของพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต จากการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องได้ผลดังรูปที่ 1 รูปแบบ diffraction ของตัวอย่าง PBS และ PBS/กราฟีนนาโนคอมพอสิต มีความใกล้เคียงกัน เนื่องจากทั้งสองตัวอย่างมีโครงสร้างผลึกคล้ายกันที่ 2θ มีค่า 19.7, 21.9 และ 22.8^{o} แสดงถึงโครงสร้างผลึกที่มีระนาบ (020), (021), และ (110) ในกรณีของนาโนคอมพอสิต diffraction มีลักษณะใกล้เคียงกับ PBS บริสุทธิ์ ดังนั้นการเติมนาโนกราฟีนไม่ส่งผลต่อรูปแบบผลึกของ PBS



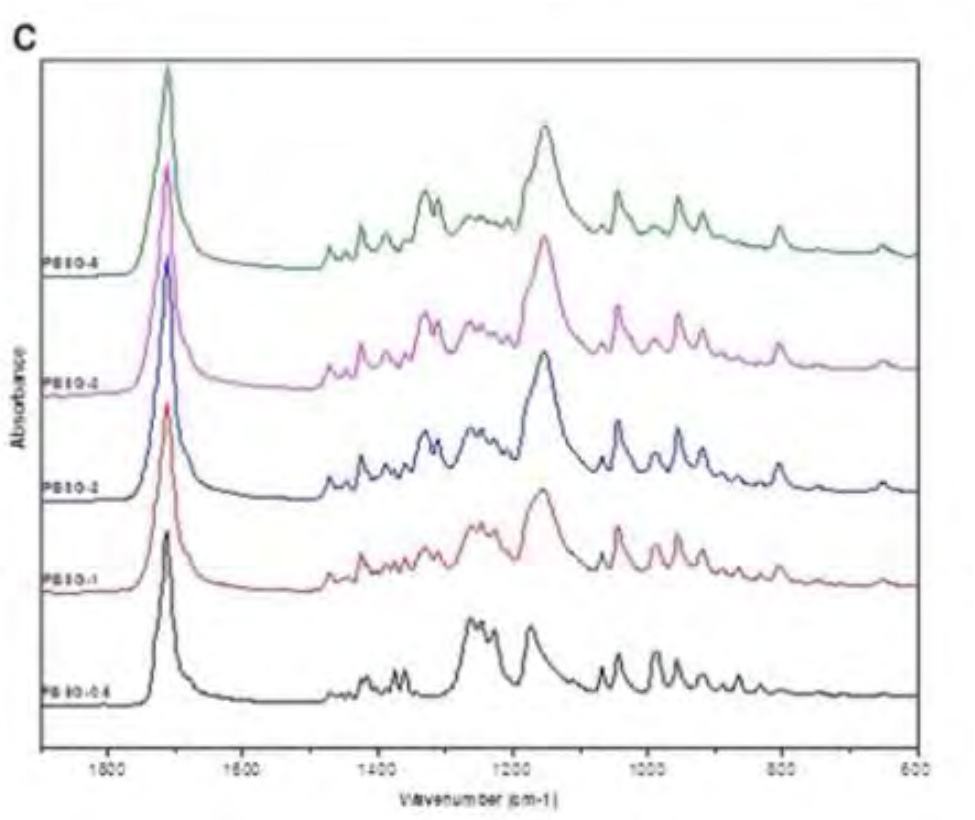
รูปที่ 1 ผล XRD ของ PBS บริสุทธิ์และ PBS/กราฟีนนาโนคอมพอสิต [1]

สำหรับผลจากการทดสอบ FTIR-ATR ของ PBS และ PBS/กราฟีนนาโนคอมพอสิตเป็นดังรูปที่ 2 และ 3 โดยรูปที่ 2 เป็นความแตกต่างระหว่าง PBS ที่อยู่ในสภาวะที่มีความเค้นและในสภาวะปกติ จากรูปแสดงให้เห็นว่าหมู่ C=O stretching ที่ 1,714 cm^{-1}, CH_2 bending 1,470 and 1,414 cm^{-1} wagging 1,375 และ 1,360 cm^{-1} ที่แถบความถี่ 1,300-1,210 cm^{-1} และ 1,200-1,100 cm^{-1} แสดงถึง stretching ของ C-O-C แบบอสมมาตรและสมมาตรตามลำดับ ส่วน stretching ของ O-C-C อยู่ที่ 1,044 cm^{-1} และที่ตั้งแต่ 1,000 cm^{-1} ลงไปเป็นผลจาก CH_2 การใช้ความเค้นเชิงกลทำให้ stretching ของ C-O-C แบบอสมมาตรลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และ stretching แบบสมมาตรเลื่อนจากที่ 1,173 cm^{-1} ไปที่ 1,153 cm^{-1} ช่วง 1,330-1,310 cm^{-1} เป็นการแสดงถึง CH_2 twisting เนื่องจาก IR สามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงการจัดรูปแบบของผลึกของโครงสร้างพอลิเมอร์ จึงสามารถสรุปได้ว่าผลจาก ATR ของสายโซ่ PBS มีการเปลี่ยนเฟสเมื่อมีความเค้น Ichikawa และคณะได้รายงานผลของผลึกของ PBS ระหว่างรูปแบบ α และβ โดย α พบในเส้นใยภาวะปกติ ส่วนβ พบในเส้นใยที่ผ่านการดึง ในสถานะของแข็งการเปลี่ยนแปลงของผลึกระหว่าง รูปแบบ α และβ มีการผันกลับได้ ดังนั้น สเปกตรัมของสภาวะที่มีความเค้นและสภาวะปกติสามารถระบุได้ว่าเป็น PBS ในรูปแบบ βและ α ตามลำดับ

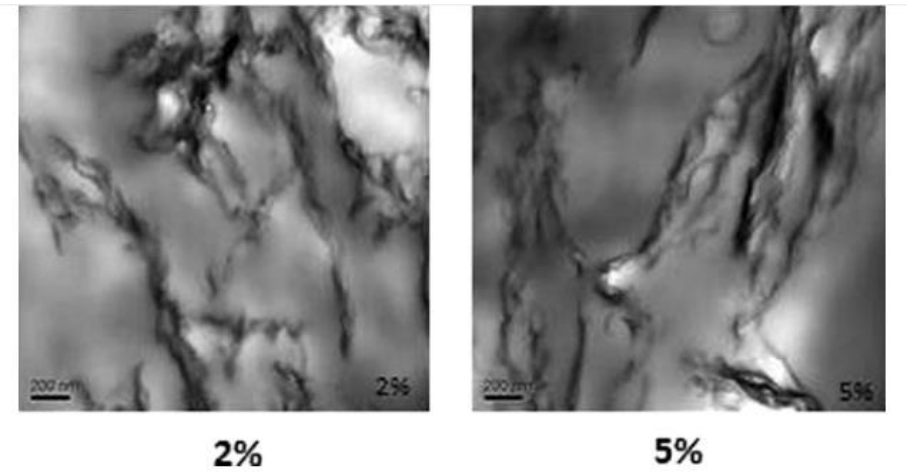


รูปที่ 2 ผล FTIR-ATR สเปกตรัมของ PBS ในสภาวะปกติและสภาวะที่มีความเค้น [1]

จากรูปที่ 3 เป็นสเปกตรัมทั้งหมดของ PBS/กราฟีนนาโนคอมพอสิตในสภาพวะปกติ เมื่อใช้สารเติมแต่งกราฟีน 0.5%wt สเปกตรัม IR มีความใกล้เคียงกับของ PBS รูปแบบ α และเมื่อเพิ่มกราฟีนเป็น 1%wt CH_2 twisting ที่ช่วง 1,330-1,310 cm^{-1} stretching C-O-C แบบอสมมาตรลดลงที่ช่วง 1,300-1,210 cm^{-1} และ stretching แบบสมมาตร 1,172-1,153 cm^{-1} เมื่อเติมกราฟีนนาโนคอมพอสิตในปริมาณมากขึ้นสเปกตรัมจะมีความใกล้เคียงกับ PBS ในรูปแบบ β สังเกตได้จาก PBS ที่ผสมกราฟีน 5%wt ซึ่ง PBS ในรูปแบบ β เป็นโครงสร้างที่ไม่เสถียรและเกิดภายใต้ความเค้น จากรูปที่ 4 แสดงการกระจายของกราฟีนใน PBS จาก TEM เป็นการยืนยันว่าแผ่นนาโนกราฟีนกระจายได้ดีในเนื้อ PBS



รูปที่ 3 ผล FTIR-ATR สเปกตรัมของ PBS/กราฟีนนาโนคอมพอสิต ในปริมาณต่าง ๆ ในสภาวะปกติ [1]



รูปที่ 4 ผล TEM ของ PBS/กราฟีนนาโนคอมพอสิตที่ 2%wt (ซ้าย) และ 5%wt (ขวา) [1]

ผลของสมบัติเชิงความร้อนของ PBS และ PBS/กราฟีน นาโนคอมพอสิต

จากตารางที่ 1 PBS บริสุทธิ์มีการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 320°C เมื่อมีการเติมกราฟีนลงไป 5%wt มีการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิสูงขึ้นคือ 355°C หมายความว่า T_d ของนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้น 35°C เทียบกับ PBS บริสุทธิ์แสดงว่าโครงสร้างที่เป็นชั้นของกราฟีนช่วยเพิ่มเสถียรภาพต่อความร้อนให้กับ PBS การที่มีความเสถียรต่อความร้อนสามารถบอกได้ว่ากราฟีนมีการกระจายตัวได้ดีใน PBS ซึ่งส่งผลทำให้มีสมบัติการขวางกั้นโมเลกุลระเหยได้ที่ผลิตออกมาระหว่างการย่อยสลายด้วยความร้อนของ PBS ผลที่ได้ใกล้เคียงกับการเติมสารเติมแต่งชนิดอื่น ๆ ในการเสริมแรง PBS นาโนคอมพอสิต

ตารางที่ 1 สมบัติเชิงความร้อนของ PBS/กราฟีนนาโนคอมพอสิต [1]

Sample	T_d (°C)	T_m (°C)	Delta H (J/g)	% Crystallinity
PBS	320	110.9	79.8	39.9
PBS/GNC0.5	330	111.0	64.3	32.5
PBS/GNC1	342	111.1	63.4	31.7
PBS/GNC2	347	111.1	62.6	31.3
PBS/GNC3	354	111.1	62.2	31.1
PBS/GNC5	355	111.2	61.3	30.7

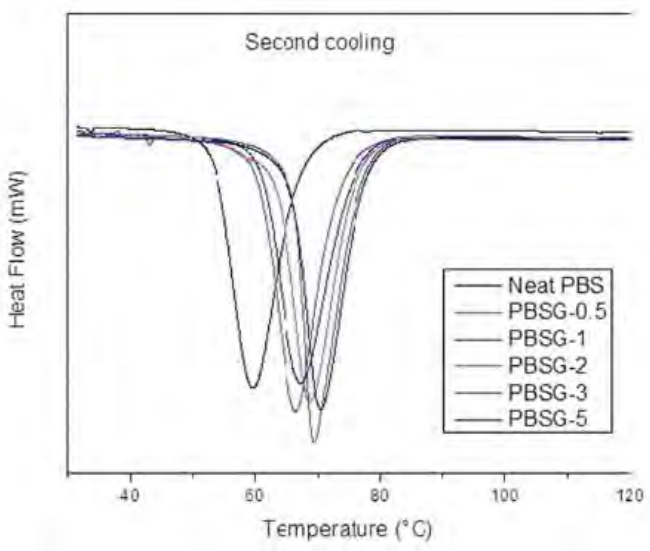
จากผลการทดลอง DSC ของ PBS บริสุทธิ์และ PBS ผสมกราฟีนนาโนคอมพอสิตแสดงในรูปที่ 5 DSC cooling thermo- grams ของ PBS บริสุทธิ์และกราฟีน นาโนคอมพอสิตวัดที่อัตราความเย็นที่ 10°C/min จุดยอดของการคายความร้อนแสดงถึงอุณหภูมิตกผลึกของ PBS ที่อุณหภูมิ 73°C และเพิ่มขึ้นที่ 77°C เมื่อมีการผสมกราฟีนซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมกราฟีนส่งผลให้ PBS เกิดผลึกได้เร็วขึ้น ซึ่งเป็นผลจาก heterogeneous nucleation อย่างไรก็ตาม PBS นาโนคอมพอสิตเมื่อเทียบกับ PBS บริสุทธิ์มี T_m ใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 111°C แสดงว่าไม่มีผลกระทบจากการเติมกราฟีน เนื่องจากขนาดผลึกที่เล็กและปริมาณการเติมต่ำ

ค่าเปอร์เซ็นความเป็นผลึกของตัวอย่างสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\chi_c(\%) = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_0} \times 100\%$$

โดย ΔH_m คือ melting enthalpy และ ΔH_0 คือ enthalpy ของผลึก PBS บริสุทธิ์ (200 J/g) จากตารางที่ 1 ปริมาณผลึกของ PBS ผสมกราฟีนนาโนคอมพอสิตลดลงหลังจากผสมกราฟีนอย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของ

ผลึกส่งผลต่อสมบัติเชิงกลน้อยมาก ดังนั้นการเสริมแรงของ PBS ผสมกราฟีนนาโนคอมพอสิตเกิดจากการกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์และอันตรกิริยาระหว่างผิวของนาโนกราฟีนและเนื้อพอลิเมอร์



รูปที่ 5 DSC cooling thermogram ของ PBS บริสุทธิ์และกราฟีนนาโนคอมพอสิต [1]

<u>ผลของสมบัติในเชิงไฟฟ้าของ PBS และ PBS/กราฟีน นาโนคอมพอสิต</u>

จากตารางที่ 2 แสดงการนำไฟฟ้าบนพื้นผิวของ PBS ผสมกราฟีนนาโนคอมพอสิตและการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของกราฟีนโดยค่าการนำไฟฟ้าของ PBS มีค่า 3.32×10^{-9} S/cm เมื่อเติมกราฟีน 5%wt มีค่า 2.05×10^{-3} S/cm เนื่องจากรูปแบบที่มีการเชื่อมต่อกันภายในเป็นเครือข่ายที่นำไฟฟ้าได้ของ กราฟีนที่อยู่ใน PBS

ตารางที่ 2 การนำไฟฟ้าของ PBS/กราฟีนนาโนคอมพอสิต[1]

Sample	Sheet resistance	Thickness (cm)	Resistivity	Conductivity (S/cm)
PBS	2.01E + 09	0.15	0.302	3.32 E-09
PBS/GNC1	1.38E + 09	0.14	0.194	5.16 E-09
PBS/GNC2	1.37E + 09	0.15	0.206	4.85 E-09
PBS/GNC5	3.25E + 03	0.15	0.488	2.05 E-03

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการเตรียม PBS นาโนคอมพอสิตด้วยแผ่นกราฟีนระดับนาโนด้วยวิธี melt mixing ผลจากภาพ TEM ยืนยันถึงการกระจายตัวของกราฟีนใน PBS ผลของ XRD แสดงให้เห็นถึงการเติมกราฟีนไม่ส่งผลต่อโครงสร้างของผลึก PBS อย่างไรก็ตามผล FTIR พบว่า PBS รูปแบบ β สามารถก่อตัวได้เมื่อมีการเติมนาโนคอมพอสิตที่ 5%wt ความเสถียรต่อความร้อนเพิ่มขึ้น 35°C การเติมนาโนคอมพอสิตที่ 1%wt ส่งผลปรับปรุงสมบัติเชิงความร้อน เชิงไฟฟ้า เชิงกลของนาโนคอมพอสิต

<u>เอกสารอ้างอิง</u>

[1] P.K. Pallathadka, X. Q. Koh, A. Khatta, G. E. Luckachan and V. Mittal (2017). Characteristics of Biodegradable Poly(butylene succinate) Nanocomposites With Thermally Reduced Graphene Nanosheets, *J. POLYM. COMPOS* , 38, (DOI 10.1002/pc.23824).