



การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโพลีเมอร์จากพอลิเมอร์ผสมของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิ
บิวทีลีนซีกซีเนต



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโพลีเมอร์ผสมของพอลิแลคติก
แอซิดและพอลิบิวทีลีนซักซีเนต



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF BIO - FOAM FROM POLYMER
BLENDS OF POLYLACTIC ACID AND POLYBUTYLENE SUCCINATE



By
MR. Wasutorn BUALUANG

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2020

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโพลิเมอร์ ผสมของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต
โดย	วสุธร บัวเหลือง
สาขาวิชา	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกุล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

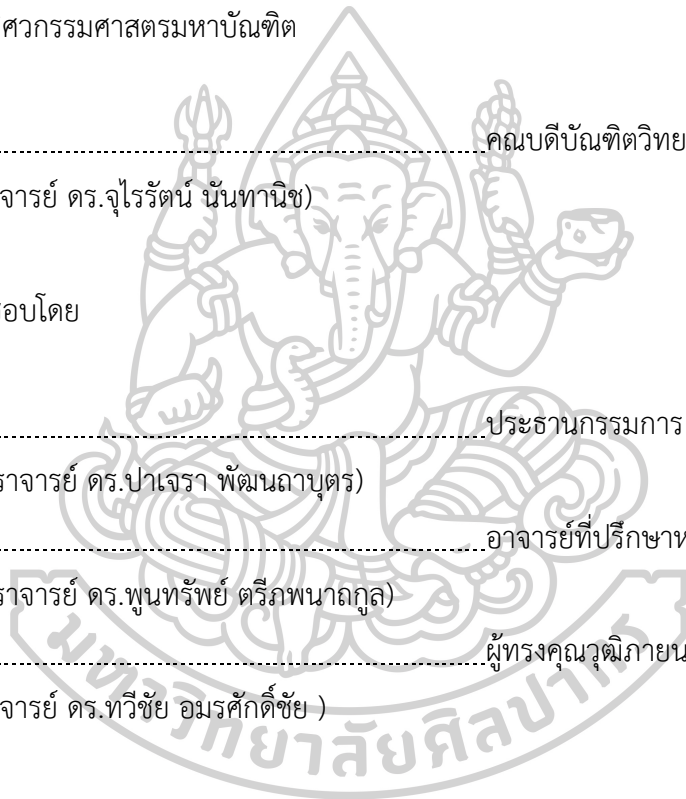
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนลาบุตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกุล)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย)



61402220 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

นาย วสุธร บัวเหลือง: การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโพลีเอทิลีนจากพอลิเมอร์ผสมของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซึกซีเนต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกุล

ปัจจุบันมีการใช้พลาสติกอย่างแพร่หลายโดยพลาสติกที่ใช้เป็นพลาสติกที่ใช้เวลาในการย่อยสลายนานซึ่งเป็นปัญหาของมลภาวะที่เกิดขึ้นกับโลกในยุคปัจจุบันโดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกจากบรรจุภัณฑ์อาหาร ทำให้ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้พอลิเมอร์สองชนิดได้แก่ พอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซึกซีเนต ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ โดยในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมโพลีเอทิลีนและโพลีคอมโพสิตระหว่าง พอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซึกซีเนตที่ส่งผลต่อ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อนและสมบัติการดูดซับน้ำซึ่งจะใช้ อะโซไคคาโบนามาไนด์เป็นสารเร่งฟู ซึ่งค็อกออกไซด์เป็นสารต้านเชื้อแบคทีเรียและพอลิเอทิลีนไกลคอลเป็นพลาสติกไฮดรอกซี โดยในส่วนแรกทำการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซึกซีเนตและในส่วนที่สองทำการเปลี่ยนปริมาณซิงค์ออกไซด์แล้วทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ สมบัติการดูดซับน้ำ สมบัติเชิงกล ลักษณะทางสัณฐานวิทยา เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ สมบัติทางความร้อนและสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย พบว่าโพลีเอทิลีนพอลิแลคติกแอซิดต่อพอลิบิวทีลีนซึกซีเนต ปริมาณ 80/20 โดยน้ำหนัก เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด โดยการพิสูจน์เอกลักษณ์ในด้านสมบัติเชิงกล สมบัติการดูดซับน้ำและสมบัติทางความร้อนดีกว่าโพลีเอทิลีนในสัดส่วนอื่น ๆ จึงนำไปศึกษาต่อในส่วนที่สอง พบว่าเมื่อปริมาณซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้สมบัติเชิงกล สมบัติการดูดซับน้ำลดลงเนื่องจากอิทธิพลของรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น สมบัติทางความร้อนไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญแต่สมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัดโดยโพลีคอมโพสิตแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้ดีกว่าโพลีเอทิลีนมากกว่า 60%

61402220 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

MR. WASUTORN BUALUANG : PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF BIO-FOAM FROM POLYMER BLENDS OF POLYLACTIC ACID AND POLYBUTYLENE SUCCINATE THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR POONSUB THREEPOP NATKUL, Ph.D.

Nowadays, plastics are widely used but they are non-biodegradable plastics which have been caused serious environmental pollutions due to the degradability issue, especially consumable food packaging. In this research, biodegradable materials i.e., Poly(lactic acid) (PLA) and Polybutylene succinate (PBS) are chosen for the study. The research aims to study and preparation bio-foam from polymer blends of Polylactic acid (PLA) and Polybutylene succinate (PBS) on the morphological properties, mechanical properties, thermal properties, and water absorption. PLA/PBS foam was prepared using Azodicarbonamide (ADC) as blowing agent, Zinc oxide (ZnO) as antibacterial agent, and Poly(ethylene glycol) (PEG) 20 wt% as plasticizer. First part, foam-ability of different ratio of PLA:PBS blend were investigated. Effect of ZnO content was studied on the properties of bio-composites foams in second part. PLA/PBS foams were characterized by water absorption, mechanical properties, scanning Electron Microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), thermal properties and antibacterial activities. It was found that PLA/PBS blend foam with weight ratio of PLA: PBS of 80/20 was the optimum proportion PLA/PBS blend foam by consideration of mechanical properties, water absorption and thermal properties which were better than another ratio and thus, this proportion was selected to study in PLA/PBS/ZnO composite foam. From the results, mechanical properties and water absorption increased with increasing ZnO content due to the influence of the larger porous structure. However, ZnO content had no significantly effect on thermal properties. However, PLA/PBS/ZnO composite foams could antibacterial resistance 60% higher than the one of PLA/PBS blend foam.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกุล และ อาจารย์ ดร.อำนาจ สิทธิัตตระกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้คอยให้คำปรึกษาและเสียสละเวลาในการชี้แนะแนวทางการวิจัย การวิเคราะห์ผลการวิจัย ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องอย่างถี่ถ้วน อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองวิจัยอีกด้วย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร และ รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย ที่ให้ข้อเสนอแนะ ตรวจสอบ แก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่คอยอบรมสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งปวง และขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากรที่ให้โอกาสในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ ทั้งการสนับสนุนด้านสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ ขอขอบคุณ คุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชา สำหรับการอำนวยความสะดวกทางด้านการจัดหาวัสดุอุปกรณ์และสารเคมี ขอขอบคุณคุณไพโรจน์ ตั้งศุภธวัช วิศวกรประจำภาควิชา สำหรับความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือและเครื่องจักรและขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชา สำหรับการอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานทุก ๆ ด้านจนกระทั่งงานวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอบคุณเพื่อน พี่ และน้อง นักศึกษาภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกคน สำหรับความห่วงใย ความมีน้ำใจและความช่วยเหลือตลอดมาสุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดาและมารดาที่คอยสนับสนุนด้านการเรียนคอยให้กำลังใจเสมอมาและสำหรับทุกสิ่งทุกอย่างที่มีให้อย่างไม่สิ้นสุดจนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

วสุธร บัวเหลือง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ (Introduction)	15
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	15
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	16
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	17
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	17
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Review of related literature).....	18
2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับ Polylactic acid (PLA)	18
2.2 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับ Polybutylene succinate (PBS).....	19
2.3 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับ Poly(ethylene glycol) (PEG).....	20
2.4 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับ Zinc Oxide (ZnO).....	21
2.5 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับโฟม.....	21
2.5.1 ความหมายของโฟม.....	21
2.5.2 การจำแนกประเภทของโฟม.....	22
2.5.3 กระบวนการการเกิดโฟม (Foam formation).....	24
2.6 สารเร่งฟู/สารก่อฟอง (Blowing agent).....	26

2.6.1	ขนาดของสารก่อฟอง.....	26
2.6.2	ชนิดของสารก่อฟอง	27
2.7	วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	31
3.1	วัสดุอุปกรณ์ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	31
3.1.1	วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	31
3.1.2	สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	31
3.1.3	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	32
3.1.4	เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน	32
3.2	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	32
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	42
4.1	การศึกษาผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBS ต่อสมบัติโฟมชีวภาพ PLA/PBS.....	42
4.1.1	ลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟมชีวภาพระหว่างพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS	42
4.1.2	การศึกษาโครงสร้างผลึกของโฟมชีวภาพระหว่าง PLA/PBS	48
4.1.3	การศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟมชีวภาพ PLA/PBS.....	51
4.1.4	การศึกษาสมบัติทางความร้อนของโฟมชีวภาพระหว่าง PLA/PBS	56
4.1.5	การศึกษาสมบัติการดูดซับของโฟมชีวภาพระหว่าง PLA/PBS	64
4.2	การศึกษาผลของสารเติมแต่ง ZnO ต่อสมบัติของโฟมคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO.....	67
4.2.1	ลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟมคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS/PEG/ZnO	67
4.2.2	การศึกษาโครงสร้างผลึกของโฟมคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO	71
4.2.3	การศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟมคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO	72
4.2.4	การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโฟมคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO	77

4.2.5 การศึกษาสมบัติการดูดซับของโพลีคอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS/ZnO	83
4.2.6 การศึกษาผลของปริมาณ ZnO ต่อสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO (Antibacteria Activity)	86
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	89
5.1 การศึกษาผลของอัตราส่วน PLA/PBS ต่อสมบัติของโพลีชีวภาพระหว่าง PLA/PBS	89
5.2 การศึกษาผลปริมาณการเติม ZnO ต่อสมบัติของโพลีคอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS/PEG	89
5.3 ข้อเสนอแนะ	89
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง.....	92
ภาคผนวก ข แสดงการคำนวณ.....	118
ภาคผนวก ค การนำเสนอผลงานวิจัย.....	125
รายการอ้างอิง.....	133
ประวัติผู้เขียน.....	139



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงสัดส่วนการผสมของโพลีเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS.....	43
ตารางที่ 4.2 แสดงค่า Melt flow index (MFI) ของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	45
ตารางที่ 4.3 แสดงความหนาแน่นของรูปทรงของโพลีเมอร์ระหว่างชีวภาพ PLA/PBS	48
ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณผลึกของโพลีเมอร์ระหว่าง PLA/PBS.....	49
ตารางที่ 4.5 แสดงค่า Flexural Young's Modulus ของโพลีเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS	51
ตารางที่ 4.6 แสดงค่า Flexural stress ของโพลีเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS	53
ตารางที่ 4.7 แสดงค่า Elongation at yield strength ของโพลีเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS	55
ตารางที่ 4.8 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของโพลีเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS.....	58
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าที่ได้จาก DSC thermogram ในขั้น First heating ของโพลีเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS ที่อัตราส่วนต่างกัน.....	60
ตารางที่ 4.10 แสดงค่าที่ได้จาก DSC thermogram ในขั้นการหลอมของโพลีเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS ที่อัตราส่วนต่างกัน.....	62
ตารางที่ 4.11 แสดงค่าการดูดซับของน้ำของโพลีเมอร์ระหว่าง PLA/PBS.....	65
ตารางที่ 4.12 แสดงค่า Contact angle ของน้ำของโพลีเมอร์ระหว่าง PLA/PBS.....	66
ตารางที่ 4.13 แสดงอัตราส่วนผสมของโพลีเมอร์คอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO	67
ตารางที่ 4.14 แสดงค่า Melt flow index (MFI) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตในอัตราส่วนต่าง ๆ.....	69
ตารางที่ 4.15 แสดงปริมาณผลึกของโพลีเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS/ZnO.....	72
ตารางที่ 4.16 แสดงค่า Flexural Modulus ของโพลีเมอร์คอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO	73
ตารางที่ 4.17 แสดงค่า Flexural Stress ของโพลีเมอร์คอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO	75
ตารางที่ 4.18 แสดงค่า Elongation at yield strength ของโพลีเมอร์คอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO	75
ตารางที่ 4.19 แสดงค่าที่ได้จาก DSC thermogram ในขั้น First heating ของโพลีเมอร์คอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO ที่อัตราส่วนต่างกัน.....	80

ตารางที่ 4.20 แสดงค่าที่ได้จาก DSC thermogram ในขั้นตอนการหล่อเย็นของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO ที่อัตราส่วนต่างกัน..... 81

ตารางที่ 4.21 แสดงค่าการดูดซับของน้ำของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO 84

ตารางที่ 4.22 แสดงค่า Contact angle ของน้ำบนพื้นผิวของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS//PEG/ZnO 85

ตารางที่ 4.23 แสดงจำนวนโคโลนีต่อมิลลิลิตรและเปอร์เซ็นต์การต้านทานเชื้อแบคทีเรียของโพลีคอมโพสิตของแบคทีเรียชนิด E.coli..... 87

ตารางที่ 4.24 แสดงจำนวนโคโลนีต่อมิลลิลิตรและเปอร์เซ็นต์การต้านทานเชื้อแบคทีเรียของโพลีคอมโพสิตของแบคทีเรียชนิด S.aureus..... 87



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงการสังเคราะห์ Poly(lactic acid) [4].....	18
รูปที่ 2.2 กระบวนการเตรียมมอนอเมอร์ตั้งต้นจากกระบวนการหมักวัตถุดิบจากธรรมชาติ[5]	19
รูปที่ 2.3 แสดงปฏิกิริยาการสร้าง PBS Oligomer[5]	19
รูปที่ 2.4 แสดงการสังเคราะห์ Oligomer ของ PBS โดยวิธี trans-esterification[5].....	20
รูปที่ 2.5 แสดงสัณฐานโครงสร้างของโฟม (ก) เซลล์เปิด (ข) เซลล์ปิด[8].....	22
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างสัณฐานของโฟมบางชนิด (ก) ชนิดยืดหยุ่น (ข) ชนิดแข็ง[8]	23
รูปที่ 2.7 แผนภาพขั้นตอนระหว่างกระบวนการเกิดโฟม[8].....	26
รูปที่ 2.8 แสดงปฏิกิริยาการแตกตัวของ Azodicarbonamide[9]	27
รูปที่ 3.1 แสดงแผนภูมิการเตรียมโฟมชีวภาพ PLA/PBS/PEG.....	34
รูปที่ 3.2 แสดงแผนภูมิการเตรียมชิ้นงานทดสอบและการพิสูจน์เอกลักษณ์.....	35
รูปที่ 3.3 แสดงแผนภูมิการเตรียม PLA/PBS/PEG composite foam.....	41
รูปที่ 4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมชีวภาพระหว่าง PLA/PBS โดยใช้กำลังขยาย 120x.....	44
รูปที่ 4.2 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบขนาดของรูพรุนของโฟมระหว่าง PLA/PBS.....	46
รูปที่ 4.3 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบปริมาณรูพรุนของโฟมระหว่าง PLA/PBS.....	47
รูปที่ 4.4 XRD patterns ของโฟมชีวภาพระหว่าง PLA/PBS.....	50
รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Young's modulus ของโฟมชีวภาพ PLA/PBS	53
รูปที่ 4.6 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Flexural stress ของโฟมชีวภาพ PLA/PBS	54
รูปที่ 4.7 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Elongation at yield strength ของโฟมชีวภาพ PLA/PBS	56
รูปที่ 4.8 TGA thermogram ของโฟมชีวภาพที่สัดส่วนของ PLA/PBS แตกต่างกัน	57
รูปที่ 4.9 กราฟแสดง Differential scanning calorimetry (DSC) ของโฟมชีวภาพ PLA/PBS ใน การให้ความร้อนขั้นที่ 1 (First heating).....	59

รูปที่ 4.10 กราฟแสดง Differential scanning calorimetry (DSC) ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ใน ขั้นตอนหล่อเย็น (Cooling).....	61
รูปที่ 4.11 กราฟแสดง Differential scanning calorimetry (DSC) ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ใน การให้ความร้อนครั้งที่ 2 (Second heating).....	63
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับของโพลีชีวภาพระหว่าง PLA/PBS.....	64
รูปที่ 4.13 แสดงค่าการวัดมุมบนพื้นผิวของโพลีชีวภาพ PLA/PBS.....	66
รูปที่ 4.14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพลีคอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS/PEG/ZnO โดยเปลี่ยน ปริมาณของ ZnO a) 0phr b) 1phr c) 3phr d) 5phr e) 7phr กำลังขยาย 120x และ f) 0phr g) 1phr h) 3phr i) 5phr j) 7phr กำลังขยาย 2000x.....	68
รูปที่ 4.15 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบขนาดของรูพรุนของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO	69
รูปที่ 4.16 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบปริมาณรูพรุนของโพลีคอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS/PEG/ZnO	70
รูปที่ 4.17 XRD patterns ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO.....	71
รูปที่ 4.18 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Flexural modulus ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO.....	73
รูปที่ 4.19 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Flexural stress ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO	74
รูปที่ 4.20 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Flexural strain ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO	76
รูปที่ 4.21 TGA thermogram ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO ที่ปริมาณของ ZnO แตกต่างกัน.....	77
รูปที่ 4.22 กราฟแสดง Differential scanning calorimetry (DSC) ของโพลีชีวภาพในการให้ความ ร้อนครั้งที่ 1 (First heating).....	79
รูปที่ 4.23 กราฟ Differential scanning calorimetry (DSC) ของโพลีคอมโพสิตในขั้นหล่อเย็น ..	81
รูปที่ 4.24 กราฟแสดง Differential scanning calorimetry (DSC) ของโพลีคอมโพสิตในการให้ ความร้อนครั้งที่ 2 (Second heating)	82

- รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับของโพลีคอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS/PEG/ZnO83
- รูปที่ 4.26 แสดงการวัดค่า Contact angle [47]..... 85
- รูปที่ 4.27 การเข้าทำปฏิกิริยาของอนุภาคซิงค์ออกไซด์กับแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ [48].. 86
- รูปที่ 4.28 แสดงปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยแสง (บน) และปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยความร้อน (ล่าง).... 88



บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์พลาสติกได้ถูกพัฒนาและปรับปรุงให้มีการใช้งานที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่นำไปใช้งานมากขึ้นซึ่งบรรจุภัณฑ์ที่เห็นได้ทั่วไปตามท้องตลาดเช่น กล่องโฟม ภาชนะใส่อาหารหรือรวมไปถึงภาชนะโฟมที่ใช้ใส่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของสด ได้ถูกพัฒนาและปรับปรุงให้มีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานมากขึ้น แต่โดยทั่วไปแล้วการปรับปรุงและพัฒนาสมบัติของบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวนั้นยังคงมุ่งเน้นไปทางการลดมลพิษให้กับโลก โดยในงานวิจัยนี้จะพัฒนาคุณสมบัติของบรรจุภัณฑ์ให้มีการใช้งานที่หลากหลายมากขึ้นโดยจะมุ่งเน้นไปที่บรรจุภัณฑ์ที่ใช้งานในด้านการเก็บอาหารสดหรืออาหารจำพวกที่มีของเหลวออกมาขณะอยู่ในบรรจุภัณฑ์แล้ว ซึ่งบรรจุภัณฑ์ที่จะพัฒนาในงานวิจัยนี้คาดหวังให้สามารถขึ้นรูปโฟมชีวภาพและโฟมคอมโพสิตโดยกระบวนการผลิตที่ง่ายกว่าและต้นทุนต่ำกว่าในภาคอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ยังคงคำนึงถึงความปลอดภัยในด้านมลพิษด้วยเช่นกัน โดยในช่วงหลายปีที่ผ่านมาอุตสาหกรรมพลาสติกมีการชะลอตัวลงอย่างมากเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงด้านประชากรและวิถีชีวิต รวมถึงบรรจุภัณฑ์พื้นฐาน เช่น ถุงหูหิ้ว หลอดพลาสติกที่มีแนวโน้มถูกใช้งานน้อยลงจากกระแสรักษ์โลกและการรณรงค์ของภาครัฐและภาคเอกชน จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะนำนวัตกรรมมาช่วยสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับบรรจุภัณฑ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้พลาสติกชีวภาพมาในการขึ้นรูปเป็นโฟมโดยพลาสติกชีวภาพที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ พอลิแลคติกแอซิด ซึ่งพอลิแลคติกแอซิดเป็นพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่ผลิตจากวัตถุดิบทางธรรมชาติซึ่งในปัจจุบันโพลีแลคติกแอซิดมีฐานการผลิตที่แพร่หลายไปทั่วโลกสามารถหาซื้อได้ง่ายแต่อย่างไรก็ตามพอลิแลคติกแอซิดนั้นยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องของราคาอยู่หากการขึ้นรูปโดยใช้พอลิแลคติกแอซิดเพียงอย่างเดียวนั้นต้นทุนในการผลิตจะสูงซึ่งอาจทำให้ผู้บริโภคไม่ให้ความสนใจกับบรรจุภัณฑ์ชนิดนี้ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดต้นทุนของบรรจุภัณฑ์ลง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะหาวัสดุทางชีวภาพอีกชนิดหนึ่งเพื่อนำมาทำเป็นวัสดุคอมโพสิตโดยวัสดุที่จะนำมาพร้อมกับพอลิแลคติกแอซิดเพื่อลดต้นทุนของบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวคือ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ซึ่งเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเช่นเดียวกับพอลิแลคติกแอซิดแต่ไม่สามารถผลิตจากวัตถุดิบทางธรรมชาติได้ โดยพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมีราคาถูกกว่าโพลีแลคติกแอซิด อีกทั้งพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตยังมีสมบัติในเรื่องของการยืดหยุ่นที่ดีและมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าพอลิแลคติกแอซิด[1] ซึ่งการขึ้นรูปเป็นโฟมนั้นสมบัติในเรื่องความยืดหยุ่นก็เป็นสิ่งสำคัญเช่นกันดังนั้นการเลือกพอลิบิวทิลีนซัคซิ

เนตมาใช้เป็นวัสดุคอมโพสิตถือเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ แต่เนื่องจากสมบัติในเรื่องความยืดหยุ่นจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงซึ่งบรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรมวัสดุเหล่านี้จำเป็นต้องรับน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ให้ได้เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ด้วยเหตุนี้เองการมองหาสารเติมแต่งเพื่อไปทดแทนสมบัติเชิงกลที่หายไปนั้นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอีกเช่นกัน ซึ่งแนวโน้มและมุมมองใหม่ในด้านนาโนเทคโนโลยีช่วยให้เส้นทางการใช้อนุภาคนาโนในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น ปัจจุบันอนุภาคนาโนถูกนำไปใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการทำงานของฟิล์มในหลาย ๆ งานวิจัยเนื่องจาก ฉื่อยต่อปฏิกิริยา ไม่เป็นพิษ อีกทั้งยังราคาไม่แพง[2] โดยสารเติมแต่งที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือซิงค์ออกไซด์ โดยซิงค์ออกไซด์ไม่เพียงแต่ช่วยในเรื่องการพัฒนาสมบัติเชิงกลแต่ยังช่วยในเรื่องของเสถียรภาพทางความร้อนรวมถึงช่วยปรับโครงสร้างรูพรุนของโพนให้มีความหนาแน่นทั่วทั้งโครงสร้างด้วยเหตุผลดังกล่าวการเลือกซิงค์ออกไซด์มาเป็นสารเติมแต่งในงานวิจัยนี้จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่เหมาะสม ซึ่งจากที่ได้กล่าวมาในข้างต้นนั้นเป็นเพียงการเตรียมวัสดุเพื่อที่จะนำไปขึ้นรูปเป็นโพนเท่านั้นการขึ้นรูปเป็นโพนได้จำเป็นต้องมีสารเร่งฟูซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ อะโซไดคาร์บอเนต เนื่องจากอุณหภูมิหลอมเหลวของสารเร่งฟูดังกล่าวที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งหากเลือกสารเร่งฟูที่มีอุณหภูมิลดลงอยู่ในช่วงเดียวกันกับวัสดุคอมโพสิตจะทำให้ในระหว่างกระบวนการผสมสารเร่งฟูอาจเกิดการแตกตัว[3] กลายเป็นแก๊สแล้วทำให้เกิดโพนในชั้นในชั้นตอนนี้ซึ่งโพนที่เกิดขึ้นนั้นจะไม่ใช้โพนของวัสดุคอมโพสิตที่สมบูรณ์เนื่องจากพอลิเมอร์ที่นำมานั้นยังไม่ถูกทำให้ผสมเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องเลือกสารเร่งฟูที่อุณหภูมิการแตกตัวที่สูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ขณะทำการผสมพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด โดยภาพรวมของงานวิจัยนี้คาดหวังที่จะสามารถขึ้นรูปโพนชีวภาพและโพนคอมโพสิตด้วยกระบวนการที่ง่ายและต้นทุนต่ำกว่าการขึ้นรูปในระดับอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง พอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต ที่ส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อนและสมบัติการดูดซับน้ำของโพนชีวภาพระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต
2. เพื่อศึกษาผลของการเติมซิงค์ออกไซด์ของโพนคอมโพสิตระหว่าง พอลิแลคติกแอซิด, พอลิบิวทีลีนซัคซิเนตและซิงค์ออกไซด์ที่ส่งผลต่อ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติการดูดซับน้ำและสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียของโพนคอมโพสิตระหว่างพอลิแลคติกแอซิด, พอลิบิวทีลีนซัคซิเนตและซิงค์ออกไซด์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซีเนตและผลของการเติมซิงค์ออกไซด์ที่ส่งผลต่อ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติการดูดซับน้ำและสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียของโพลีชีวภาพ PLA/PBS และ โพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO

1. เม็ดพลาสติก Poly(lactic acid) (PLA) ชื่อทางการค้า Ingeo™ Biopolymer เกรด 8052D มีค่าดัชนีการไหล (Melt flow index) อยู่ในช่วง 3.3 g/ 10 นาที จุดหลอมเหลวในช่วง 145 - 160 °C
2. Zinc Oxide (ZnO) ลักษณะเป็นผงสีขาว ความหนาแน่น 1.7 กรัมต่อมิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาคมากกว่า 100 นาโนเมตร
3. เม็ดพลาสติก Poly(butylene succinate) (PBS) ชื่อทางการค้า BioPBS™ เกรด FD92PM / FD92PB ความหนาแน่น 1.24 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าดัชนีการไหล (Melt flow index) 4 กรัม/10 นาที อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการอยู่ในช่วง 130 – 150 องศาเซลเซียส
4. เม็ดพลาสติก Poly(ethylene glycol) (PEG) น้ำหนักโมเลกุล 8000 ลักษณะทางกายภาพของสารเคมีเป็นผง ความหนาแน่น 1.0845 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อุณหภูมิในการย่อยสลาย 305 องศาเซลเซียส
5. Azodicarbonamide (ADC) ลักษณะทางกายภาพของสารเคมีเป็นผง อุณหภูมิที่เกิดการแตกตัวอยู่ที่ 200 – 210 องศาเซลเซียส

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

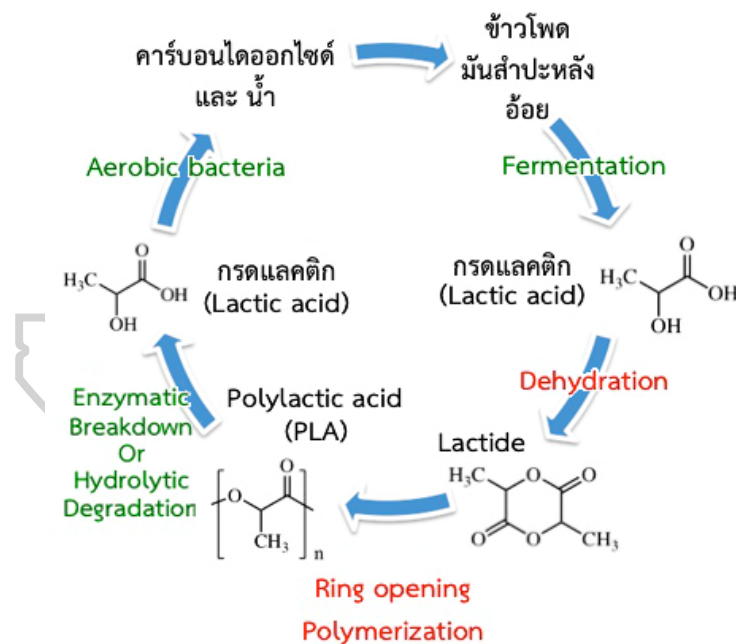
1. สามารถขึ้นรูปโพลีชีวภาพและโพลีคอมโพสิตระหว่าง พอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซีเนตด้วยกระบวนการที่ง่ายกว่าและประหยัดต้นทุนมากกว่าในภาคอุตสาหกรรม
2. สามารถหาปริมาณการผสมพอลิเมอร์ชีวภาพและพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโพลีชีวภาพ PLA/PBS และโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปได้
3. ได้ทราบถึงสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการดูดซับน้ำและสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของโพลีชีวภาพ PLA/PBS และ โพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO
4. สามารถปรับปรุงสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของโพลีคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซัคซีเนตให้มีเปอร์เซ็นต์การต้านทานเชื้อแบคทีเรียมากกว่า 50%

บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Review of related literature)

2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับ Polylactic acid (PLA)

Polylactic acid (PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) สามารถย่อยสลายได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติภายหลังจากการใช้งานผลิตมาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (Renewable resource) เช่น ผลิตมาจากพืช เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น โดยการบดหรือโม้พืชนั้นให้ละเอียดเป็นแป้งแล้วใช้เอนไซม์ย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลกลูโคสโดยผ่านกระบวนการหมัก (Fermentation) โดยใช้แบคทีเรีย *Lactobacillus brevis* ได้ผลผลิตเป็นกรดแลคติก (Lactic acid) ผ่านกระบวนการทางเคมีได้เป็น lactide มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนแล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) กลับในระบบสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างได้เป็นพอลิเมอร์



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงการสังเคราะห์ Poly(lactic acid) [4]

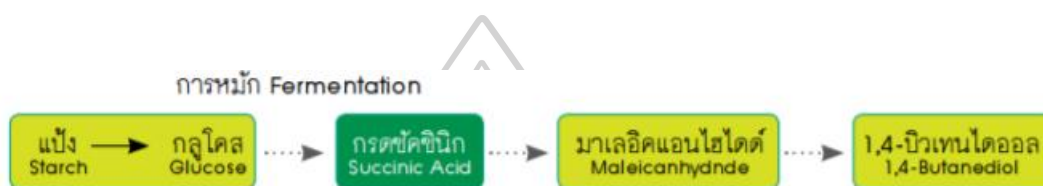
คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

Poly(lactic acid) มีช่วงการหลอมเหลว (Melting range) 145 – 160 °C แต่อย่างไรก็ตามทนความร้อนได้ไม่เกิน 110 °C มีปริมาณความเป็นผลึก (Crystallinity) ประมาณ 37% และอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) อยู่ระหว่าง 60-65 °C มีสมบัติขวางกั้น (Barrier properties) ดีเข้ากับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (Biocompatibility) คุณสมบัติพิเศษคือ

มีความใส ไม่ย่อยสลายในสภาพแวดล้อมทั่วไป แต่สามารถย่อยสลายได้เอง เมื่อนำไปฝังกลบในดินขึ้น สามารถทำได้ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกทั่วไป เช่น กระบวนการการอัดรีด (Extrusion) กระบวนการฉีด (Injection molding) เป็นต้น[4]

2.2 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับ Polybutylene succinate (PBS)

พอลิบูทีลีนเป็นพอลิเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation polymerization) ระหว่างกรดซัคซินิกและ 1,4-บิวเทนไดออล ซึ่งมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดนี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถผลิตขึ้นได้จากทั้งแหล่งปิโตร เคมีหรืออาศัยวัตถุดิบจากธรรมชาติก็ได้

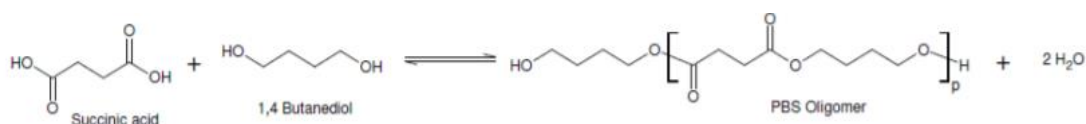


รูปที่ 2.2 กระบวนการเตรียมมอนอเมอร์ตั้งต้นจากกระบวนการหมักวัตถุดิบจากธรรมชาติ[5]

PBS มีชื่อทางการค้า ได้แก่ Bionolle ผลิตโดยบริษัท Showa Denko และ GsPLA ผลิตโดยบริษัท Mitsubishi Chemical หน่วยซ้ำของ PBS คือ $C_8H_{12}O_4$ และสามารถสังเคราะห์ได้โดยอาศัย 2 แนวทางหลัก ได้แก่

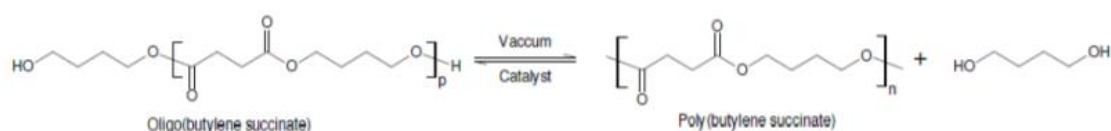
1. กระบวนการ Trans-esterification โดยอาศัยซัคซิเนตไดเอสเทอร์ (Succinate diesters) เป็นมอนอเมอร์
2. กระบวนการ Direct esterification โดยอาศัยกรดซัคซินิกและ 1,4-บิวเทนไดออล ตามที่ได้กล่าวไปข้างต้น ซึ่งเป็น วิธีทั่วไปที่ใช้ในการผลิตเรซิน PBS ที่ประกอบด้วย 2 ชั้นตอนย่อย ดังต่อไปนี้

2.1 การเตรียมโอลิโกเมอร์ของ PBS (PBS oligomers) โดยการเติม 1,4-บิวเทนไดออลมากเกินไปในการทำปฏิกิริยากับไดแอซิด (กรดซัคซินิก) และกำจัดน้ำออกจากระบบเพื่อเร่งปฏิกิริยาในการสร้างโอลิโกเมอร์



รูปที่ 2.3 แสดงปฏิกิริยาการสร้าง PBS Oligomer[5]

2.2 การ trans-esterification ของ PBS oligomer ภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อให้ได้ PBS ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งในขั้นตอนนี้จำเป็นต้องอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) อาทิเช่น อนุพันธ์ของไทเทเนียม เซอโคเนียม สังกะสีหรือเจอร์เมเนียม เป็นต้น



รูปที่ 2.4 แสดงการสังเคราะห์ Oligomer ของ PBS โดยวิธี trans-esterification[5]

สมบัติของ PBS เป็นเทอร์โมพลาสติกสีขาว มีความหนาแน่น 1.23 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับ PLA ซึ่ง PBS มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า PLA มาก แต่ต่ำกว่า PHBV และมี T_g ที่ต่ำมาก โดยทั่วไปแล้ว PBS มีสมบัติเชิงกลสูง และทนความร้อนได้ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยไม่เสียสภาพ อีกทั้งสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์และยังย่อยสลายได้ดีอีกด้วยนอกจากนี้ PBS ยังสามารถนำมาผสมกับแป้งเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกล (Mechanical properties) ได้แต่คุณสมบัติดังกล่าวยังมีค่าต่ำกว่าพอลิเอสเทอร์

การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของ PBS เกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการ Hydro-degradable เริ่มจากการย่อยสลายทางชีวภาพโดยผ่านกลไกของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งเกิดขึ้นที่พันธะเอสเทอร์ ซึ่งส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของ PBS ลดลง และสามารถเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ต่อไป มีงานวิจัยระบุว่า แผ่นฟิล์ม PBS ที่มีความหนา 40 ไมครอน สามารถถูกย่อยสลายได้ถึงร้อยละ 50 ภายใน 1 เดือนในดินที่ใช้เพาะปลูกทั่วไป[5]

2.3 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับ Poly(ethylene glycol) (PEG)

PEG หรือ Polyethylene glycol เป็นสารเคมีสังเคราะห์ เนื่องจากสมบัติที่ดี เช่น มีความชอบน้ำสูง ทำให้สามารถนำไปผสมกับสารอื่น ๆ ให้เพิ่มความชอบน้ำได้ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่เกิดจากสารประกอบดังกล่าว เช่น เครื่องสำอาง ครีม โลชั่น โดย PEG เองมีหลายชนิดแตกต่างกันไปตามน้ำหนัก เช่น PEG200, PEG300, PEG400 และ PEG600 เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลน้อยทำให้ลักษณะของมันเป็นจะใส เปรียบเทียบกับ PEG3350, PEG4500 และ PEG8000 ซึ่งมีลักษณะขุ่นคล้ายแว็กซ์ น้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลทำให้คุณสมบัติ เช่น ความสามารถในการละลายน้ำ การดูดความชื้น จุดเยือกแข็ง เปลี่ยนแปลงไปด้วย และด้วยความสามารถในการละลาย (Solubility) และ

การเข้ากันได้ (Compatibility) ที่หลากหลายทำให้มีการนำ PEG เข้ามาใช้ในการเตรียมยาและเครื่องสำอางในหลาย ๆ สูตรตำรับ

Polyethylene glycol นั้นพบว่าเป็นพิษต่ำ และมีการนำมาผลิตยาหลายชนิดในทางการแพทย์ เช่น มีการนำ PEG 3350 มาทำเป็นยาระบาย หรือมีการเพิ่ม electrolyte เข้าไปใน PEG เพื่อนำมาเตรียมคนไข้โดยการล้างลำไส้ก่อนเข้าผ่าตัด นอกจากนี้ยังนำมาใช้เพื่อทำให้ยาอยู่ในร่างกายนานขึ้น เช่น PEG-interferon alpha ที่นำมาใช้รักษา hepatitis C เป็นต้น[6]

2.4 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับ Zinc Oxide (ZnO)

ซิงค์ ออกไซด์ (Zinc oxide หรือ ZnO) เป็นสารอนินทรีย์มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ ZnO มนุษย์นำไปใช้ประโยชน์หลายด้านเช่นเป็นส่วนผสมในกระบวนการผลิตยาง พลาสติก เซรามิก แก้ว ซีเมนต์ สารหล่อลื่น กาว ฯลฯ สำหรับทางด้านยา ซิงค์ ออกไซด์จะใช้เป็นส่วนผสมในสูตรตำรับยาทาภายนอก/ยาใช้ภายนอกเช่น คาลาไมน์โลชั่น(Calamine lotion) ผสมในแป้งเด็ก ครีมทาแก้ผื่นผ้าอ้อม แชมพูสระผมกันรังแคหรือซีฟิงท์ทายับยั้งเชื้อโรคปัจจุบันมีการผลิตนาโนซิงค์ ออกไซด์ และใช้เป็นส่วนผสมของสูตรตำรับยา Ciprofloxacin โดยระบุสรรพคุณช่วยให้ Ciprofloxacin ออกฤทธิ์ได้ดีมากยิ่งขึ้น

ซิงค์ออกไซด์ได้ถูกบรรจุลงในบัญชียาหลักแห่งชาติของไทยโดยระบุการใช้เป็นส่วนประกอบของยาที่ทำให้ผิวหนังชุ่มชื้น และใช้เป็นยาเตรียมสำหรับงานทางทันตกรรม ด้วยมีรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายที่จำหน่ายตามร้านขายยาก่อนการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ยาซิงค์ออกไซด์ ผู้บริโภคสามารถขอคำแนะนำจากแพทย์หรือเภสัชกรเพื่อการเลือกใช้ยาได้อย่างเหมาะสม[7]

2.5 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับโฟม

2.5.1 ความหมายของโฟม

โฟมพลาสติก (Plastic foam) หรือเรียกกันในชื่อเรียกอื่น ๆ เช่น เซลล์ลูลาร์พอลิเมอร์ (Cellular polymer) และเอกซ์แพนเด็ดพลาสติก (Expanded plastic) หมายถึง พลาสติกที่มีโพรงก๊าซเล็ก ๆ จำนวนมากกระจายอยู่ในเนื้อ ในการผลิตจะใช้สารฟู (Blowing agent) ทำให้พลาสติกเกิดการขยายตัวและลดความหนาแน่นโดยรวมลง โฟมจึงมีน้ำหนักเบาและมีลักษณะคล้ายกับฟองน้ำธรรมชาติโดยมีได้ตั้งแต่โฟมชนิดแข็งไปจนถึงชนิดยืดหยุ่นทั้งนี้ในบางกรณีเนื้อโฟมอาจมีสารอื่นเติมลงไป เช่น สารเสริมแรง (Reinforcing agent) เช่น เส้นใย (Fiber) หรือสารตัวเติม (Fillers) เช่น อะโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azodicarbonamide) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เม็ดแก้ว (Glass microsphere) และแป้ง (starch) ต่าง ๆ เป็นต้น

โฟม หมายถึง พลาสติกที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยมีการเติมสารเร่งฟู (Blowing agent) ซึ่งด้วยกระบวนการทางเคมีทำให้พลาสติกดังกล่าวนั้นกลายเป็นโฟม โดยการนำเม็ดพลาสติกที่ต่าง

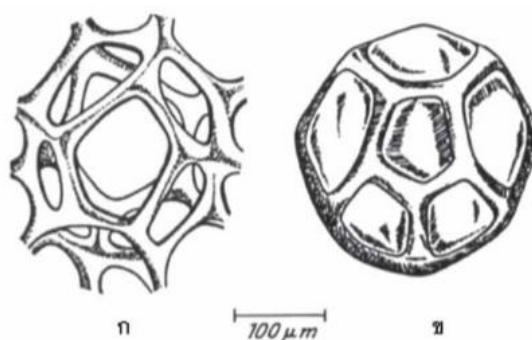
ชนิดกันมาขึ้นรูปก็ได้โฟมที่ต่างชนิดกันหรือหากต้องการปรับปรุงคุณสมบัติของโฟมก็สามารถทำได้โดยการทำเป็นพอลิเมอร์คอมโพสิตซึ่งปัจจุบันได้มีนักวิจัยหลายคนเข้ามาศึกษางานในส่วนนี้

2.5.2 การจำแนกประเภทของโฟม

1. ประเภทของโฟมจำแนกตามลักษณะของเซลล์

1.1) โฟมเซลล์เปิด (Open-Cell Foam) เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันระหว่างเซลล์ซึ่งก๊าซ สามารถผ่านจากเซลล์หนึ่งไปยังเซลล์อื่น ๆ ได้ภายใต้การกระทำของแรงขับเคลื่อนแสดงในรูปที่ 1(ก) โดยทั่วไปโฟมเซลล์เปิดจะเตรียมจากเทคนิคความดันต่ำ (Low-pressure technique) ภายใต้ภาวะบรรยากาศ โฟมที่มีสัณฐานโครงสร้างแบบนี้มีสมบัติยืดหยุ่นทำให้เหมาะในการใช้ทาเบาะนั่งในรถยนต์ บรรจุก๊าซและวัสดุกันกระแทก

1.2) โฟมเซลล์ปิด (Closed-Cell Foam) สัณฐานโครงสร้างของเซลล์จะประกอบด้วยเยื่อบาง ๆ เรียกว่าหน้าต่างเซลล์ ทำให้ก๊าซไม่สามารถผ่านไปมาระหว่างเซลล์ได้ แต่การเคลื่อนที่ของก๊าซจะกระทำโดยการแพร่ผ่านผนังเซลล์โดยปกติโฟมเซลล์ปิดจะเตรียมโดยใช้เทคนิคความดันสูง (High-pressure technique) และโฟมแบบนี้จะแข็งและเหมาะในการนำไปใช้งานเป็นฉนวนความร้อน ทุ่นลอย หรือใช้ในเสื้อชูชีพ เป็นต้น ในทางปฏิบัติโครงสร้างของเซลล์ทั้ง 2 ชนิดจะอยู่ร่วมกัน กล่าวคือไม่มีโฟมใดเป็นโฟมเซลล์เปิดหรือโฟมเซลล์ปิดโดยสมบูรณ์ ความแตกต่างระหว่างโฟมเซลล์เปิดและโฟมเซลล์ปิดจะอยู่ที่โฟมเซลล์เปิดจะประกอบกันด้วยโครงสร้างเป็นแกนลักษณะคล้ายเสาค้ำ (Strut) ขณะที่โฟมเซลล์ปิดจะมีหน้าต่าง (Window) หรือเยื่อบาง ๆ (Membrane) เชื่อมปิดระหว่างแกน พฤติกรรมเชิงกลของระบบขึ้นอยู่กับสัดส่วนของเซลล์เปิดต่อเซลล์ปิด เช่น ถ้าโฟมมีสัดส่วนของเซลล์ปิดที่สูงจะทำให้โฟมมีความแข็งตึง (Stiffness) และความแข็งแรง (Strength) สูง



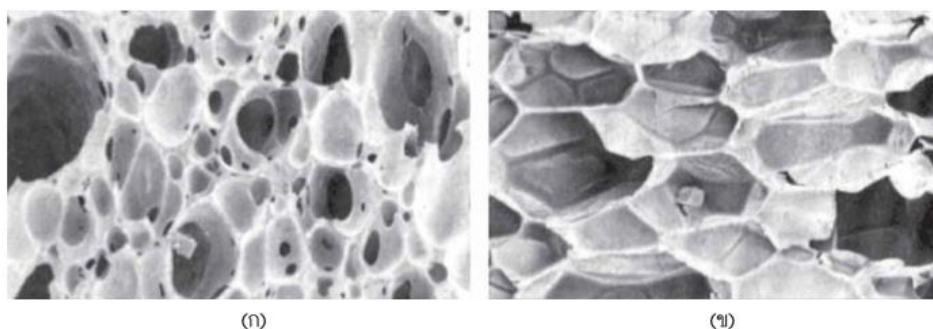
รูปที่ 2.5 แสดงสัณฐานโครงสร้างของโฟม (ก) เซลล์เปิด (ข) เซลล์ปิด[8]

2. ประเภทของโฟมจำแนกตามลักษณะทางกายภาพ

2.1) โฟมยืดหยุ่น (Flexible Foam) โฟมชนิดนี้พอลิเมอร์เมทริกซ์จะมีอุณหภูมิสภาพแก้ว (Glass transition temperature: T_g) ที่ต่ำ มีลักษณะอ่อนนุ่มยืดหยุ่นและคืนตัวเมื่อถูกกดได้ง่าย เช่น โฟมยาง (Elastomeric foam) โฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ชนิดมีสารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticized Polyvinyl Chloride, PPVC) และโฟมพอลิยูรีเทนยืดหยุ่น (Polyurethane Elastomer) เป็นต้น

2.2) โฟมชนิดแข็ง (Rigid Foam) โฟมชนิดนี้พอลิเมอร์เมทริกซ์จะอยู่ในสถานะผลึก (Crystalline state) หรือถ้าอยู่ในสถานะอสัณฐาน (Amorphous state) จะมีอุณหภูมิสภาพแก้วที่สูงมีลักษณะที่แข็งไม่คืนตัวเมื่อถูกกดหรือบีบเช่น โฟมพอลิโอเลฟิน (Polyolefin foam) โฟมพอลิสไตรีน (Polystyrene foam) โฟมพอลิคาร์บอนเนต (Polycarbonate foam) โฟมฟีนอลิก (Phenolic foam) และโฟมพอลิยูรีเทนชนิดแข็ง (Rigid polyurethane foam) เป็นต้น

2.3) โฟมชนิดกึ่งแข็ง (Semi-Rigid Foam) มีลักษณะอยู่ระหว่างโฟมชนิดแข็งและชนิดยืดหยุ่น กล่าวคือโฟมชนิดนี้จะมีมอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) ที่สูงกว่าโฟมชนิดยืดหยุ่นแต่มีพฤติกรรมที่ความเค้นความเครียด (Stress-strain behavior) คล้ายกับโฟมชนิดยืดหยุ่นมากกว่าโฟมชนิดแข็ง



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างสัณฐานของโฟมบางชนิด (ก) ชนิดยืดหยุ่น (ข) ชนิดแข็ง[8]

3. ประเภทของโฟมจำแนกตามประเภทของพลาสติก

3.1) โฟมเทอร์โมเซต (Thermoset Foam) เป็นโฟมพลาสติกที่เตรียมจากพลาสติกประเภทเทอร์โมเซต จึงสามารถนำกลับมาใช้หรือรีไซเคิลได้ยากเพราะต้องอาศัยการรีไซเคิลด้วยกระบวนการทางเคมีที่ซับซ้อน โฟมชนิดนี้ที่รู้จักกันดี ได้แก่ โฟมพอลิยูรีเทน โฟมอีพอกซี โฟมฟีนอลิก เป็นต้น

3.2) โฟมเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Foam) โฟมประเภทนี้สามารถนำกลับมาใช้หรือรีไซเคิลได้ง่าย เช่น โฟมพอลิสไตรีน โฟมพอลิไวนิลคลอไรด์ โฟมพอลิเอทิลีน

2.5.3 กระบวนการเกิดโฟม (Foam formation)

โฟมพลาสติกสามารถเตรียมได้หลายวิธี โดยวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือกระบวนการขยายตัว (Expansion process) ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การเกิดฟอง (Bubble Formation or Initiation) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการเกิดโฟม โดยทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นและขยายตัวต่อไปในสารละลายหรือพอลิเมอร์หลอมเหลว กระบวนการเกิดฟองนี้จะเรียกว่าการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) ซึ่งมีอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ 1) การเกิดนิวเคลียสในตนเอง (Self Nucleation) คือฟองก๊าซจะเกิดขึ้นในขณะที่ของเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์ เริ่มผสมเป็นเนื้อเดียวกัน 2) กระบวนการเกิดนิวเคลียส (Nucleation Process) คือฟองก๊าซจะเกิดขึ้นบนผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็ง (Liquid-solid interphase) ซึ่งของแข็งนี้เรียกว่าสารที่ทำให้เกิดนิวเคลียส (Nucleating agent) การทำให้พลาสติกเกิดฟองก๊าซในโครงสร้างโฟมมีหลายวิธีด้วยกัน ได้แก่

1) การสลายตัวทางความร้อนของสารฟูทางเคมีจากการผสมสารฟูที่เป็นของแข็งกับพอลิเมอร์และให้ความร้อน ทำให้สารฟูสลายตัวเกิดเป็นก๊าซ เช่น ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น

2) การเกิดฟองก๊าซเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี ก๊าซจะเกิดขึ้นเนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารเคมี 2 ชนิด ซึ่งก๊าซจะปล่อยออกมาพร้อมกับการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) และการเชื่อมขวาง เช่น ปฏิกิริยาระหว่างไอโซไซยานาต (Isocyanate) กับน้ำ ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการเตรียมโฟมพอลิยูรีเทน (Polyurethane Foam) เป็นต้น

3) การลดความดัน เป็นการขยายตัวของก๊าซใน เนื้อพอลิเมอร์โดยการลดความดันในระบบพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น การอัดรีด (Extrusion) โฟมโพลีสไตรีน (Expanded polystyrene, EPS)

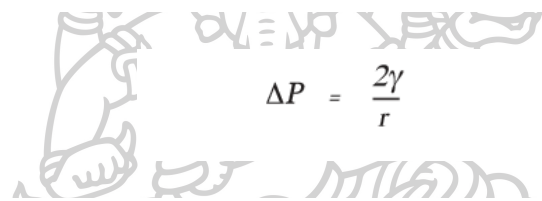
4) การกลายเป็นไอของของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำในเนื้อพลาสติก ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาคายความร้อนหรือการให้ความร้อนกับสารฟูที่เป็นของเหลว ตัวอย่างของสารฟูที่เป็นของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำ ได้แก่ ฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon) เมทิลีนคลอไรด์ (Methylene chloride) เป็นต้น

5) การใช้ตัวเติมชั่วคราว วิธีนี้ไม่มีการผลิตก๊าซขึ้นแต่จะใช้อนุภาคของแข็งผสมกับพอลิเมอร์แล้วขึ้นรูปเป็น พลาสติกแข็ง จากนั้นชะ (Leach) สารตัวเติมออกด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม ทำให้ได้ชิ้นงานที่มีเซลล์เปิดเกิดขึ้น วิธีนี้มักใช้ในการเตรียมโฟมพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE foam) เนื่องจาก PTFE เป็นพอลิเมอร์ที่ทำให้เกิดการขยายตัวได้ยาก

6) การเก็บกักก๊าซเชิงกล คือการทำให้เกิดฟองก๊าซ โดยการกวนเชิงกลในระบบพอลิเมอร์เหลว แล้วทำให้แข็งตัว โดยสารเร่งปฏิกิริยาหรือความร้อนทำให้เกิดการกักฟองก๊าซไว้ในเนื้อพลาสติก วิธีนี้เป็นวิธีที่เก่าและมีข้อเสียคือโฟมที่ได้จะมีเซลล์ที่ไม่สม่ำเสมอ

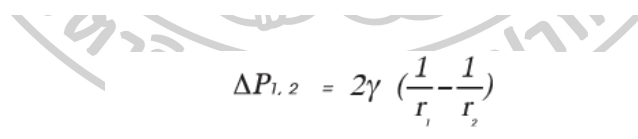
7) การเติมไมโครสเฟียร์ เป็นการเติมฮอลโลว์ไมโครสเฟียร์ (Hollow microspheres) ในพอลิเมอร์ซึ่งไมโครสเฟียร์ ดังกล่าวอาจเป็นเม็ดแก้วหรือเม็ดพลาสติกโดยส่วนใหญ่จะเป็นการผสมเม็ดฟีนอลิก (Phenolic spheres) ในพอลิเอสเทอร์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin) ขณะเกิดการบ่ม (Curing)

ขั้นตอนที่ 2 การเพิ่มขนาดของฟอง (Bubble Growth) การเพิ่มขนาดของฟองเกิดจากการแพร่ของแก๊สจากเฟสของเหลวหรือสารละลายพอลิเมอร์เข้าไปสู่ฟองแก๊ส ฟองที่เกิดขึ้นในขั้นแรกจะมีลักษณะเป็นทรงกลมซึ่งจะขยายตัวต่อไปภายใต้สภาวะที่กำหนดและควบคุมโดยอาศัยความแตกต่างของความดันระหว่างภายในและภายนอกฟองแก๊สหรือเซลล์ (ΔP) แรงตึงผิวที่สัมผัส (γ) และรัศมีฟองก๊าซ (r) ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังสมการที่ 1



$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad (1)$$

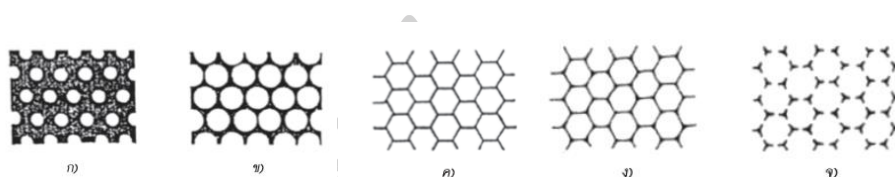
ค่าความแตกต่างของความดันจะมค่ามากในฟองที่มีขนาดเล็ก (ที่ค่าแรงตึงผิวค่าหนึ่ง) ฟองที่เล็กกว่ามีแนวโน้มที่จะทำให้ค่าความแตกต่างของความดันเท่ากันได้โดยการขยายตัวหรือเพิ่มขนาดขึ้น (Growing) การแตกของผนังเซลล์หรือการแพร่ของสารเร่งฟูจากฟองที่มีขนาดเล็กไปฟองที่มีขนาดใหญ่สามารถแสดงได้ตามความสัมพันธ์ดังแสดงไว้ในสมการ



$$\Delta P_{1,2} = 2\gamma \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2)$$

ขั้นตอนที่ 3 ความเสถียรหรือการคงรูปของ ฟอง (Bubble Stability) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายและสำคัญที่สุดใน กระบวนการเกิดโฟมซึ่งฟองที่เกิดขึ้นในเฟสพอลิเมอร์เหลวอาจจะไม่เสถียรและยุบตัวภายใต้แรงโน้มถ่วง ความเสถียรของโครงสร้างโฟมขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างซึ่งปัจจัยหนึ่ง คือ การถ่ายเท (Drainage) ของของเหลวจากผนังเซลล์ไปยังรอยต่อระหว่างเซลล์ (Cell junction) โดยขณะที่ฟองกำลังขยายตัวจะเกิดการสัมผัสกันของเซลล์ทำให้เกิดผนัง เซลล์และสัน (Ribs) ของเซลล์ขึ้น เมื่อการขยายตัวเกิดต่อไปอีกของเหลวจะเกิดการถ่ายเทไปยังรอยต่อระหว่างเซลล์มากขึ้น ถ้าการถ่ายเทของเหลวในลักษณะนี้ยังคงเกิดต่อไปจะทำให้เกิดรอยแตกขึ้นที่ผนังเซลล์และถ้าทำให้ระบบโฟมขณะนี้เสถียรจะทำให้ได้โฟมพลาสติกแบบเซลล์เปิดการป้องกันการเกิดรอยแตกของผนังเซลล์ทำได้

โดยทำให้ระบบโพลิเมอร์เกิดการเสถียรก่อนที่จะเกิดรอยแตกขึ้นที่ผนังเซลล์ สำหรับในระบบโพลิเมอร์สามารถทำได้โดยการเพิ่มความหนืดของเฟสโพลิเมอร์ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดต่อความเสถียรของโพลิเมอร์ วิธีทำให้ภาวะโพลิเมอร์เสถียรมีหลายวิธีได้แก่ วิธีทางเคมี เช่น กระบวนการเกิดโพลิเมอร์ของเทอร์โมเซตโพลิเมอร์หรือวิธีทางกายภาพ เช่น การทำให้เทอร์โมพลาสติกโพลิเมอร์ที่ขยายตัวเย็นตัวลงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิสภาพแก้วเพื่อป้องกันการไหลของโพลิเมอร์จากชั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการเกิดโพลิเมอร์ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) การเติบโต (Growth) ของฟองก๊าซและการขยายตัวของก๊าซในระบบโพลิเมอร์เหลวสามารถแสดงขั้นตอนต่าง ๆ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 2.7 แผนภาพขั้นตอนระหว่างกระบวนการเกิดโพลิเมอร์[8]

- ก) การเกิดฟองในระบบโพลิเมอร์เหลว โดยฟองจะมีรูปร่างทรงกลม
- ข) ฟองก๊าซเติบโตมากขึ้นส่งผลให้โพลิเมอร์มีความหนืดลดลง
- ค) ฟองก๊าซขยายตัวและสัมผัสกันระหว่างฟองทำให้รูปร่างของฟองเปลี่ยนเป็นทรงสิบสองหน้าซึ่งแต่ละหน้าเป็นรูป 5 เหลี่ยม (pentagonal dodecahedron) แต่หากมองเป็น 2 มิติจะเห็นเป็น 6 เหลี่ยม ลักษณะคล้ายรังผึ้ง (hexagonal honey comb)
- ง) โพลิเมอร์พลาสติกจะมีลักษณะเป็นแบบเซลล์ปิดซึ่งอาจจะเกิดการแตก (rupture) ของผนังเซลล์ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความหนืด พลังงานอิสระ เป็นต้น
- จ) ผลจากการขาดของผนังเซลล์ของฟองทำให้สัณฐานโครงสร้างโพลิเมอร์เป็นแบบเซลล์เปิด[8]

2.6 สารเร่งฟู่/สารก่อฟอง (Blowing agent)

สารเร่งฟู่หรือสารก่อฟองเป็นสารเคมีที่เมื่อให้ความร้อนจนเกิดการแตกตัวแล้วจะให้แก๊สออกมาเช่น ไนโตรเจน (N_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น ซึ่งแก๊สดังกล่าวนั้นจะทำให้โครงสร้างของพลาสติกเกิดเป็นรูพรุนซึ่งเรียกว่สตุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนนี้ว่าโพลิเมอร์

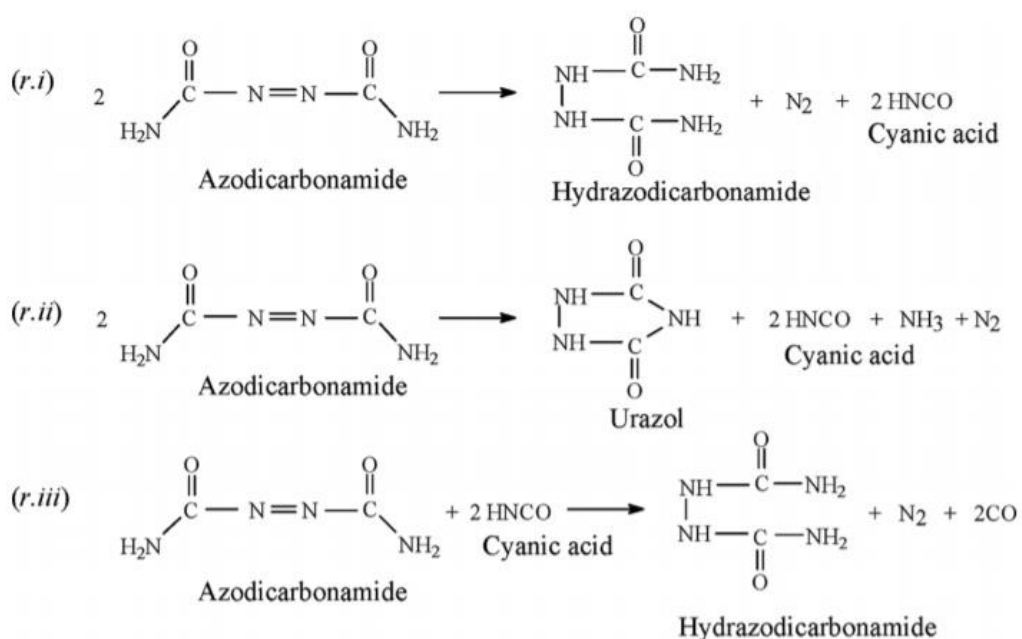
2.6.1 ขนาดของสารก่อฟอง

การใช้สารก่อฟองที่มีขนาดเล็กจะช่วยให้เกิดการกระจายตัวของฟองอากาศที่เกิดจากการเผาได้อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ประกอบกับจะเกิดการแตกตัวหรือเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดฟองได้ง่ายและเร็วช่วยทำให้ใช้อุณหภูมิต่ำกว่าเมื่อใช้สารก่อฟองที่มีขนาดใหญ่

2.6.2 ชนิดของสารก่อฟอง

การเลือกใช้สารก่อฟองที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากสารก่อฟองบางชนิดจะเกิดแก๊สที่เป็นพิษต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อมได้โดยเฉพาะแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) แต่ถ้าสารก่อฟองนั้นให้แก๊สจำพวกคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หรือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จะทำให้ความเป็นพิษลดลงมาก ถ้าแก๊สที่ได้เป็นไอน้ำ (H₂O) หรือแก๊สไฮโดรเจน (H₂) เป็นสิ่งที่ต้องการแต่ทำได้ยากทั้งนี้ สารก่อฟองถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ

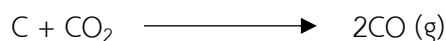
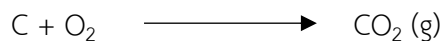
กลุ่มที่1 Neutral foaming agent เป็นสารก่อฟองที่ให้แก๊สเกิดขึ้นจากการแตกตัวของความร้อนที่อุณหภูมิแตกตัวของสารก่อฟองชนิดนั้นเช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) จะแตกตัวที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส, อะโซไดคาร์บอนาไมด์ (Azodicarbonamide) จะแตกตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200 - 210 องศาเซลเซียส โดยตัวอะโซไดคาร์บอนาไมด์จะแตกตัวได้แก๊สไนโตรเจนซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 2.8 แสดงปฏิกิริยาการแตกตัวของ Azodicarbonamide[9]

กลุ่มที่2 Reduced foaming agent เป็นสารก่อฟองที่ให้แก๊สเกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการให้ความร้อน เช่น ผงคาร์บอน (C) จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเมื่อเผาด้วยบรรยากาศออกซิเดชันเกิดเป็นแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์หรือทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่

เกิดขึ้นจากการแตกตัวของสารประกอบคาร์บอนเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ดังแสดงในปฏิกิริยาเคมีต่อไปนี้[9]



2.7 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยของ Gendron R. และคณะ[10] เป็นการศึกษาการขึ้นรูปโพลีเมอร์โดยใช้เครื่อง Twin screw extrusion ซึ่งใช้สารเร่งฟู่ (Blowing agent) เป็น Carbon dioxide (CO₂) โดยใช้ Poly(lactic acid) (PLA) เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์หลัก ซึ่งกระบวนการ Plasticization ที่เกิดขึ้นโดย CO₂ สามารถวัดได้โดยวิธีที่แตกต่างกันได้ 2 วิธี On-line Rheometry และ in-line ultrasonic technique โดยทั้งสองวิธีจะให้ค่าที่มีความเฉพาะเจาะจงของโพลีเมอร์ที่ขึ้นรูปโดยเครื่อง Twin screw extrusion โดยสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปที่เหมาะสมซึ่งในกระบวนการที่ต้องการให้เป็นเซลล์เปิดจะมีการบ่อนแก๊สด้วยความดัน 5 psi ซึ่งปริมาณ CO₂ ที่บ่อนเข้าไปในกระบวนการจะน้อยกว่า 7 %wt โดยความหนาแน่นของโพลีเมอร์ PLA จะอยู่ในช่วง 20 – 25 กิโลกรัมต่อตารางเมตร โดยผลของโครงสร้างภายในโพลีเมอร์ที่ใช้ CO₂ Supercritical จะแสดงโครงสร้างเป็นลักษณะของเซลล์เปิดเมื่อมีการใช้ CO₂ ประมาณ 7 %wt และความหนาแน่นของโพลีเมอร์จะลดลงเหลือเพียง 700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของ CO₂ ที่ 6.4 %wt

ในงานวิจัยของ Jahani D. และคณะ[11] ศึกษาเกี่ยวกับการขึ้นรูปโพลีเมอร์ชีวภาพโดยใช้ Poly(lactic acid) (PLA) และ เส้นใยไม้เนื้ออ่อนโดยใช้เครื่อง Twin screw extrusion และ Injection molding ในการขึ้นรูปโดยมีการใช้ Poly(ethylene glycol) (PEG) เป็น Plasticizer โดยมีการทดสอบในเรื่องสมบัติทาง Thermo properties, Scanning Electron Microscopy, Thermogravimetric analysis, differential scanning calorimetry และ X-ray diffraction ผลจากการเติม nucleating agents จะส่งผลให้เกิดความเป็นผลึกในโครงสร้างมากขึ้น การยึดในแนวสองแกนและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดโพลีเมอร์ยังเป็นส่วนที่ช่วยเพิ่มความเป็นผลึกให้กับโพลีเมอร์ได้ด้วยโดยโพลีเมอร์ที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นโพลีเมอร์ PLA/PEG ที่มีการเติมเส้นใยธรรมชาติจะมีโครงสร้างของโพลีเมอร์ที่มีความละเอียดและสม่ำเสมอ ซึ่งลักษณะทางสมบัติของโพลีเมอร์ที่ดีขึ้นนั้นเกิดจากการเติม Nucleating agent และความแข็งแรงของโพลีเมอร์ที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการเติมเส้นใยธรรมชาติที่เข้าไปเพื่อเสริมแรงวัสดุคอมโพสิต

จากงานวิจัยของ Ahmad S. และคณะ[12] ได้ศึกษาผลของกระบวนการในการขึ้นรูปและสารเร่งฟูโดยศึกษาถึงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพโดยโพลีที่ทำการขึ้นรูปจะเป็นวัสดุคอมโพสิตระหว่าง polylactic acid (PLA)/kenaf fiber (KF) โดยใช้ Azodicarbonamide (ADC) เป็น Blowing agent โดยทำการขึ้นรูปเป็นวัสดุคอมโพสิตโดยใช้เครื่อง Twin screw extruder และจากนั้นทำการขึ้นรูปเป็นโพลีโดยใช้เครื่อง Compression machine โดยสภาวะที่ใช้ในการผสม PLA และ KF โดยใช้เครื่อง Twin screw extruder ซึ่งอุณหภูมิบริเวณกระบอกหลอมจะอยู่ที่ 170, 175, 180, 185 องศาเซลเซียส (ที่อุณหภูมิสูง) 160, 165, 170, 175 องศาเซลเซียส (ที่อุณหภูมิต่ำ) ซึ่ง ADC ที่ทำการเติมจะมีปริมาณ 0, 1, 3, 5 phr ซึ่งความหนาแน่นของโพลีจะลดลงเมื่อมีการเติม ADC เข้าไปเมื่อพิจารณาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาพบว่าขนาดของรูพรุนมีขนาดใหญ่โดยการขึ้นรูปขึ้นงานทดสอบด้วย Compression machine ในส่วนของ Tensile strength, Elongation at break และ Young's modulus จะลดลงเมื่อปริมาณ ADC มากขึ้น

จากงานวิจัยของ Jompang L. และคณะ[1] ได้ศึกษาการผสมพอลิเมอร์สองชนิดคือ Poly(lactic acid) (PLA) และ Poly(butylene succinate) (PBS) โดยใช้เครื่อง Twin screw extruder เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการผสมซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวได้รายงานสภาวะและอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปเป็น Polymer blend ซึ่งกล่าวถึงในส่วนของ Experimental ซึ่งจะทำการเตรียมสารตัวอย่างโดยใส่ปริมาณ PBS ในช่วง 0-50 %wt โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของเสถียรภาพทางความร้อน สมบัติเชิงกลรวมไปถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว ซึ่งจากผลของงานวิจัยพบว่าที่การเติม PBS 10 %Wt มีความเข้ากันได้ดีกับ PLA มากที่สุดโดยศึกษาด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) และจากการเติม PBS เข้าไปนั้นยังพบว่าสมบัติในเรื่องความยืดหยุ่นของ Polymer blend ยังเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาในส่วนสมบัติเชิงกลพบว่าเมื่อพิจารณาที่ Pure PLA จะมีค่า Tensile strength สูงที่สุดเนื่องจากด้วยตัวโครงสร้างที่มีลักษณะเป็น Rigid structure จึงมีค่า Tensile strength มากโดยมีการศึกษาในหลายงานวิจัย เมื่อทำการเติม PBS เข้าไปในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นพบว่าค่า Tensile strength มีแนวโน้มลดลง เนื่องจาก PBS มีค่อนข้างมีค่า Stiffness ค่อนข้างต่ำ อีกทั้ง PBS ยังมีสมบัติในเรื่อง ductility อีกด้วย เมื่อทำการเติมเข้าไปกับพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างในลักษณะ Rigid structure จึงทำให้มีสมบัติในส่วนของ Tensile strength ลดลง

จากงานวิจัยของ Ozdemir E. และคณะ[13] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติของวัสดุคอมโพสิตระหว่าง Poly(lactic acid) (PLA) และ Poly(ethylene glycol) ด้วย Montmorillonite โดยจะทำการเตรียมตัวอย่างโดยการเติม PEG ในสัดส่วน 10, 15, 20 %Wt ซึ่งจะทำการพิสูจน์

เอกลักษณ์ของวัสดุคอมโพสิตเพื่อดูว่าวัสดุทั้งสองชนิดเข้ากันได้โดยมีการใช้หลายเทคนิค gel permeation chromatography (GPC), X-ray diffractometry (XRD), transmission electron microscopy (TEM), differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetry analysis (TGA), Direct pyrolysis mass spectrometry (DP-MS) รวมไปถึงการทดสอบในเรื่องสมบัติเชิงกลด้วย ซึ่งในส่วนของสมบัติเชิงกลนั้นจะเห็นว่าเมื่อทำการเติม PEG ในปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลทำให้วัสดุคอมโพสิตแสดงสมบัติที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น โดยมีหลายงานวิจัยที่มีการใช้ PEG ไปเป็น Plasticizer ใน PLA พบว่าการเติม PEG ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ค่า Tensile Strength และ Young's Modulus มีค่าลดลง ด้วยสมบัติดังกล่าวนี้ทำให้มีงานวิจัยหลาย ๆ งานวิจัยใช้ PEG เป็นตัว Plasticizer และเมื่อทำการเติม C30B เข้าไปพบว่าสามารถทำให้ค่า Tensile Strength และ Young's Modulus มีค่าเพิ่มขึ้น รวมไปถึงค่า Elongation at break ก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว PLA เป็นไบโอพอลิเมอร์ที่มีสมบัติที่แข็งเปราะ การเติม PEG เข้าไปนั้นเหมือนเป็นการเติม Plasticizer เข้าไปจึงช่วยให้วัสดุคอมโพสิตมีความเหนียวที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่าการเติม PEG ในสัดส่วน 40 %Wt ทำให้ค่า Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นถึง 40% อีกทั้งการเติม C30B ยังช่วยให้มีค่า Elongation at break ที่สูงขึ้นอีกด้วย

จากงานวิจัยของนายกิตติศักดิ์ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์และสารเร่งฟูในโฟมพลาสติกชีวภาพเพื่อใช้สำหรับการยืดอายุผลผลิตทางการเกษตรโดยพบว่าสัดส่วนการผสมระหว่าง PLA และ PBS ที่ร้อยละ 80:20 โดยน้ำหนัก ปริมาณการเติมสารเร่งฟู 5 phr ปริมาณการเติมถ่านกัมมันต์ 3 phr เป็นปริมาณในการเติมที่เหมาะสมที่สุดโดยทำให้โฟมคอมโพสิตมีสมบัติในเรื่อง ความหนาแน่นของแผ่นโฟม ลักษณะสัญญาณวิทยา ค่าดัชนีการไหล สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกล พัฒนาไปในแนวโน้มที่ดีขึ้น โดยโฟมคอมโพสิตที่ได้จะมีน้ำหนักเบาและมีต้นทุนต่ำ แต่อย่างไรก็ตามการเติม DCP ในปริมาณที่ต่างกัน เมื่อพิจารณาความหนาแน่น ค่าสัดส่วนช่องว่างและลักษณะของแผ่นโฟมคอมโพสิตที่เตรียมได้ไม่แตกต่างกับโฟมคอมโพสิตที่ไม่เติม DCP มากนักแต่กลับพบว่าการเติม DCP ยังไปลดสมบัติเชิงกลของโฟมคอมโพสิตลงด้วยเมื่อพิจารณาในส่วนของการเติมถ่านกัมมันต์พบว่าแผ่นโฟมคอมโพสิตที่เติมถ่านกัมมันต์ในปริมาณ 3 phr เป็นโฟมคอมโพสิตที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการชะลอการสุกของกล้วยน้ำว้า

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์ สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องซังสาร
2. ตู้อบสาร

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. เม็ดพลาสติก Poly(lactic acid) (PLA)

ผู้ผลิต : NatureWorks LLC

เกรด : Ingeo 2003D

MFR : 3.3 g/ 10 min

Melting point : 145 - 160 °C

2. Zinc Oxide (ZnO)

ผู้ผลิต : SIGMA-ALDRICH

ลักษณะ : ผง

ขนาดอนุภาค : มากกว่า 100 nm

3. เม็ดพลาสติก Poly(butylene succinate) (PBS)

ผู้ผลิต : MCC PTT Biochem

เกรด : BioPBS™ เกรด FD92PM / FD92PB

MFR : 4 g/10 min

Melting point : 105 - 115 °C

4. เม็ดพลาสติก Poly(ethylene glycol) (PEG)

ผู้ผลิต : SIGMA-ALDRICH

ลักษณะ : ผง

น้ำหนักโมเลกุล : 8000

ความหนาแน่น : 1.045 กรัมต่อมิลลิลิตร

5. สารเร่งฟู Azodicarbonamide (ADC)

ผู้ผลิต : A.F. supercell

ลักษณะ : ผง

ขนาดอนุภาค : 4.5 – 10 ไมโครเมตร

Decomposition Temperature : 150 °C

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal gravimetric analyzer) รุ่น Mettler Toledo/TGA
2. เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน (Differential scanning calorimeter) รุ่น Mettler DSC1, switzerland
3. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) ยี่ห้อ INSTRON รุ่น 5900 series/UTM
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น TM3000
5. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer) รุ่น X'Pert PRO
6. เครื่องทดสอบคุณสมบัติการไหลของพลาสติก (Melt flow indexer)
7. เครื่องทดสอบความหนาแน่น (Density kits and accessories)

3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน

1. เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin Screw Extruder) ยี่ห้อ Enmach รุ่น SHJ-25
2. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Machine) ยี่ห้อ INSTRON

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การเตรียมโพลีเมอร์ระหว่าง Poly(lactic acid)/Polybutylene succinate

3.2.1.1 การเตรียมมาสเตอร์แบท PLA/PEG

การเลือกเตรียมมาสเตอร์แบทระหว่าง PLA และ PEG เนื่องจาก PEG มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำ หากไม่เตรียมเป็นมาสเตอร์แบทไปก่อนจะทำให้ PEG ที่มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงหลอมติดอยู่ บริเวณช่องเติมสาร นำพอลิเมอร์ PLA เกรด 2003D และ PEG ไปอบในตู้อบสารเพื่อกำจัดความชื้นที่

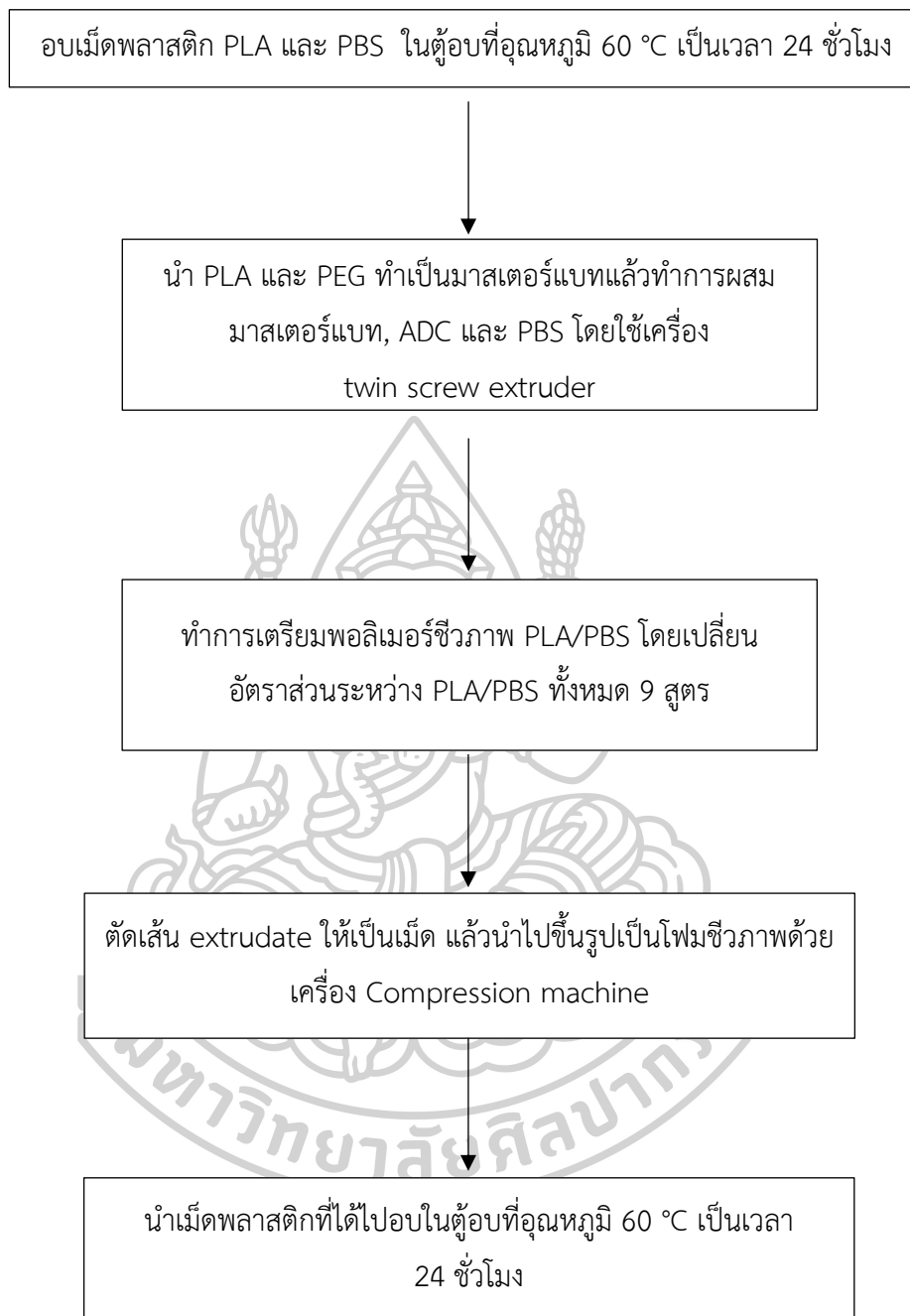
อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้งาน จากนั้นทำการเตรียมมาสเตอร์แบทระหว่าง PLA ปริมาณ 200 กรัม และ PEG 120 กรัม โดยขั้นตอนในการเตรียมมีดังนี้ นำ PLA และ PEG ไปทำการอบไล่ความชื้นออก จากนั้นตั้งเครื่อง Mechanical stirrer เพื่อใช้ในการละลาย PLA โดยสารละลายที่ใช้ในการละลาย PLA คือ โทลูอิน (Toluene) ซึ่งจำทำการเติมโทลูอินลงไปในพอลิเมอร์ PLA ครั้งละ 100 มิลลิลิตร จนสามารถกวนสารละลายได้อย่างต่อเนื่อง เมื่อสามารถกวนสารละลายได้อย่างต่อเนื่องแล้วจะเอาไปกวนด้วย Mechanical stirrer ที่ความเร็วรอบ 150 rpm จนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้โดยใช้เวลา 6-8 ชั่วโมง จากนั้นจึงทำการใส่ PEG ตามลงไปนในสารละลายนั้น แล้วรอจนกว่าจะเป็นเนื้อเดียวกันอีกครั้ง เมื่อสารละลายเป็นเนื้อเดียวกันแล้วทำการเทลงบนแผ่นกระจกเพื่อทำให้โทลูอินระเหย โดยในส่วนนี้จะทำในตู้ดูดควัน รอจนกว่าสารละลายระเหยเป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมงแล้วนำไปตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อเตรียมทำการผสมในเครื่อง Twin screw extruder

3.2.1.2 การเตรียมพอลิเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS

นำมาสเตอร์แบทที่เตรียมได้ในส่วนแรกและ PBS เกรด FD92PM รวมถึง ADC ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้งาน จากนั้นนำไปผสมด้วยเครื่อง Twin screw extruder (Co-rotation ,Diameter 20 mm Length 64 cm, L/D ratio 32) ตามสัดส่วนที่ได้เตรียมไว้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งสภาวะที่ใช้ในการผสมในส่วนของกระบอกหลอมคือ 100°C 110°C 115°C 130°C 140°C 150°C 140°C ความเร็วรอบ 150 rpm ทำการหล่อเย็นด้วยน้ำ

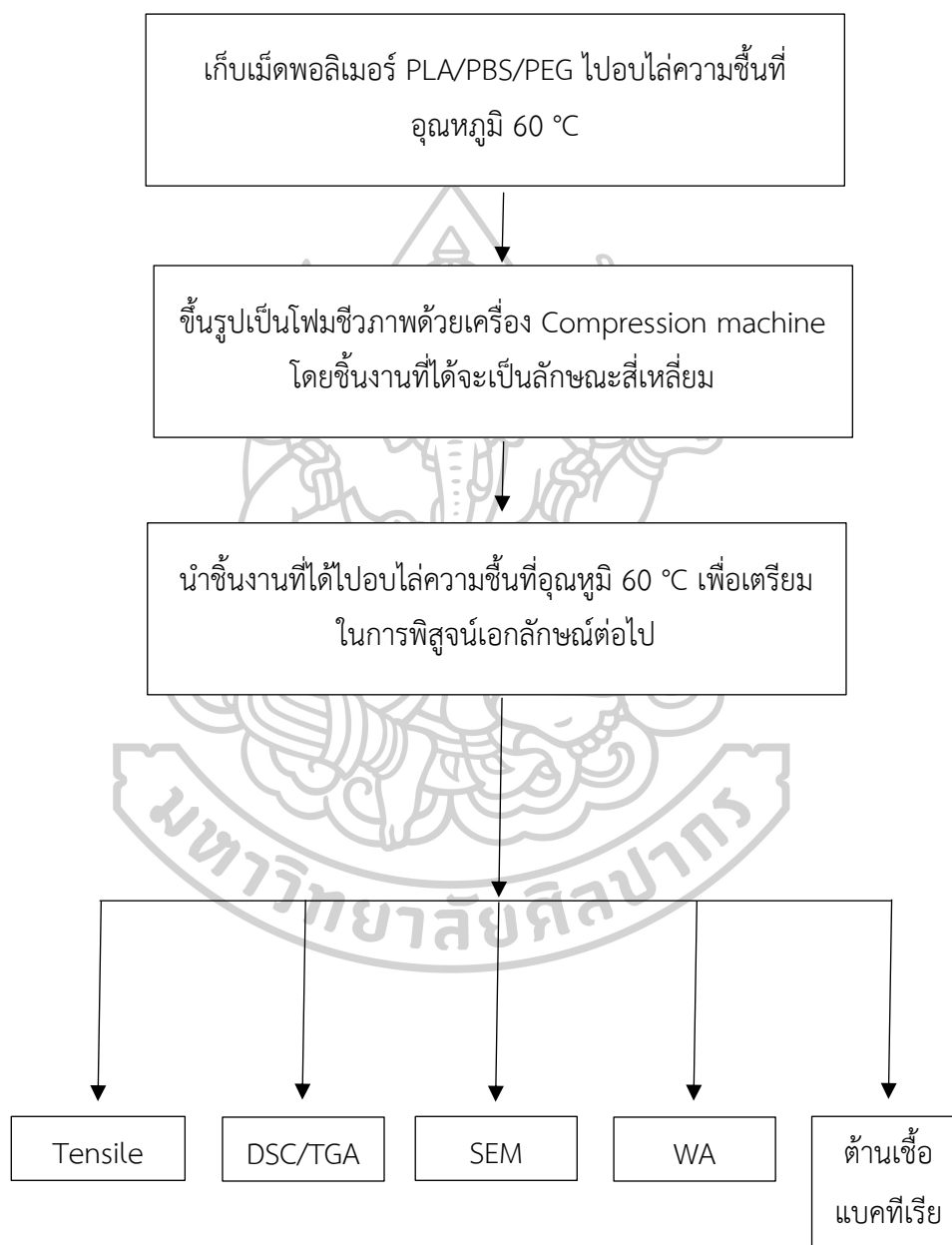
3.2.1.3 การเตรียมโฟมชีวภาพ PLA/PBS

นำพอลิเมอร์ชีวภาพที่เตรียมได้จาก 3.2.1.2 ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำพอลิเมอร์ชีวภาพในแต่ละสัดส่วนทำการขึ้นรูปเป็นโฟมโดยใช้เครื่อง Compression molding ซึ่งสภาวะในการขึ้นรูปจะที่ 160°C Pre-heat 3 นาที Compression 5 นาที Cooling (อากาศ) 10 นาที โดยในขั้นตอนนี้ทำการตั้งระยะห่างระหว่างแผ่นให้ความร้อนด้านบนกับด้านล่าง 7.5 มิลลิเมตร แล้วจากนั้นทำการหล่อเย็นด้วยลม แล้วเก็บชิ้นงานไว้ในกล่องเก็บชิ้นงานที่มีซิลิกาบรรจุอยู่ จากนั้นนำไปทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.1 แสดงแผนภูมิการเตรียมโฟมชีวภาพ PLA/PBS/PEG

3.2.1.4 นำโพลีเมอร์ที่เตรียมได้มาขึ้นรูปเป็นชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรีย สมบัติการดูดซับน้ำ (Water absorption ; WA) เสถียรภาพทางความร้อน หาปริมาณผลึกและสัณฐานวิทยาของโพลีเมอร์



รูปที่ 3.2 แสดงแผนภูมิการเตรียมชิ้นงานทดสอบและการพิสูจน์เอกลักษณ์

3.2.1.4.1 ศึกษาสมบัติเชิงกลของโพลีชีวภาพ PLA/PBS และ โพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO ด้วยการทดสอบสมบัติการดัดงอด้วยเครื่อง Universal testing machine โดยใช้มาตรฐานในการทดสอบ ASTM D790 ระยะ span 250 มิลลิเมตร ชี้นงานทดสอบยาว 127 มิลลิเมตร กว้าง 12.7 มิลลิเมตร หนา 75 มิลลิเมตร ทดสอบในลักษณะ Flexural test ใช้ชี้นงานทดสอบ 6 ตัวอย่าง ความเร็วที่ใช้ในการกด (Crosshead speed) ตามมาตรฐานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 โดยในงานวิจัยนี้คำนวณความเร็วที่ใช้ในการกดอยู่ที่ 6 mm/min

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (\text{สมการที่ 3.1})$$

โดยที่	R	=	ความเร็วที่ใช้ในการกด (mm/min)
	Z	=	เป็นค่าคงที่ โดยทั่วไปใช้ 0.01 (mm/mm/min)
	L	=	ระยะห่างระหว่าง Span (mm)
	d	=	ความหนาของชี้นงาน (mm)

Flexural Modulus and strain

มอดูลัสของแรงดัด (Flexural modulus หรือ Modulus of elasticity of bending) เป็นค่าที่ใช้บอกความแกร่งของวัสดุ (Stiffness) ซึ่งได้จากการศึกษาพฤติกรรมช่วงยืดหยุ่นระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) โดยสามารถหาได้จากความชันระหว่างแรงกระทำและระยะยุบตัว (Load-deflection curve) จากช่วง proportional limit ของกราฟระหว่างความเค้นและความเครียด

Flexural stress and strain

ในการทดสอบแรงดัดนั้น ชี้นทดสอบจะได้รับแรงที่เท่ากันตลอดพื้นที่หน้าตัด แต่ในการทดสอบแรงดัดงอ ชี้นทดสอบจะได้รับแรงที่ไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด เนื่องจากในสภาวะที่ชี้นงานถูกดัดงอนั้น ชี้นงานทดสอบจะได้รับแรงสูงสุดบนผิว ผิวหนึ่งและได้รับแรงอัดบนผิวตรงกันข้าม

โดยทั่วไปแล้วสมการที่ใช้ในการคำนวณของสภาพการดัดงอนี้จะถูกต้องในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุในระดับต่ำ วัสดุแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดแบบเชิงเส้นและอยู่ภายใต้แรงดัดงอเท่านั้น ดังนั้นโดยทั่วไปมักจะไม่ใช่ทดสอบที่ระดับความเครียดเกิน 5% แต่ในงานวิจัยนี้ใช้ที่ระดับความเครียด 8% เนื่องจากมีการผสมพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงอย่าง PBS อยู่ด้วย ค่าที่ใช้ในการรายงานเป็นค่า Flexural stress at yield และ Elongation at yield strength เนื่องจากมีการกำหนดระยะในการกดย่างแน่นอนจึงไม่สามารถรายงานค่าที่ตำแหน่งแตกหักได้ อีกหนึ่งเหตุผลคือสัดส่วนในการผสมระหว่าง PLA/PBS บางสัดส่วนไม่มีการแตกหักของชิ้นงานทดสอบ

3.2.1.4.2 ศึกษาลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของโพลีชีวภาพ PLA/PBS และ โพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO ทดสอบด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) (Coating : Au, Magnification 120x) โดยใช้ในส่วนของ fracture surface ในการทดสอบโดยใช้กำลังขยาย 120 เท่าในการทดสอบ

3.2.1.4.3 ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโพลีชีวภาพ PLA/PBS และ โพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO ทดสอบด้วยเครื่อง Thermal Gravimetric Analyser (TGA) และ Differential scanning calorimetry (DSC) สภาวะในการทดสอบในส่วนของ TGA อุณหภูมิที่ทำการทดสอบจะอยู่ในช่วง 0 องศาเซลเซียส ถึง 700 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการให้ความร้อนอยู่ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที สภาวะในการทดสอบในส่วนของ DSC อุณหภูมิที่ทำการทดสอบจะอยู่ในช่วง -60 องศาเซลเซียส ถึง 250 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการให้ความร้อนอยู่ที่ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.2.1.4.4 ศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำของโพลีชีวภาพ PLA/PBS และโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO โดยทำการทดสอบด้วยการนำโพลีชีวภาพและโพลีคอมโพสิตไปแช่น้ำแล้วหาน้ำหนักของน้ำที่เพิ่มขึ้นจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ ใช้เวลาโดยประมาณ 15-20 วัน

3.2.1.4.5 ศึกษาการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO โดยทำการศึกษาเชื้อ E.coli และ S.Aureus ซึ่งทำโดยการบ่มเชื้อแล้วนับจำนวนโคโลนีต่อมิลลิลิตร เพื่อหาว่าชิ้นงานทดสอบสามารถต้านทานเชื้อได้ในระดับไหน โดยทำการทดสอบซ้ำชิ้นงานละ 2 ครั้ง ทั้งหมด 5 ตัวอย่างทดสอบ

การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อและสารละลายสำหรับเชื้อจางเชื้อ

Nutrient broth (NB) ใช้เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อขณะทดสอบ เตรียมโดยชั่ง NB 13 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร กวนจนละลายหมดจากนั้นแบ่งใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

ขวดละ 50 มิลลิลิตร ตามจำนวนชิ้นงานตัวอย่างที่จะทำการทดสอบ ตัวอย่างละ 1 ขวด อุดปากขวดด้วยสำลีและปิดทับด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์จากนั้นนำไป Sterilize ด้วยเครื่อง High-pressure stream sterilizer ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นรอกให้เย็นแล้วนำไปเก็บในตู้เย็น 5 ถึง 10 องศาเซลเซียส โดยไม่เปิดสำลีออก หลังจากนั้นแบ่ง NB ที่เตรียมได้ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองประมาณ 5 หลอด สำหรับใช้เจือจางเชื้อแบคทีเรีย ปิดฝาหลอดทดลองและปิดทับด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ จากนั้นนำไป Sterilize ด้วยเครื่อง High-pressure stream sterilizer จากนั้นรอกให้เย็นแล้วนำไปเก็บในตู้เย็น 5 ถึง 10 องศาเซลเซียส โดยไม่เปิดฝาท่อออก

Nutrient agar (NA) ใช้นับจำนวนโคโลนีภายหลังการทดสอบ เตรียมโดยชั่งวุ้น 45 กรัม และ NB 13 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร กวนจนละลาย จากนั้นแบ่งใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร จำนวน 3 ขวด ปิดปากขวดด้วยสำลีและปิดทับด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ จากนั้นนำไป Sterilize ด้วยเครื่อง High-pressure stream sterilizer ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที รอกให้อุณหภูมิลดลงเหลือ 60 องศาเซลเซียส แล้วจึงเทลงบนจานเพาะเชื้อ จานละประมาณ 10 มิลลิลิตร เขย่าแล้วหมุนวนให้ทั่วจาน จากนั้นรอกให้แข็งตัว คว่ำจานเพาะเชื้อเพื่อป้องกันน้ำหยดลงอาหาร ใส่ถุงแล้วเก็บไว้ในตู้เย็น 5 ถึง 10 องศาเซลเซียส

การดำเนินการทดสอบการต้านทานต่อเชื้อแบคทีเรีย

การเตรียมชิ้นงานก่อนทดสอบ เขย่าเชื้อที่เตรียมไว้ให้เชื้อกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นใช้ Micro pipettor ในการนำเชื้อที่เตรียมไว้ปริมาณ 200 ไมโครลิตรภายใต้ Sterilizer ลงในหลอด NB ปิดฝาแล้วเขย่าให้เชื้อเกิดการกระจายตัวแล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ถึง 24 ชั่วโมง

การเตรียมชิ้นงานก่อนทดสอบ การเตรียมชิ้นงานจะใช้ประมาณ 3 กรัม โดยทำให้ชิ้นงานมีงานใกล้เคียงกันมากที่สุด แล้วนำไปฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง High-pressure stream sterilizer ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

ทดสอบชิ้นงานตัวอย่าง นำโคมคอมโพสิตที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มี NB 50 มิลลิลิตร ที่เตรียมไว้ชนิดละ 1 ขวด ภายใต้เทคนิค Sterilize จากนั้น เปิดเชื้อแบคทีเรียที่เตรียมไว้จำนวน 200 ไมโครลิตร ใส่ลงในขวดที่มีโคมคอมโพสิตและขวดที่มี NB อุดปิดปากหลอดด้วยสำลีและปิดทับด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

การเจือจางชิ้นงานทดสอบ ทำการนับจำนวนแบคทีเรียที่เติบโตโดยการเจือจางเป็นลำดับ 10 เท่า (10-fold serial dilution) ที่เตรียมไว้ก่อนหน้านี้จำนวน 9 หลอดต่อ 1 ขวด ต่อหนึ่งสูตร เขียนหมายเลขกำกับหลอดให้ชัดเจน โดยเริ่มจากการปิเปตสารจากขวดรูปชมพู่จำนวน 0.5 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองที่ 1 เขย่าให้กระจายตัวทั่วทั้งหลอดทดลอง จากนั้นปิเปตจากหลอดที่ 1 ไปยังหลอดที่ 2 ทำให้ครบทั้ง 9 หลอดทดลอง แล้วจากนั้นทำต่อในสูตรถัดไปจนครบทุกสูตรที่เตรียมไว้ เลือกความเข้มข้น 3 ความเข้มข้นที่คาดว่าจะมีโคโลนีในปริมาณที่เหมาะสม โดยในงานวิจัยนี้เลือกความเข้มข้นในหลอดที่ 7 หลอดที่ 8 และหลอดที่ 9 (ปริมาณเชื้อแบคทีเรีย 500 ไมโครลิตร ต่ออาหารเลี้ยงเชื้อ 50 มิลลิลิตร) ซึ่งจำนวนโคโลนีโดยทั่วไปจะอยู่ที่ 30 ถึง 300 โคโลนี แล้วแต่ความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียของสารตัวอย่าง

การนับจำนวนโคโลนีที่ได้จากการทดสอบ เมื่อนำออกจากตู้บ่มแล้วทำการปิเปตเชื้อจากหลอดที่เลือกลงในจานเพาะเชื้อ โดยจานเพาะเชื้อถูกแบ่งไว้สองฝั่ง ฝั่งละ 10 หยดโดยใช้ Micro pipettor ในการหยอดปริมาณหยดละ 10 ไมโครลิตร ทำซ้ำความเข้มข้นละ 3 จานเพาะเชื้อ จากนั้นนำไปมีอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วนำออกจากตู้บ่มแล้วนับจำนวนโคโลนี จากนั้นนำไปคำนวณหาจำนวนโคโลนีของแบคทีเรียในหน่วย CFU/มิลลิลิตร และหาค่าเฉลี่ยจำนวนโคโลนีหาได้จากสมการที่ 3.2

$$\text{CFU/มิลลิลิตร} = \frac{\text{จำนวนโคโลนีที่นับได้} \times \text{Dilution factor}}{\text{ปริมาณตัวอย่างที่ใช้หยดลงจานเพาะเชื้อ (0.1 มิลลิลิตร)}} \quad (\text{สมการที่ 3.2})$$

*CFU/มิลลิลิตร (Colony forming unit/มิลลิลิตร) คือ กลุ่มจุลินทรีย์ที่รวมตัวกันอยู่ต่อมิลลิลิตร

3.2.1.4.6 ศึกษาการสมบัติการเปียกผิวด้วยการวัดค่า Contact angle ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS และโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO โดยหยดน้ำลงบนโพลีชีวภาพและโพลีคอมโพสิตเป็นเวลา 5 นาทีและนำภาพถ่ายจากหยดน้ำบนชิ้นงานของโพลีที่ได้มาวัดมุมด้วยโปรแกรม Image J

3.2.1.4.7 การทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่อง Melt flow indexer (MFI) ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS และโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO สภาวะการทดสอบใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เวลาในการทดสอบต่อหนึ่งสูตร 10 นาที น้ำหนักลูกตุ้มที่ใช้ทดสอบ 2.16 กิโลกรัม

3.2.1.4.8 การทดสอบความหนาแน่นด้วยเครื่อง (Density kits and accessories) สภาวะที่ใช้ทดสอบใช้น้ำเป็นตัวเทียบ ชิ้นงานทดสอบประมาณ 1.5 กรัม อุณหภูมิที่ใช้ 27 องศาเซลเซียสแล้วนำไปคำนวณจากสมการที่ 3.3 ตามมาตรฐาน ASTM D792

$$\rho = \frac{A}{A-B} \times (\rho_0 - \rho_L) + \rho_L \quad (\text{สมการที่ 3.3})$$

- เมื่อ (A) = น้ำหนักของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ในอากาศ
 (B) = น้ำหนักของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ในน้ำ
 ρ_0 = ความหนาแน่นของน้ำ
 ρ_L = ความหนาแน่นของอากาศ
 ρ = ความหนาแน่นของโพลีชีวภาพ PLA/PBS

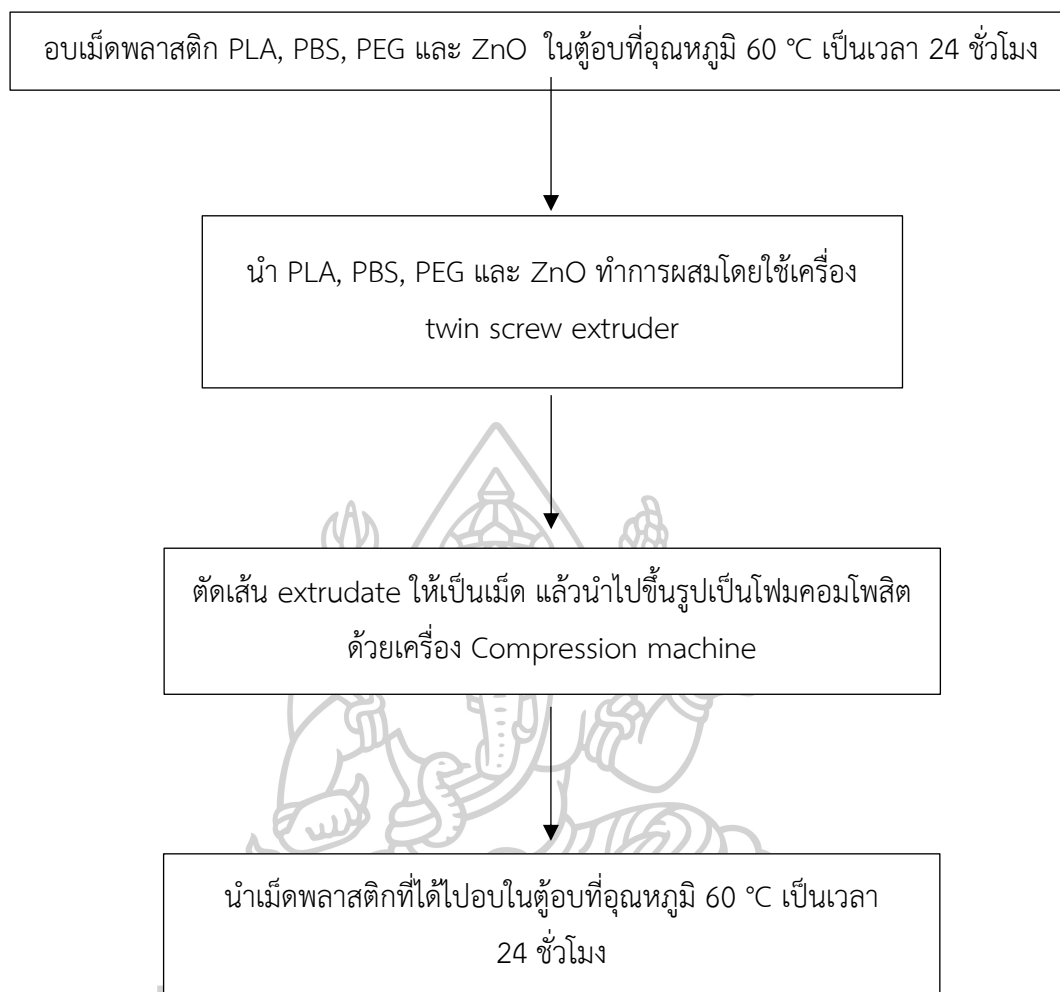
3.2.2 การเตรียมโพลีคอมโพสิตระหว่าง Poly(lactic acid)/Polybutylene succinate/Zinc Oxide

3.2.2.1 การเตรียมพอลิเมอร์คอมโพสิต PLA/PBS/ZnO

นำมาสเตอร์แบทที่เตรียมได้จาก 3.2.1.1 และ PBS เกรด FD92PM รวมถึง ADC และ ZnO ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้งานจากนั้นนำไปผสมด้วยเครื่อง Twin screw extruder ตามสัดส่วนที่ได้เตรียมไว้ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งสภาวะที่ใช้ในการผสมในส่วน of กระจกบดคือ 100°C 110°C 115°C 130°C 140°C 150°C 140°C ความเร็วรอบ 150 rpm ทำการหล่อเย็นด้วยน้ำ

3.2.2.2 การเตรียมโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO

นำพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมได้จาก 3.2.2.1 ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำพอลิเมอร์ชีวภาพในแต่ละสัดส่วนทำการขึ้นรูปเป็นโพลีโดยใช้เครื่องกดอัด ซึ่งสภาวะในการขึ้นรูปจะอยู่ที่ประมาณ 150°C Pre-heat 3 นาที Compression 5 นาที Cooling (อากาศ) 10 นาที โดยในขั้นตอนนี้จะตั้งระยะห่างระหว่างแผ่นให้ความร้อนด้านบนกับด้านล่าง 0.75 เซนติเมตร แล้วจากนั้นทำการหล่อเย็นด้วยลม แล้วนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.3 แสดงแผนภูมิการเตรียม PLA/PBS/PEG composite foam

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมโฟมชีวภาพและโฟมคอมโพสิตแล้วทำการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติการดูดซับ เสถียรภาพทางความร้อนและโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของโฟมชีวภาพและโฟมคอมโพสิตโดยผสมพลาสติกชีวภาพ 2 ชนิด ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิด (PLA) และ พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (PBS) ที่มีการเติมสารเร่งฟู (Blowing agent) พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) และ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยในส่วนแรกศึกษาผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBS ต่อสมบัติของโฟมชีวภาพ PLA/PBS โดยเติม PBS ในปริมาณที่ต่างกันตามอัตราส่วนผสมของโฟมชีวภาพระหว่าง PLA/PBS ดังนี้ 100/0, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80 และ 0/100 ตามลำดับ เพื่อทำการหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการนำไปทำเป็นโฟมคอมโพสิตในส่วนที่สอง ซึ่งในส่วนที่สองศึกษาผลของการเติม ZnO ต่อสมบัติของโฟมชีวภาพ PLA/PBS/ZnO โดยเติม ZnO ในปริมาณที่ต่างกันดังนี้ 1, 3, 5 และ 7 phr เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ ซึ่งใช้สภาวะในการผสมในช่วง 100°C - 170°C และความเร็วสกรูที่ 150 rpm โดยโฟมชีวภาพและโฟมคอมโพสิตทั้งสองส่วนจะทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัด (Compression molding) โดยในกระบวนการนี้จะใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 150°C แล้วนำไปทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ในส่วนถัดไป

4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBS ต่อสมบัติโฟมชีวภาพ PLA/PBS

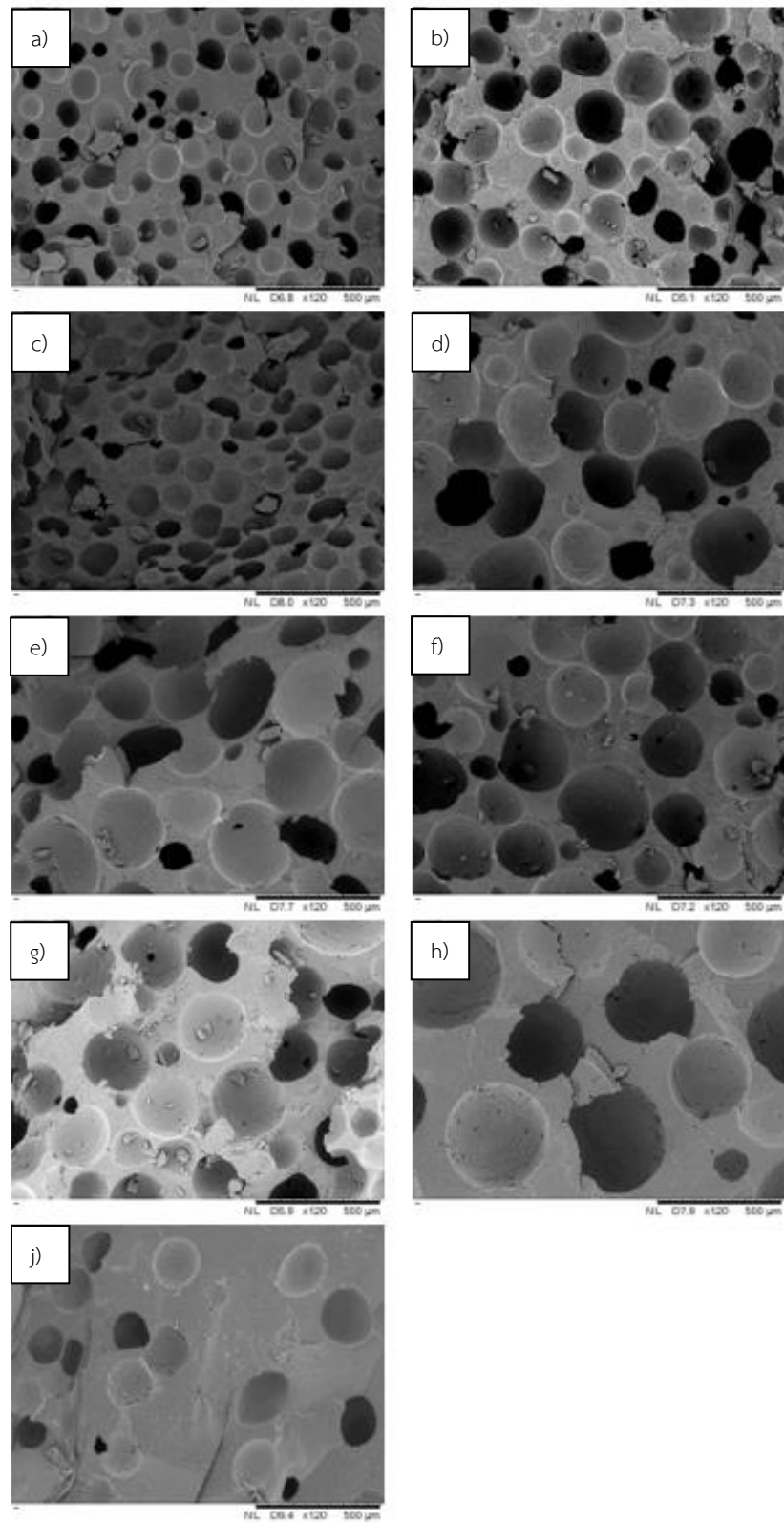
4.1.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟมชีวภาพระหว่างพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของสัณฐานวิทยาของภาพตัดขวางของโฟมชีวภาพ PLA/PBS ที่อัตราส่วนต่างกันพบว่า การผสมพอลิเมอร์ระหว่าง PLA และ PBS สามารถขึ้นรูปเป็นโฟมชีวภาพได้ เนื่องจากโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาในทุกสัดส่วนแสดงให้เห็นถึงรูพรุนที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนและโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาในทุกสัดส่วนแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของรูพรุน 70 - 350 ไมโครเมตร โดยขนาดของรูพรุนวัดโดยใช้โปรแกรม Image J นำภาพ SEM ของโฟมชีวภาพมาทำการวัดขนาดของรูพรุนทั้งหมดแล้วทำการหาค่าเฉลี่ย เมื่อพิจารณาขนาดเซลล์โฟมและปริมาณเซลล์โฟมพบว่าเมื่อปริมาณของ PBS เพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของเซลล์โฟมมีขนาดใหญ่ขึ้นและเมื่อเซลล์โฟมมีขนาดใหญ่ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.2 ปริมาณเซลล์โฟมที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณที่ลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.3

เนื่องจากการขึ้นรูปเป็นโฟมนั้นใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 150°C โดยอุณหภูมิดังกล่าวยังไม่ถึง T_m ของ PLA (160°C) ซึ่งส่งผลให้ melt strength ของโฟมมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้รูพรุนของโฟมชีวภาพในสัดส่วนของปริมาณที่มี PLA มากจะสามารถคงรูพรุนอยู่ได้ ในทางกลับกันอุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 150°C นั้นสูงกว่า T_m ของ PBS (105°C) ส่งผลให้ melt strength ของโฟมมีค่าต่ำ[14] ส่งผลให้รูพรุนของโฟมชีวภาพในสัดส่วนของปริมาณที่มี PLA น้อยจะไม่สามารถคงรูพรุนได้ทำให้อุณหภูมิเกิดการแตกออกและขยายออกไปรวมกันหลายรูจนเกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยผลที่ได้ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Zhang และคณะ[15] โดยในงานวิจัยดังกล่าวศึกษาเรื่อง โฟมชีวภาพ PBS/Carbon black ในสัดส่วน 80/20, 70/30 และ 60/40 เมื่อปริมาณของ PBS ในระบบมากขึ้นส่งผลให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งผลที่ได้ก็เป็นไปในทางเดียวกันกับงานวิจัยนี้นั้นคือเมื่อปริมาณ PBS มากขึ้นจะทำให้ขนาดของรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น

ตารางที่ 4.1 แสดงสัดส่วนการผสมของโฟมชีวภาพ PLA/PBS

PLA (%wt)	PBS (%wt)	PEG (%wt)	ADC (phr)	Density (g/cm^3)
80	0	20	1	0.54
64	16	20	1	0.68
56	24	20	1	0.72
48	32	20	1	0.78
40	40	20	1	0.82
32	48	20	1	0.83
24	56	20	1	0.86
16	64	20	1	0.91
0	80	20	1	1.06



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมชีวภาพระหว่าง PLA/PBS โดยใช้กำลังขยาย 120x

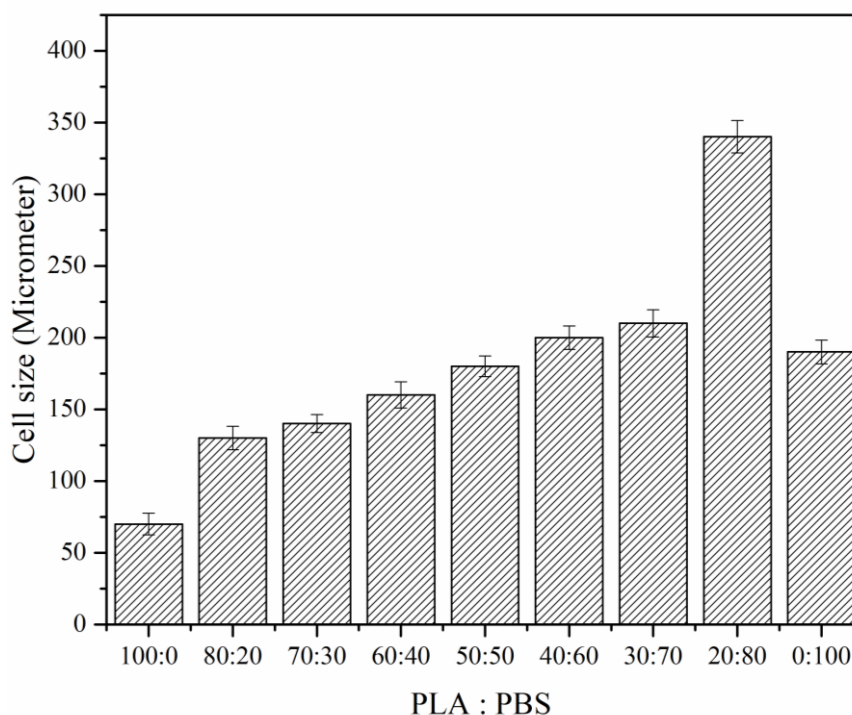
a) 100:0 b) 80:20 c) 70:30 d) 60:40 e) 50:50 f) 40:60 g) 30:70 h) 20:80 j) 0:100

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า Melt flow index (MFI) ของพอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ

Samples	MFI (g/10 min)	Viscosity (Pa • s)
Neat PLA	7.84	15013
PLA/PBS (80/20)	12.18	11213
PLA/PBS (70/30)	12.06	13013
PLA/PBS (60/40)	11.57	14694
PLA/PBS (50/50)	11.14	16044
PLA/PBS (40/60)	10.25	17650
PLA/PBS (30/70)	10.13	18505
PLA/PBS (20/80)	9.86	20117
Neat PBS	5.42	42629

อีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนคือ ความหนืด (Viscosity) โดยจากงานวิจัยศึกษาความหนืดด้วยการวัดค่าดัชนีการไหล (Melt flow index) ; MFI ด้วยเครื่อง Melt flow indexer โดยสภาวะในการทดสอบอยู่ที่อุณหภูมิ 150°C โดยความหนืดแปรผกผันกับค่าดัชนีการไหลซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนืดคือสัดส่วนในการผสมของพลาสติกชีวภาพ โดยพบว่าเมื่อปริมาณ PBS มากขึ้นความหนืดในระบบมีค่าสูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามกฎการผสมเนื่องจากค่า MFI ของ PBS มีค่า 5.42 g/10 นาที ซึ่งต่ำกว่า PLA ที่มีค่า MFI เท่ากับ 7.84 g/10 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งหมายความว่า PBS มีความหนืดสูงกว่า PLA เมื่อทำการผสมในสัดส่วนที่มีปริมาณ PBS มากขึ้นจะส่งผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น เมื่อความหนืดในระบบมีค่ามากขึ้นทำให้ไปขัดขวางการกระจายตัวของสารเร่งฟูเมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นโฟมจึงทำให้โฟมชีวภาพที่มีสัดส่วนของ PBS มากเกิดการรวมกลุ่มกันของสารเร่งฟูจนเป็นเหตุทำให้เกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอโดยผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลในงานวิจัยของ U. Meekum และคณะ[16] ซึ่งผลในงานวิจัยดังกล่าวเป็นการขึ้นรูปโฟมชีวภาพระหว่าง PBS และ ยางธรรมชาติ โดยพบว่าเมื่อความหนืดในระบบมากขึ้นจะทำให้การกระจายตัวของสารเร่งฟูกระจายตัวได้ไม่ดีเป็นผลทำให้โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของโฟมที่มีปริมาณยางธรรมชาติมากจะมีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าโฟมที่มีปริมาณยางธรรมชาติน้อย และหากพิจารณาปัจจัยของการละลาย (Solubility parameter) โดยพบว่าค่าการละลายของ PLA PBS และ ADC คือ 20.2, 9.2 และ 25.1 MPa^{1/2} [17] ซึ่งจะเห็นว่า PLA มีค่าการละลายที่ใกล้เคียงกับสารเร่งฟูชนิด Azodicarbonamide (ADC) มากกว่าจึงส่งผลให้โฟมชีวภาพที่มีปริมาณของ PLA มากจะ

ทำให้ ADC กระจายตัวได้ดีกว่าโพลีเมอร์ที่มีปริมาณของ PLA น้อยจึงทำให้พบรูพรุนขนาดเล็กกว่ากระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโพลีเมอร์และรูพรุน (Cell size) มีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับเมื่อมีปริมาณ PBS มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยผลการทดลองจากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยของ J.Charoenta และคณะ[18] โดยในงานวิจัยดังกล่าวเป็นการผสมพอลิเมอร์กับยางธรรมชาติโดยใช้สารเร่งฟูเป็น 4,4'-Oxybis (benzenesulfonylhydrazide) (OBSH) ซึ่งพบว่าสภาพผิวของ PBS และ ยางธรรมชาติ มีผลต่อการกระจายตัวของ OBSH แต่อย่างไรก็ตามโพลีเมอร์ชีวภาพของ PLA/PBS ปริมาณ 20/80 มีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่กว่าโพลีเมอร์ชีวภาพของ PLA/PBS ปริมาณ 0/100 เนื่องจาก ค่าการละลายของ PBS และ ADC ห่างกันมากจึงทำให้ ADC กระจายตัวในวัฏภาคของ PBS ได้ไม่ดี อีกทั้ง PBS มีความหนืดสูงทำให้ฟองก๊าซมีความดันไม่มากพอจึงเกิดรูพรุนขึ้นปริมาณที่น้อยและมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับ PLA/PBS ที่ปริมาณ 20/80 ซึ่งในสัดส่วนนี้ ADC จะไปรวมกันในวัฏภาคของ PLA แล้วเกิดการรวมกลุ่มกันจนมีรูพรุนขนาดใหญ่ที่สุด



รูปที่ 4.2 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบขนาดของรูพรุนของโพลีเมอร์ระหว่าง PLA/PBS

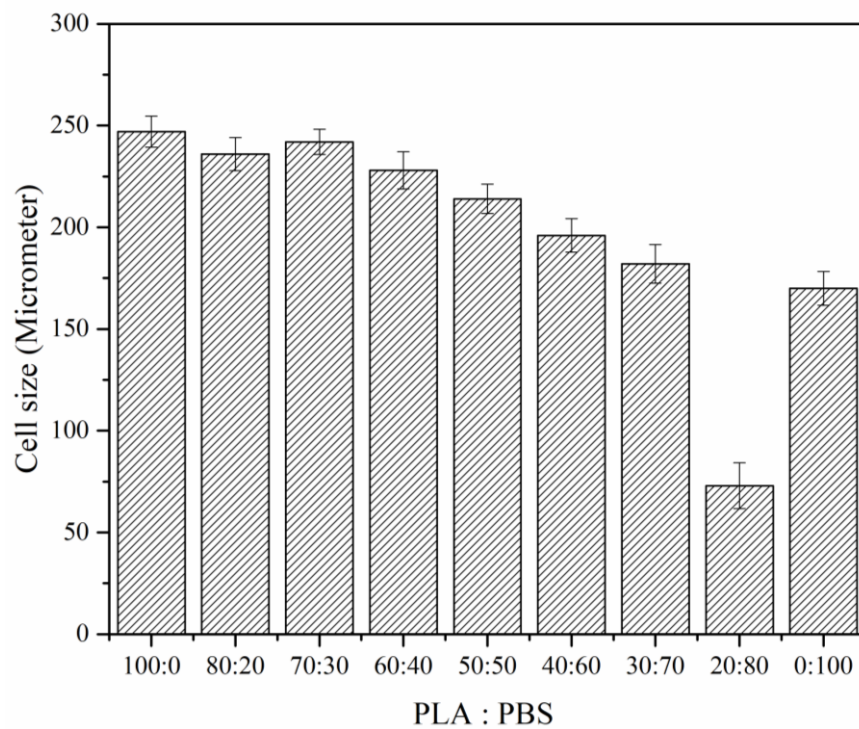
ปริมาณเซลล์โพลีเมอร์ที่เกิดขึ้นในโพลีเมอร์ชีวภาพระหว่าง PLA/PBS เมื่ออัตราส่วนการผสม PLA/PBS ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยค่า Cell density (N_f) ของโพลีเมอร์ชีวภาพระหว่าง PLA/PBS หรือจำนวนเซลล์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.1) [18]

$$N_f = \left(\frac{nM^2}{A} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{สมการที่ 4.1})$$

โดยที่ n คือ จำนวนเซลล์ใน SEM photomicrograph

M คือ กำลังขยายจากภาพ SEM micrograph

A คือ พื้นที่ของ Micrograph (cm^2)



รูปที่ 4.3 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบปริมาณรูพรุนของโพลีเมอร์ระหว่าง PLA/PBS

รูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นรูพรุนของโพลีชีวภาพระหว่าง PLA/PBS ที่มีอัตราส่วนผสมของ PLA/PBS ในปริมาณที่ต่างกัน พบว่าเมื่อปริมาณ PBS มากขึ้นส่งผลให้จำนวนเซลล์โพลีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ลดลงซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับขนาดของเซลล์โพลีโดยเมื่อเซลล์โพลีมีขนาดใหญ่จะทำให้จำนวนเซลล์โพลีมีปริมาณน้อยเกิดจากการรวมตัวกันของฟองแก๊สในขณะขึ้นรูปในทางกลับกันเมื่อปริมาณ PBS น้อยลงส่งผลให้จำนวนเซลล์โพลีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของโพลีชีวภาพมากขึ้นเนื่องจากที่ปริมาณ PBS น้อยจะมีขนาดเซลล์โพลีที่เล็กซึ่งขนาดเซลล์โพลีที่เล็กนั้นจะทำให้ผนังเซลล์ของโพลีขณะขึ้นรูปมีความแข็งแรงมากกว่าซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 4.3 ด้วยเหตุนี้ทำให้โพลีชีวภาพที่มีเซลล์โพลีขนาดเล็กไม่เกิดการแตกออกของผนังเซลล์จึงไม่เกิดการรวมตัวกันของเซลล์โพลีดังเช่นโพลีชีวภาพที่มีเซลล์โพลีขนาดใหญ่[19] โดยที่เซลล์โพลีขนาดใหญ่จะมีจำนวนเซลล์โพลีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรน้อย

ตารางที่ 4.3 แสดงความหนาแน่นของรูพรุนของโพลีระหว่างชีวภาพ PLA/PBS

Samples	จำนวนเซลล์โพลีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (cell/cm ³)
Neat PLA	248
PLA/PBS (80/20)	232
PLA/PBS (70/30)	240
PLA/PBS (60/40)	227
PLA/PBS (50/50)	216
PLA/PBS (40/60)	182
PLA/PBS (30/70)	176
PLA/PBS (20/80)	73
Neat PBS	172

4.1.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกของโพลีชีวภาพระหว่าง PLA/PBS

การศึกษาโครงสร้างผลึก (XRD patterns) ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่า XRD pattern ของ PBS จะปรากฏ diffraction peak ที่มุม 2θ ที่ตำแหน่งประมาณ 16° ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกในระนาบ (111) [20] สำหรับ PLA ปรากฏกราฟที่มีลักษณะเป็น broad peak แสดงถึงความเป็นอสัณฐานของ PLA ซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกในระนาบ (100) และ (200) ของ

ผลึกรูปแบบ α form และ β form ของ PLA [20] ซึ่ง PEG จะปรากฏ diffraction peak ที่มุม 2θ ที่ตำแหน่ง 19.3° และ 22.5° ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกในระนาบ (120) และ (032) [21]

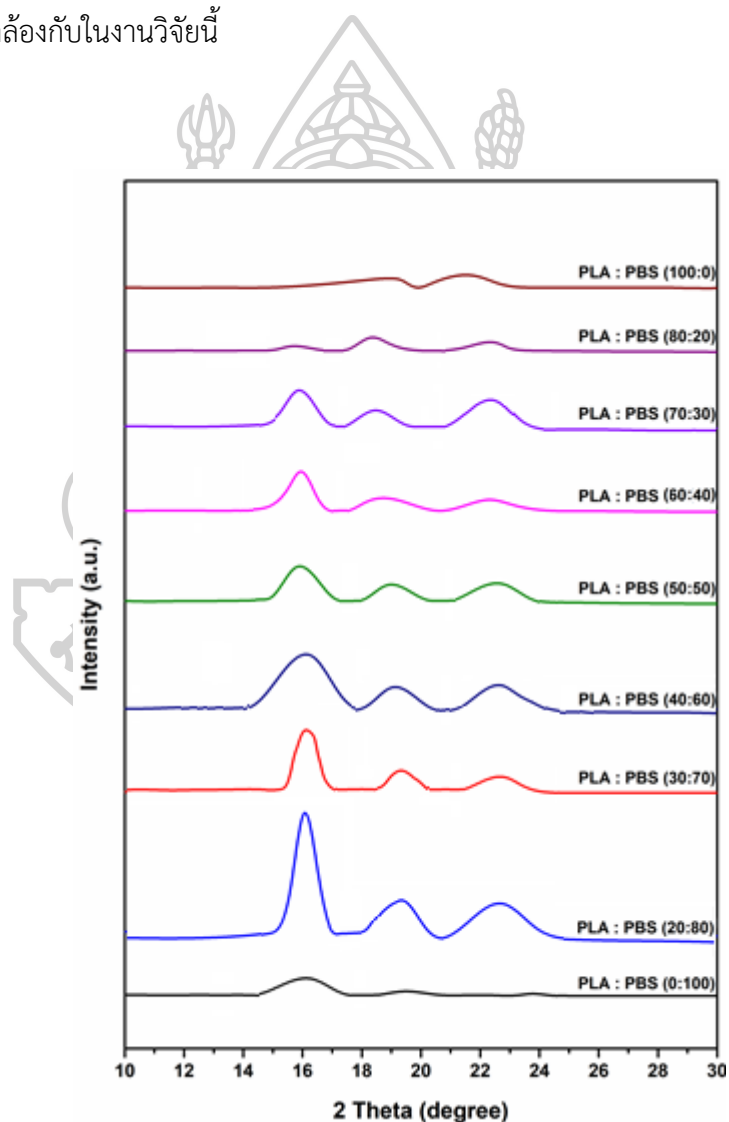
จากรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณาในส่วนของโพลีชีวภาพที่มีการเติมปริมาณ PLA/PBS ในสัดส่วนที่ต่างกันพบว่าความสูงของ diffraction peak ในตำแหน่งของ PBS จะสูงขึ้นซึ่งเมื่อปริมาณของ PBS เพิ่มขึ้นตำแหน่งของ diffraction peak ไม่เปลี่ยนแปลงจากตำแหน่งเดิมแสดงให้เห็นว่าการผสมพอลิเมอร์ระหว่าง PLA และ PBS ไม่ส่งผลให้โครงสร้างของผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับในงานวิจัยของ E. Hassan [22] โดยในงานวิจัยเป็นการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBS เช่นเดียวกับในงานวิจัยนี้โดยทั้งตำแหน่งของ diffraction peak อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับในงานวิจัย เมื่อปริมาณ PBS เพิ่มขึ้น diffraction peak ของโพลีชีวภาพสูงขึ้นเช่นเดียวกับในงานวิจัย อีกทั้งยังไม่มี การเปลี่ยนตำแหน่งของ diffraction peak เมื่อมีการเปลี่ยนสัดส่วนของพอลิเมอร์ผสมด้วยเช่นกันนอกจากนี้ XRD pattern ยังสามารถคำนวณหาปริมาณผลึกได้โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2 โดยผลการคำนวณได้ถูกนำไปแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5

$$\text{เปอร์เซ็นต์ปริมาณผลึก} = \frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟส่วนที่เป็นผลึก}}{\text{พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด}} \times 100\% \quad (\text{สมการที่ 4.2})$$

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณผลึกของโพลีชีวภาพระหว่าง PLA/PBS

Samples	X_c ของ PLA (%)	X_c ของ PBS (%)
Neat PLA	21	-
PLA/PBS (80/20)	15	10
PLA/PBS (70/30)	24	11
PLA/PBS (60/40)	18	14
PLA/PBS (50/50)	23	23
PLA/PBS (40/60)	27	32
PLA/PBS (30/70)	22	36
PLA/PBS (20/80)	26	46
Neat PBS	-	38

จากตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาในส่วนของคุณสมบัติผลึก (X_c) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4.2 พบว่า เมื่อปริมาณ PBS ในโพลีเอสเตอร์ระหว่าง PLA/PBS มากขึ้นจะทำให้มีปริมาณผลึกเพิ่มมากขึ้น ด้วยซึ่งเป็นไปตามกฎการผสมเนื่องจากโพลีเอสเตอร์ ระหว่าง PLA/PBS (100/0) มีปริมาณผลึก 12% และ โพลีเอสเตอร์ ระหว่าง PLA/PBS (0/100) มีปริมาณผลึก 38% เมื่อปริมาณ PBS สูงขึ้น จะทำให้ปริมาณผลึกสูงขึ้นด้วยดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ P. Cihal [23] โดยในงานวิจัยดังกล่าวเป็นการผสมระหว่าง PBS/CTA (Cellulose triacetate) พบว่าปริมาณผลึกของ PBS สูงกว่าปริมาณผลึกของ CTA เมื่อทำการผสมกันระหว่าง PBS และ CTA จะมีปริมาณผลึกที่ลดลงซึ่งสอดคล้องกับในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.4 XRD patterns ของโพลีเอสเตอร์ระหว่าง PLA/PBS

4.1.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของโพลีชีวภาพ PLA/PBS

การศึกษาสมบัติเชิงกลเป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่มีความสำคัญกับงานวิจัยในปัจจุบันค่อนข้างมาก เนื่องจากสมบัติเชิงกลสามารถบอกได้ถึงความแข็งแรงของวัสดุ ความทนทานของวัสดุรวมไปถึงสมบัติด้านความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสมหรือพอลิเมอร์คอมโพสิต โดยในงานวิจัยนี้จะทดสอบสมบัติเชิงกลโดยใช้สมบัติการต้านทานแรงกด (Flexural properties) โดยใช้มาตรฐาน ASTM D790 ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวนี้เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติการต้านทานแรงกดของโพลี โดยข้อมูลที่ต้องการจากการทดสอบสมบัติเชิงกลดังนี้ โมดูลัสจากการดัดงอ (Flexural modulus), ความแข็งแรงจากการดัดงอ (Flexural stress) และ การยืดตัว ณ จุดที่มีความแข็งแรงสูงสุด (Elongation at yield strength)

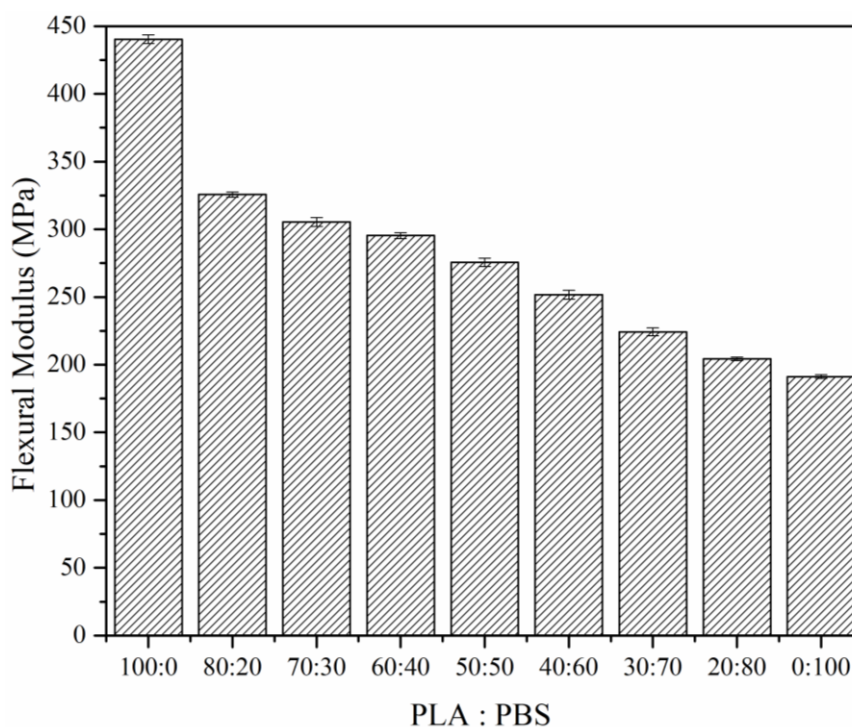
ตารางที่ 4.5 แสดงค่า Flexural Young's Modulus ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS

Samples	Flexural Young's Modulus (MPa)
Neat PLA	443.24 ± 2.23
PLA/PBS (80/20)	325.05 ± 1.26
PLA/PBS (70/30)	307.56 ± 2.64
PLA/PBS (60/40)	296.87 ± 1.48
PLA/PBS (50/50)	283.15 ± 2.11
PLA/PBS (40/60)	258.34 ± 2.16
PLA/PBS (30/70)	233.78 ± 1.98
PLA/PBS (20/80)	209.64 ± 1.37
Neat PBS	197.11 ± 1.54

จากรูปที่ 4.5 และตาราง 4.5 แสดงผลการทดสอบสมบัติการต้านทานการดัดงอของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ได้แก่ โมดูลัสของยังค์ (Young's modulus) โดยเป็นแผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Young's modulus ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS โดยเปลี่ยนอัตราส่วนในการผสมระหว่าง PLA และ PBS โดยสัดส่วนการผสมมีการเติมปริมาณ PEG 20% โดยน้ำหนักคงที่ พบว่าเมื่อปริมาณ PBS ในโพลีชีวภาพมากขึ้นทำให้ค่า Young's modulus ลดลงแสดงถึงความสามารถในการต้านทานการเสียรูปของโพลีชีวภาพน้อยลงซึ่งเกิดจากปัจจัยหลักสองปัจจัยคือ ขนาดรูพรุนและสมบัติ

ของพอลิเมอร์ผสมแต่ละชนิด เมื่อพิจารณาถึงขนาดรูพรุนจากรูปที่ 4.3 แสดงลักษณะของขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณ PBS มากขึ้นเมื่อพิจารณาลักษณะสัณฐานวิทยาของโพลีที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จะเห็นว่าขนาดของผนังเซลล์ที่เล็กกว่าโพลีที่มีรูพรุนขนาดเล็กเมื่อผนังเซลล์มีขนาดเล็กทำให้การรับแรงทำได้น้อยลงซึ่งจะเห็นได้ดังแสดงในตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาเชิงคุณภาพพบว่า Young's modulus ลดลงซึ่งเป็นไปตามกฎการผสมซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ R. Gendron และคณะ[24] โดยในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการขึ้นรูปโพลี PLA ด้วยเทคนิค Supercritical Carbon dioxide โดยพบว่าเมื่อผนังเซลล์ของโพลีมีขนาดเล็กทำให้ค่า Young's modulus มีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับในงานวิจัยนี้ อีกหนึ่งปัจจัยคือสมบัติของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผสมซึ่งโพลีชีวภาพ PLA/PBS ที่มีอัตราส่วน PLA/PBS 100/0 มีค่า Young's modulus เท่ากับ 443 ± 2.23 MPa และโพลีชีวภาพ PLA/PBS ที่มีอัตราส่วน PLA/PBS 0/100 มีค่า Young's modulus เท่ากับ 197 ± 1.54 MPa จะเห็นว่าเมื่อปริมาณ PBS ในโพลีชีวภาพมากขึ้นจะทำให้โพลีชีวภาพ PLA/PBS มีค่า Young's modulus ลดลงซึ่งเป็นไปตามกฎการผสมซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ L. Jompang [25] โดยงานวิจัยดังกล่าวศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ด้วยเทคนิค Melt spinning เมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า PLA/PBS ปริมาณ 100/0 มีค่า Young's modulus เท่ากับ 2 GPa และ PLA/PBS 0/100 มีค่า Young's modulus เท่ากับ 0.5 GPa เมื่อปริมาณของ PBS ลดลงค่า Young's modulus ของพอลิเมอร์ผสมจะลดลงด้วยซึ่งเป็นไปตามกฎการผสม[25]

จากรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของโพลีชีวภาพด้านความแข็งแรงในการกด (Flexural stress) โดยเป็นแผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Flexural stress ของโพลีชีวภาพโดยเปลี่ยนอัตราส่วนในการผสมระหว่าง PLA และ PBS โดยสัดส่วนการผสมมีการเติมปริมาณ PEG 20% โดยน้ำหนักคงที่ พบว่าเมื่อปริมาณ PBS ในโพลีชีวภาพมากขึ้นทำให้ค่า Flexural stress ลดลงแสดงถึงความสามารถในการรับแรงของโพลีชีวภาพน้อยลงโดยแรงที่มากกระทำในลักษณะการกดซึ่งเกิดจากปัจจัยหลักสองปัจจัยคือ ขนาดรูพรุนและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมแต่ละชนิดเช่นเดียวกับเหตุผลที่กล่าวอธิบายในด้าน Young's modulus เมื่อพิจารณาเชิงคุณภาพพบว่า Flexural stress ลดลงซึ่งเป็นไปตามกฎการผสม



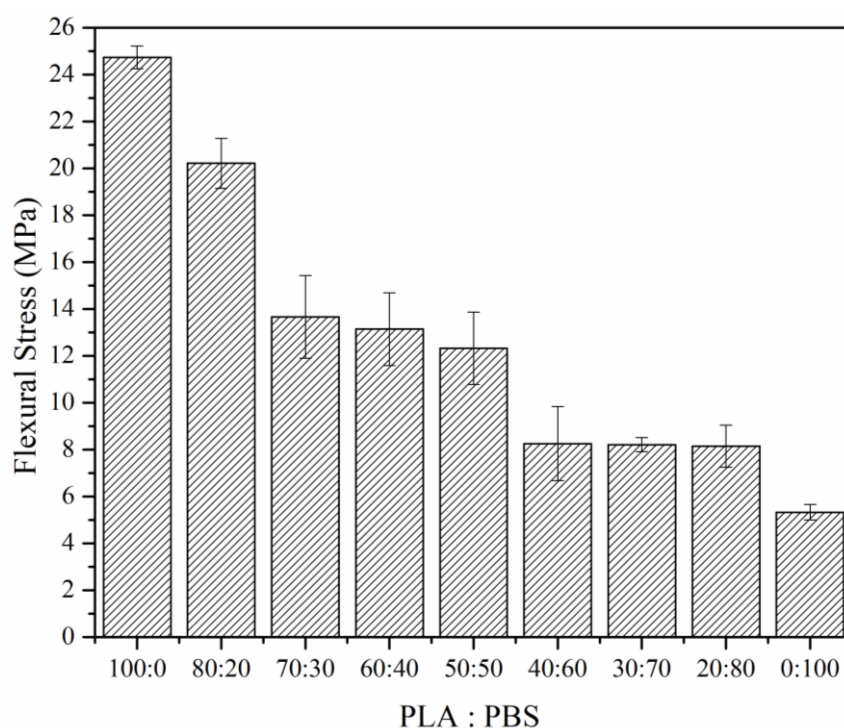
รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Young's modulus ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS

ตารางที่ 4.6 แสดงค่า Flexural stress ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS

Samples	Flexural Stress (MPa)
Neat PLA	24.80 ± 1.34
PLA/PBS (80/20)	20.13 ± 2.25
PLA/PBS (70/30)	13.70 ± 4.45
PLA/PBS (60/40)	12.98 ± 4.48
PLA/PBS (50/50)	12.63 ± 4.57
PLA/PBS (40/60)	8.41 ± 3.17
PLA/PBS (30/70)	8.35 ± 1.38
PLA/PBS (20/80)	8.23 ± 2.54
Neat PBS	5.21 ± 1.44

เมื่อพิจารณาในส่วนของ Flexural stress เป็นการใช้ในส่วน Flexural stress at yield ไม่สามารถใช้ในส่วน Flexural stress at break เนื่องจากสัดส่วนในการผสมของโพลีชีวภาพที่มีปริมาณ

ของ PBS สูงจะไม่เกิดการแตกหักจึงเป็นการวัดค่า Flexural stress at yield ในการรายงานในงานวิจัยนี้ เมื่อพิจารณาค่า Flexural stress ของ PLA/PBS ที่อัตราส่วน 70/30, 60/40 และ 50/50 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญรวมถึงค่า Flexural stress ของ PLA/PBS ที่อัตราส่วน 40/60, 30/70 และ 20/80 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.6 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Flexural stress ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS

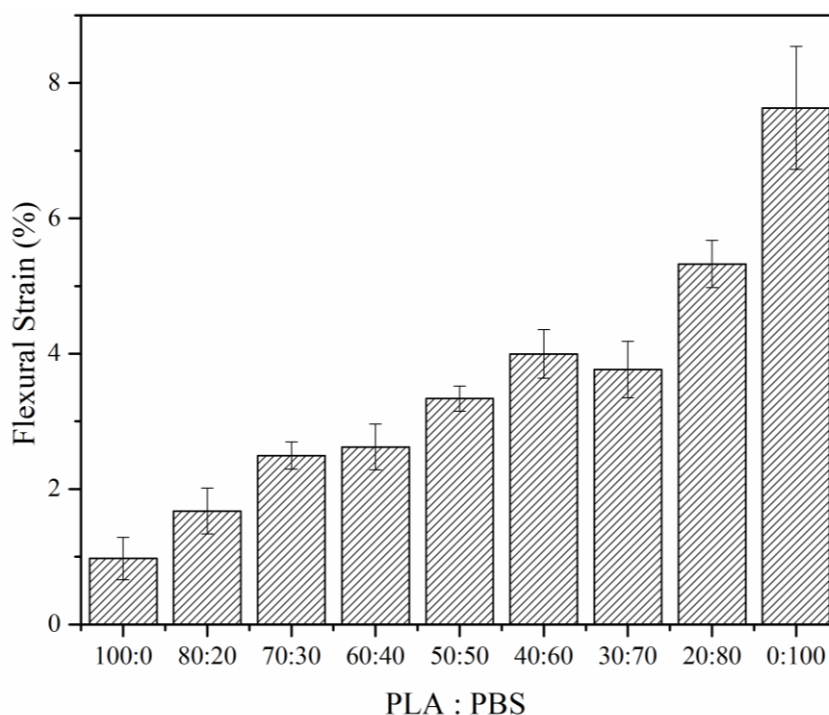
จากรูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ด้านความสามารถในการยืดตัวระหว่างโพลีชีวภาพ PLA/PBS โดยทั่วไปแล้ว PBS เป็นพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการยืดหยุ่นมากเมื่อเทียบกับ PLA จึงส่งผลให้เมื่อปริมาณ PBS ในโพลีชีวภาพมีสัดส่วนในการผสมมากขึ้นโพลีชีวภาพมีความสามารถในการยืดหยุ่นสูงขึ้นซึ่งการวัดค่าความสามารถในการยืดหยุ่นนั้นจะวัดค่าเป็น Elongation at yield strength โดยค่า Elongation at yield strength ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 100/0 มีค่า 0.97% และ ค่า Elongation at yield strength ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 0/100 มีค่า 7.64% ซึ่งเป็นไปตามกฎการผสมซึ่งในงานวิจัยนี้การทดสอบสมบัติเชิงกลโดยการกดอัดนั้นจะกดชิ้นงานโดยกำหนดระยะในการกดไม่เกิน

10% ซึ่งตามมาตรฐานที่ใช้งานทดสอบนี้ใช้ระยะยืดอยู่ที่ 8% แต่เมื่อพิจารณาโฟมชีวภาพ PLA/PBS ในสัดส่วนการผสมที่ 40/60 และ 30/70 ไม่เป็นไปตามกฎการผสมแต่เมื่อทำการคำนวณเชิงสถิติพบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ N. Lopattananon และคณะ [26] โดยในงานวิจัยดังกล่าวเป็นการขึ้นรูปโฟม EVA/NR/PP และใช้ ADC เป็นสารเร่งฟูโดยพบว่ายางธรรมชาติมีความสามารถในการยืดหยุ่นสูงกว่า EVA และ PP เมื่อมีการเติมปริมาณยางธรรมชาติมากขึ้น โฟม EVA/NR/PP มีค่า Elongation at yield strength สูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยนี้เช่นกัน

พิจารณาดารงที่ 4.7 แสดงค่า Elongation at yield strength ของโฟมชีวภาพ PLA/PBS พบว่าเป็นไปตามกฎการผสม เนื่องจากปริมาณในการเติม PBS มากขึ้นทำให้โฟมชีวภาพ PLA/PBS มีค่า Elongation at yield strength สูงขึ้น

ตารางที่ 4.7 แสดงค่า Elongation at yield strength ของโฟมชีวภาพ PLA/PBS

Samples	Elongation at yield strength (%)
Neat PLA	0.97 ± 0.54
PLA/PBS (80/20)	1.64 ± 0.59
PLA/PBS (70/30)	2.73 ± 0.35
PLA/PBS (60/40)	2.82 ± 0.57
PLA/PBS (50/50)	3.45 ± 0.39
PLA/PBS (40/60)	4.03 ± 0.67
PLA/PBS (30/70)	3.84 ± 0.74
PLA/PBS (20/80)	5.13 ± 0.68
Neat PBS	7.48 ± 1.37



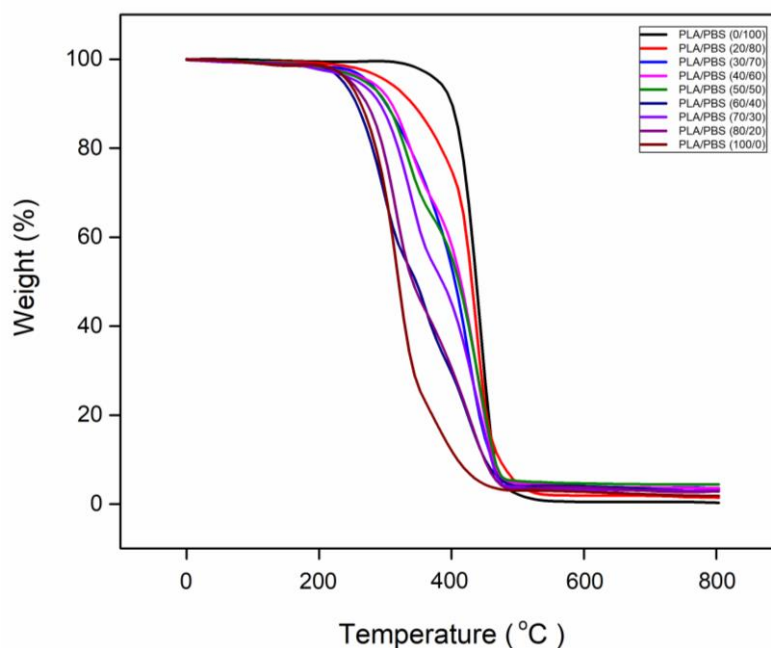
รูปที่ 4.7 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Elongation at yield strength ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS

4.1.4 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของโพลีชีวภาพระหว่าง PLA/PBS

4.1.4.1 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ด้วยเทคนิค TGA

รูปที่ 4.8 แสดง TGA thermogram ของโพลีชีวภาพที่สัดส่วนของ PLA/PBS แตกต่างกันกันพบว่าโพลีชีวภาพมีการสลายตัวทางความร้อน 3 ชั้น ชั้นที่ 1 ปรากฏที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้สารเร่งฟู Azodicarbonamide (ADC) เกิดการแตกตัวเป็นฟองแก๊ส ซึ่งแสดงปฏิกิริยาการแตกตัว ชั้นที่ 2 เป็นขั้นการสลายตัวของ PLA ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 280 ถึง 413 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสลายตัวของ PLA ในขั้นนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณ PLA ที่ผสมในโพลีชีวภาพโดยพบว่าโพลีชีวภาพที่มีปริมาณ PLA มากจะใช้ อุณหภูมิที่ทำให้ PLA เกิดการสลายตัวสูงในขณะที่โพลีชีวภาพที่มีปริมาณ PLA น้อยจะใช้อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสลายตัวของ PLA ต่ำกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.8 เนื่องจาก PLA บริสุทธิ์มีการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 280 องศาเซลเซียส และมีอัตราการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส ทั้งนี้การที่มีปริมาณในโพลีชีวภาพที่มี PLA ในการผสมไม่เท่ากันจะส่งผลต่อสมบัติเสถียรภาพทางความร้อนของโพลีชีวภาพดังปรากฏในตารางที่ 4.8 โดยโพลีชีวภาพที่มี

ปริมาณ PLA สูงจะมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวสูงที่สูงกว่าโพลีที่มีปริมาณการผสมของ PLA ที่ต่ำแต่ อุณหภูมิเริ่มต้นที่ทำให้เกิดการสลายตัวของ PLA มีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ขั้นที่ 3 เป็นขั้นการ สลายตัวของ PBS ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 387 ถึง 495 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับ ปริมาณ PBS ที่ผสมในโพลีชีวภาพโดยพบว่าโพลีชีวภาพที่มีปริมาณ PBS มากจะใช้อุณหภูมิที่ทำให้ PBS เกิดการสลายตัวสูงในขณะที่โพลีชีวภาพที่มีปริมาณ PBS น้อยจะใช้อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการ สลายตัวของ PBS ต่ำกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.8 เนื่องจาก PBS บริสุทธิ์มีการสลายตัวทางความร้อน ที่อุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 387 องศาเซลเซียส และมีอัตราการสลายตัวสูงที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 435 องศาเซลเซียส ทั้งนี้การที่มีปริมาณในโพลีชีวภาพที่มี PBS ในการผสมไม่เท่ากันจะส่งผลต่อ สมบัติเสถียรภาพทางความร้อนของโพลีชีวภาพดังปรากฏในตารางที่ 4.8 โดยโพลีชีวภาพที่มีปริมาณ PBS สูงจะมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวสูงที่สูงกว่าโพลีที่มีปริมาณการผสมของ PBS ที่ต่ำแต่อุณหภูมิ เริ่มต้นที่ทำให้เกิดการสลายตัวของ PBS มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เมื่อพิจารณาในส่วนของโพลีชีวภาพ อัตราการสลายตัวของโพลีชีวภาพก็จะอยู่ในช่วง 280 ถึง 495 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ระหว่างช่วงโพลี ชีวภาพที่มีปริมาณ PLA บริสุทธิ์และ PBS บริสุทธิ์ เมื่อพิจารณาในช่วงสุดท้ายของการเผาไหม้พบว่ามี บางสัดส่วนของโพลีชีวภาพเผาไหม้ไม่หมดทั้งนี้เนื่องจากการเผาไหม้ใช้บรรยากาศเป็นไนโตรเจนจึงมี ซ้ำถ้าปกคลุมที่ผิวแล้วเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 4.8 TGA thermogram ของโพลีชีวภาพที่สัดส่วนของ PLA/PBS ต่างกัน

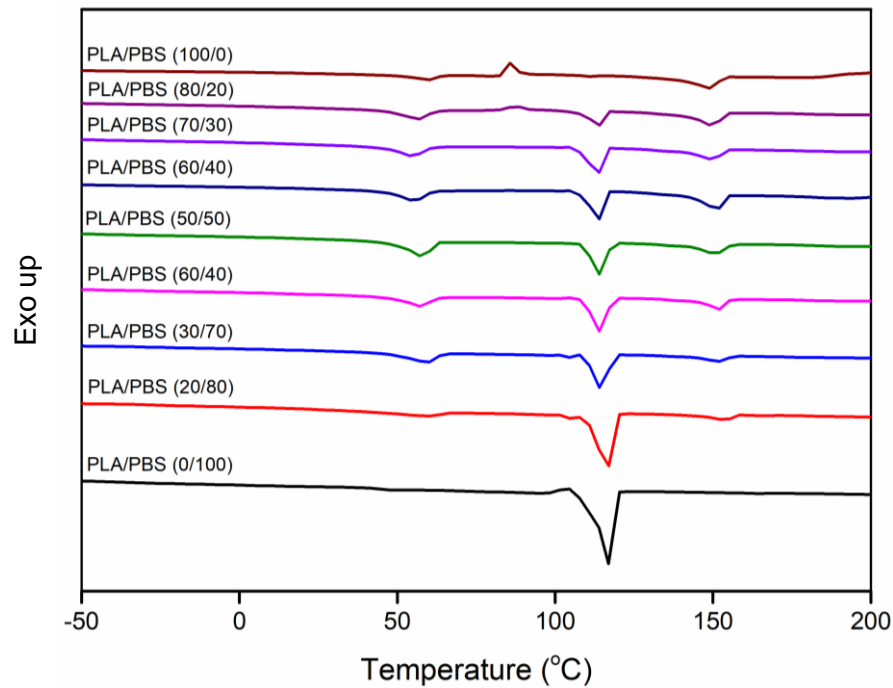
ตารางที่ 4.8 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของโพลีชีวภาพ PLA/PBS

Samples	T _{d,1} (°C)	T _{d,2} (°C)
Neat PLA	280	-
PLA/PBS (80/20)	286	394
PLA/PBS (70/30)	289	385
PLA/PBS (60/40)	293	413
PLA/PBS (50/50)	294	410
PLA/PBS (40/60)	296	397
PLA/PBS (30/70)	294	388
PLA/PBS (20/80)	287	396
Neat PBS	-	387

4.1.4.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)

การศึกษาผลของอัตราส่วนการผสมการผสม PLA และ PBS ของโพลีชีวภาพต่อสมบัติทางความร้อนโดยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) แสดงดังรูปที่ 4.9 ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 250 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 2 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งในการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC จะศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้แก่ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass-Rubbery transition temperature, T_g) อุณหภูมิตกผลึกขณะให้ความร้อน (Cold crystallization temperature, T_{cc}) อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) และปริมาณผลึก (Crystallinity) โดยการอธิบายผลการศึกษาจะแบ่งออกเป็นสามช่วงคือ การให้ความร้อนครั้งที่ 1 (First heating) การหล่อเย็น (Cooling) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (Second heating) ตามลำดับ

การให้ความร้อนครั้งที่ 1 (First heating)



รูปที่ 4.9 กราฟแสดง Differential scanning calorimetry (DSC) ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ในการให้ความร้อนขั้นที่ 1 (First heating)

จากตารางที่ 4.9 เมื่อพิจารณาในส่วนของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass-Rubbery transition temperature, T_g) ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS พบว่าค่า T_g ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 100/0 ปรากฏอุณหภูมิที่ 61.37 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มปริมาณ PBS ในโพลีชีวภาพพบว่าค่า T_g ของโพลีชีวภาพมีค่าลดลงเนื่องจากส่วนที่เป็นอสังฐานของ PBS จะเหนี่ยวนำให้ PLA เกิดการสั่นไหวได้ง่ายโดยค่า T_g ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ R. Homklin และคณะ[27] โดยในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS พบว่าเมื่อปริมาณ PBS มากขึ้นทำให้ค่า T_g ของพลาสติกชีวภาพมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าที่ได้จาก DSC thermogram ในขั้น First heating ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ที่อัตราส่วนต่างกัน

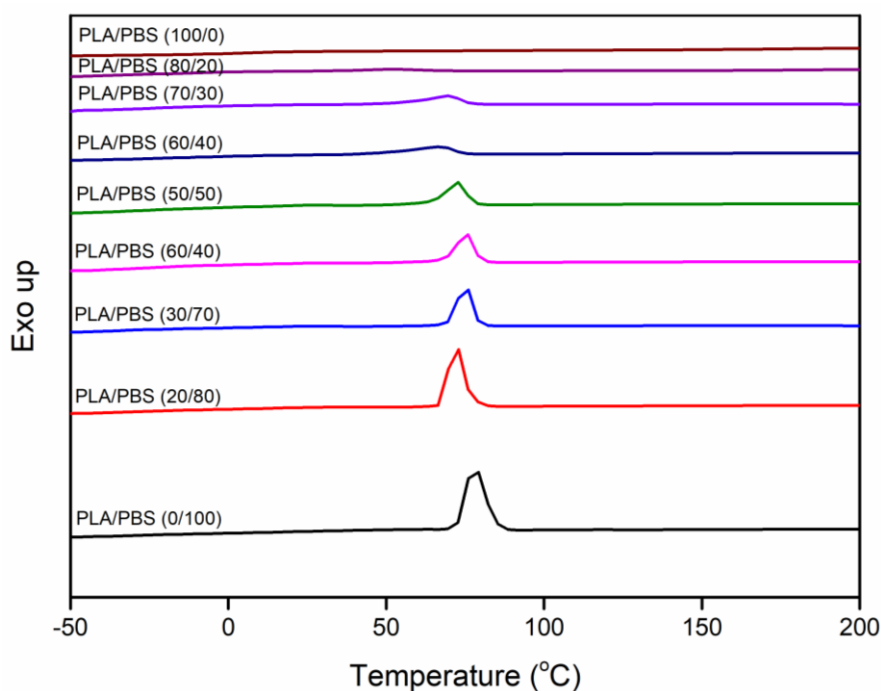
Samples	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_m PLA (°C)	T_m PBS (°C)	X_c PLA (%)	X_c PBS (%)
Neat PLA	61.37	83.92	148.49	-	32.67	-
PLA/PBS (80/20)	56.76	87.56	149.12	113.54	19.32	6.23
PLA/PBS (70/30)	55.51	-	148.96	113.49	16.35	9.67
PLA/PBS (60/40)	55.35	-	151.45	113.92	16.66	16.06
PLA/PBS (50/50)	55.07	-	150.71	115.03	15.75	21.56
PLA/PBS (40/60)	51.83	-	151.79	114.94	13.24	25.89
PLA/PBS (30/70)	50.92	-	151.48	115.31	9.80	29.20
PLA/PBS (20/80)	49.87	-	153.80	116.95	6.51	43.22
Neat PBS	-	104.56	-	116.52	-	46.51

ในขณะที่ให้ความร้อนแก่โพลีชีวภาพ PLA/PBS พบพีคของการคายพลังงาน (Exothermic peak) อยู่ในช่วง 80 ถึง 110 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นถึงการเกิดผลึกขณะได้รับความร้อนโดยพฤติกรรมดังกล่าวจะแสดงอุณหภูมิตกผลึกขณะให้ความร้อน (Cold crystallization temperature, T_{cc}) ที่โพลีชีวภาพ PLA/PBS พบว่าค่า T_{cc} ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 100/0 ปรากฏอุณหภูมิอยู่ที่ 86.28 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มปริมาณ PBS ในโพลีชีวภาพพบว่าค่า T_{cc} ของโพลีชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากขณะให้ความร้อนส่วนที่เป็นอสัณฐานของ PBS เกิดการเคลื่อนไหวได้ง่ายกว่าและเร็วกว่า PLA เนื่องจาก T_g ของ PBS มีค่าต่ำกว่า PLA ทำให้สายโซ่ของ PBS เคลื่อนไหวได้ง่ายกว่า PLA จึงเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ง่ายขึ้นเมื่อปริมาณ PBS ในโพลีชีวภาพสูงขึ้น

ในขณะที่ให้ความร้อนกับโพลีชีวภาพพบ Endothermic peak ซึ่งเป็นพีคแสดงอุณหภูมิในการหลอมผลึกในโพลีชีวภาพที่มีการผสมระหว่าง PLA และ PBS โดยจะพบพีคของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด โดย T_m ของ PLA จะแสดงค่าประมาณ 150 องศาเซลเซียส และ T_m ของ PBS จะแสดงค่าประมาณ 113 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าเมื่อปริมาณ PBS มากขึ้นจะทำให้ T_m ของโพลีชีวภาพทั้งในส่วนของ PLA และ PBS ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อนำไปคำนวณเชิงสถิติพบว่าค่า T_m ของโพลีชีวภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญสอดคล้องกับงานวิจัยของ T. Qiu[28] และคณะโดยในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS พบว่าเมื่อ

ปริมาณ PBS ในพอลิเมอร์ชีวภาพมากขึ้นค่า T_m ของพอลิเมอร์ชีวภาพไม่ต่างกันมากนักจึงสรุปได้ว่าค่า T_m ของพอลิเมอร์ชีวภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ขั้นตอนการหล่อเย็น (Cooling)



รูปที่ 4.10 กราฟแสดง Differential scanning calorimetry (DSC) ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ในขั้นตอนหล่อเย็น (Cooling)

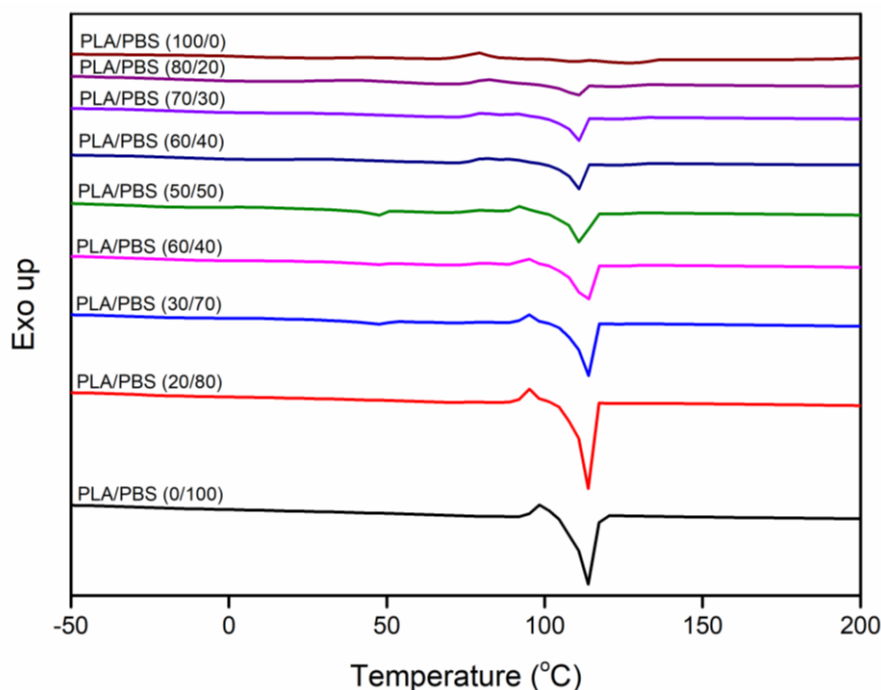
เมื่อพิจารณา DSC thermogram ในขั้นตอนการหล่อเย็นพบว่าโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 100/0 ไม่มีการตกผลึกในกระบวนการหล่อเย็นแต่เมื่อปริมาณ PBS มากขึ้นพบว่า T_c มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าโพลีชีวภาพ PLA/PBS เกิดผลึกได้เร็วขึ้นเมื่อปริมาณ PBS มากขึ้นกล่าวคือใช้เวลาในการหล่อเย็นเพียงเล็กน้อยก็สามารถเกิดผลึกได้เนื่องจากปริมาณ PBS ที่มากขึ้นเหนี่ยวนำให้โพลีชีวภาพในระบบพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PBS เกิดผลึกได้ง่ายขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.10 จะเห็นว่าโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 0/100 แสดงค่า T_c อยู่ที่ 77.93 องศาเซลเซียสแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการหล่อเย็นโพลีชีวภาพลงมาถึงอุณหภูมิ 77.93 องศาเซลเซียสก็สามารถทำให้โพลีชีวภาพเกิดผลึกได้เมื่อเทียบกับโพลีชีวภาพ PLA/PBS ในปริมาณอื่น จะเห็นว่าโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 0/100 เกิดผลึกได้เร็วที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ O. Viengin และคณะ[29] โดยในงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBS โดยมีการใช้สารยึดยืดสายโซ่

(Chain extender) เมื่อพิจารณาในส่วนของเสถียรภาพทางความร้อนโดยเทคนิค DSC พบว่าเมื่อปริมาณ PBS มากขึ้นจะเห็นว่า T_c ของพอลิเมอร์ชีวภาพมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณ PBS ที่มากขึ้นเหนี่ยวนำให้พอลิเมอร์ชีวภาพในระบบพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PBS เกิดผลึกได้ง่ายกว่าพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีปริมาณ PLA มาก ซึ่งพอลิเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 100/0 ไม่แสดงค่า T_c แสดงให้เห็นถึงไม่มีการตกผลึกในกระบวนการหล่อเย็น เช่นเดียวกับกับผลในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าที่ได้จาก DSC thermogram ในขั้นการหล่อเย็นของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ที่อัตราส่วนต่างกัน

Samples	T_c (°C)
Neat PLA	-
PLA/PBS (80/20)	52.12
PLA/PBS (70/30)	66.72
PLA/PBS (60/40)	69.48
PLA/PBS (50/50)	72.62
PLA/PBS (40/60)	71.69
PLA/PBS (30/70)	74.77
PLA/PBS (20/80)	75.14
Neat PBS	77.93

การให้ความร้อนครั้งที่ 2 (Second heating)

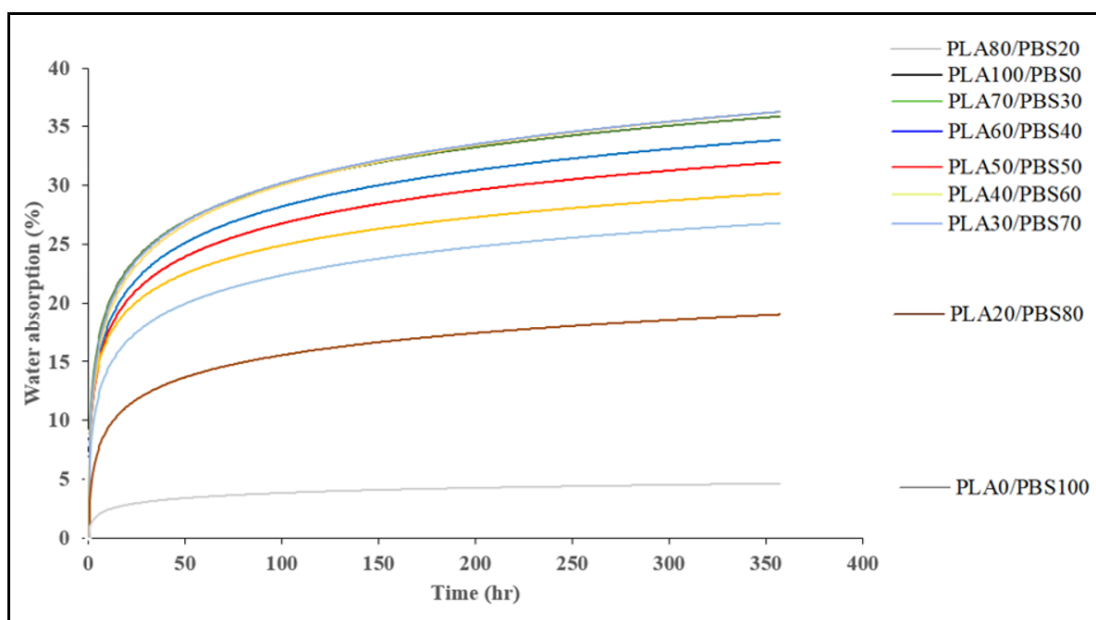


รูปที่ 4.11 กราฟแสดง Differential scanning calorimetry (DSC) ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ในการให้ความร้อนขั้นที่ 2 (Second heating)

จากรูปที่ 4.11 แสดง Differential scanning calorimetry (DSC) ของโพลีชีวภาพในการให้ความร้อนขั้นที่ 2 (Second heating) พบว่าไม่ปรากฏพีค T_{cc} ของโพลีชีวภาพดังนั้นจึงไม่สามารถเห็นพีค T_m ของ PLA แต่ยังคงเห็นพีค T_g แสดงใน DSC thermogram เมื่อพิจารณากราฟ DSC thermogram ในช่วงอุณหภูมิ 90 ถึง 100 องศาเซลเซียส จะปรากฏพีคของ Re-crystallization temperature (T_{rc}) เป็นพีคขนาดเล็กที่แสดงก่อนพีคของ T_m ของ PBS ที่แสดงประมาณ 115 องศาเซลเซียส จะเห็นว่า T_{rc} จะแสดงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมผลึก ซึ่งอธิบายพฤติกรรมการตอบสนองด้วยความร้อนของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ได้ว่า ในขั้นตอนการหล่อเย็นด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นขั้นตอนในการทำให้ PBS เย็นตัวแล้วตกผลึกแต่ในขั้นตอนดังกล่าวนี้ไม่สามารถทำให้ PBS ตกผลึกได้อย่างสมบูรณ์ทำให้เมื่อมีการให้ความร้อนในครั้งที่สองจึงเกิดพีคดูดความร้อนขึ้นที่ตำแหน่ง 90 ถึง 100 องศาเซลเซียสก่อนถึงอุณหภูมิหลอมเหลวของ PBS ที่ตำแหน่งประมาณ 115 องศาเซลเซียส

4.1.5 การศึกษาสมบัติการดูดซับของโพลีชีวภาพระหว่าง PLA/PBS

จากรูปที่ 4.12 เป็นการศึกษาสมบัติการดูดซับของโพลีชีวภาพระหว่าง PLA/PBS โดยทำการทดสอบการดูดซับน้ำเป็นเวลา 2 สัปดาห์จนพบว่าน้ำหนักของโพลีชีวภาพที่ใช้ในการทดสอบไม่เพิ่มขึ้นแล้วดังรูปที่ 4.12 ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณของ PBS ในโพลีชีวภาพมากขึ้นจะทำให้โพลีชีวภาพดูดซับน้ำได้น้อยลงในทางกลับกันเมื่อปริมาณของ PBS น้อยลงก็จะทำให้โพลีชีวภาพสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของขนาดของเซลล์โพลีและอิทธิพลของความเป็นขั้วของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผสมของ PLA/PBS [30]



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับของโพลีชีวภาพระหว่าง PLA/PBS

พิจารณาในส่วนของอิทธิพลของขนาดเซลล์โพลีที่มีผลต่อการดูดซับน้ำ พิจารณาจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพลีชีวภาพจากรูปที่ 4.1 เมื่อปริมาณ PBS ในโพลีชีวภาพมากขึ้นทำให้ขนาดรูพรุนของโพลีชีวภาพใหญ่ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.2 เมื่อรูพรุนของโพลีชีวภาพมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ปริมาณเซลล์โพลีต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.3 เมื่อปริมาณเซลล์โพลีต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ลดลงทำให้การดูดซับน้ำเข้าไปยังโพลีชีวภาพมีปริมาณลดลงด้วยเนื่องจากน้ำจะถูกดูดซับเข้าไปยังตัวรูพรุนของโพลีชีวภาพเมื่อปริมาณรูพรุนน้อยลงน้ำที่จะถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนจะมีปริมาณที่ลดลงด้วย โดยโพลีชีวภาพที่มีปริมาณ PLA มากจะมีความสามารถในการดูดซับที่ 36.14% โดยน้ำหนักและเมื่อปริมาณ PLA น้อยลงจะมีความสามารถในการดูดซับที่ 4.31% ดังนั้นค่าการดูดซับน้ำ

ของโพลีเมอร์ชีวภาพจะอยู่ในช่วง 4.31% - 36.14% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ W. Chow และคณะ [31] โดยในงานวิจัยดังกล่าวเป็นการผสมระหว่างโพลีเมอร์ PLA/NR เมื่อปริมาณ PLA มากขึ้นพบว่าการกระจายตัวของสารเร่งฟลูออรีนเซลลูโลสโพลีเมอร์มีขนาดคงที่มากกว่า โพลีเมอร์ PLA/NR ที่มีปริมาณ PLA น้อยทำให้เมื่อปริมาณ PLA น้อยขนาดของรูพรุนจะใหญ่ความสามารถในการดูดซับน้ำจะน้อยลง

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าการดูดซับของน้ำของโพลีเมอร์ชีวภาพระหว่าง PLA/PBS

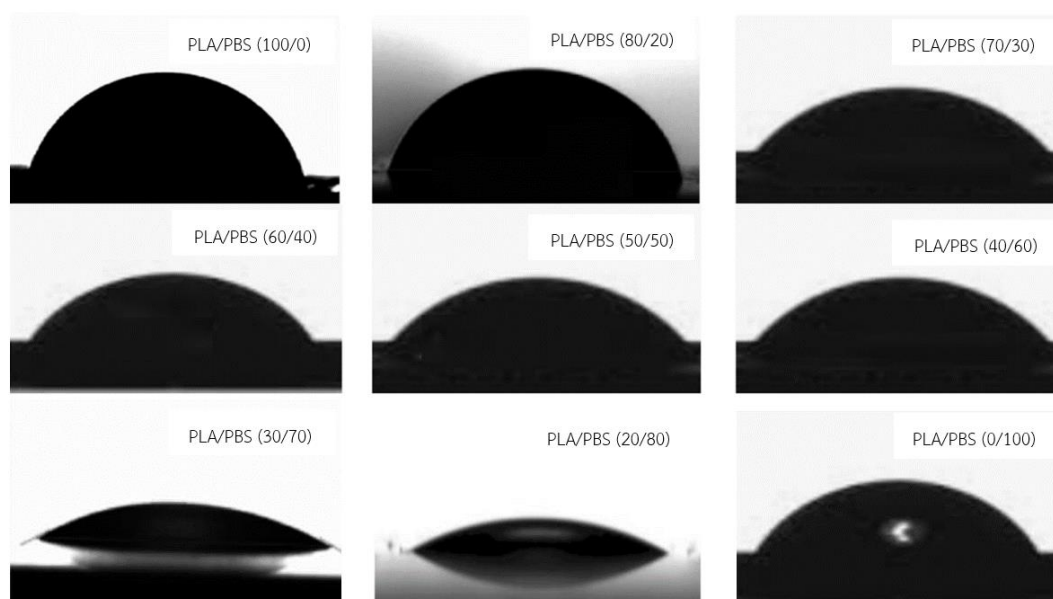
Samples	การดูดซับน้ำ (%)
Neat PLA	36.14
PLA/PBS (80/20)	38.22
PLA/PBS (70/30)	37.13
PLA/PBS (60/40)	32.77
PLA/PBS (50/50)	28.49
PLA/PBS (40/60)	26.13
PLA/PBS (30/70)	24.12
PLA/PBS (20/80)	18.53
Neat PBS	4.31

เมื่อพิจารณาอัตราเร็วในการดูดซับน้ำในช่วงแรกพบว่าโพลีเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS ที่มีขนาดรูพรุนใหญ่จะมีอัตราเร็วในการดูดซับน้ำที่เร็วกว่าโพลีเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก เนื่องจากการดูดซับที่ผิวของโพลีเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS ที่มีปริมาณ PLA น้อยจะมีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าโพลีเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS ที่มีปริมาณ PLA มาก โดยสามารถดูได้จากตารางที่ 4.12 ซึ่งเป็นค่า Contact angle เมื่อ Contact angle มีค่าน้อยแสดงถึงความสามารถในการดูดซับน้ำที่ผิวได้ดีในทางกลับกันเมื่อ Contact angle มีค่ามากแสดงถึงความสามารถในการดูดซับน้ำที่ผิวได้ไม่ดี แต่เมื่อพิจารณาโพลีเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS ที่มีแต่สัดส่วน 0/100 กลับพบว่ามีความ Contact angle เท่ากับ 45.20° ซึ่งสูงกว่าโพลีเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS ที่มีสัดส่วนของ PBS มาก เนื่องจาก โพลีเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS ที่มีแต่สัดส่วน 0/100 ถึงแม้จะมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่แต่รูพรุนที่เกิดขึ้นเหล่านั้นอาจจะไม่เกิดที่บริเวณผิวของชิ้นงานแต่เกิดบริเวณกลางชิ้นงานเพราะอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปเกินจุดหลอมเหลวของ PBS ทำให้ขณะขึ้นรูปโพลีเมอร์ชีวภาพที่มีปริมาณ PLA/PBS ที่ 0/100 จะทำให้ไหลง่ายจนสารเร่งฟลูออรีนตัวกันอยู่บริเวณกลางชิ้นงานเป็นเหตุให้ที่ผิวไม่เกิดรูพรุนขึ้นแล้วจึงมีค่า Contact angle ที่มากกว่าโพลีเมอร์ชีวภาพที่มีสัดส่วน

ของ PBS มากในสัดส่วนอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.12 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S.Puttajan และคณะ[32] โดยในงานวิจัยดังกล่าวเป็นการผสมโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลต (PET) กับ PLA/ENR เมื่อมีการเติม ปริมาณ ENR มากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำน้อยลง เมื่อนำไปใช้งานโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลต อาจจะไม่เหมาะสมเนื่องจากน้ำที่ถูกดูดซับเข้าไปอยู่ในรูพรุนซึ่งไม่มีจุดหมายให้ไปต่อจึงอาจเกิดการเน่าเสีย และส่งกลิ่นเหม็นเมื่อเวลาผ่านไป

ตารางที่ 4.12 แสดงค่า Contact angle ของน้ำของโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลต/PLA/PBS

Samples	Contact angle
Neat PLA	53.76°
PLA/PBS (80/20)	48.34°
PLA/PBS (70/30)	42.37°
PLA/PBS (60/40)	36.42°
PLA/PBS (50/50)	40.41°
PLA/PBS (40/60)	32.16°
PLA/PBS (30/70)	28.25°
PLA/PBS (20/80)	26.88°
Neat PBS	45.20°



รูปที่ 4.13 แสดงค่าการวัดมุมบนพื้นผิวของโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลต/PLA/PBS

อีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของโพลีเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS คือ สภาพชื้น ซึ่งพบว่า PLA มีความเป็นชื้นมากกว่า PBS [33] จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของโพลีเมอร์ชีวภาพที่มีสัดส่วนของ PLA มากดูดซับน้ำได้ดีกว่าโพลีเมอร์ชีวภาพที่มีสัดส่วนของ PLA น้อย ทั้งนี้การดูดซับน้ำอาจจะยังมีปริมาณในการดูดซับน้อยเกินไปโดยปกติแล้วหากบรรจุภัณฑ์ที่ใช้สำหรับการดูดซับจะต้องดูดซับได้มากกว่าน้ำหนักตัว 2 – 3 เท่า แต่ในงานวิจัยนี้ทำได้เพียง 35% ของน้ำหนักเท่านั้น ดังนั้นการดูดซับน้ำอาจจะยังไม่สามารถนำมาใช้งานได้ในส่วนของบริษัทผู้ผลิต

4.2 การศึกษาผลของสารเติมแต่ง ZnO ต่อสมบัติของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO

ในส่วนที่สองเป็นการศึกษาอัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS โดยใช้สารเติมแต่งเป็น ZnO ซึ่งจะทำให้การเลือกสัดส่วนที่ดีที่สุดจากการผสมในสัดส่วนแรกมาใช้ในการเติมสารเติมแต่งในขั้นตอนนี้โดยพบว่าปริมาณ PLA/PBS ที่สัดส่วน 80/20 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการขึ้นรูปเป็นโพลีคอมโพสิตเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลและสมบัติการดูดซับที่ดีกว่าสัดส่วนอื่น ๆ โดยในส่วนนี้จะทำการเปลี่ยนปริมาณในการเติมคือ 1, 3, 5 และ 7 phr โดยจะแสดงอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 4.13

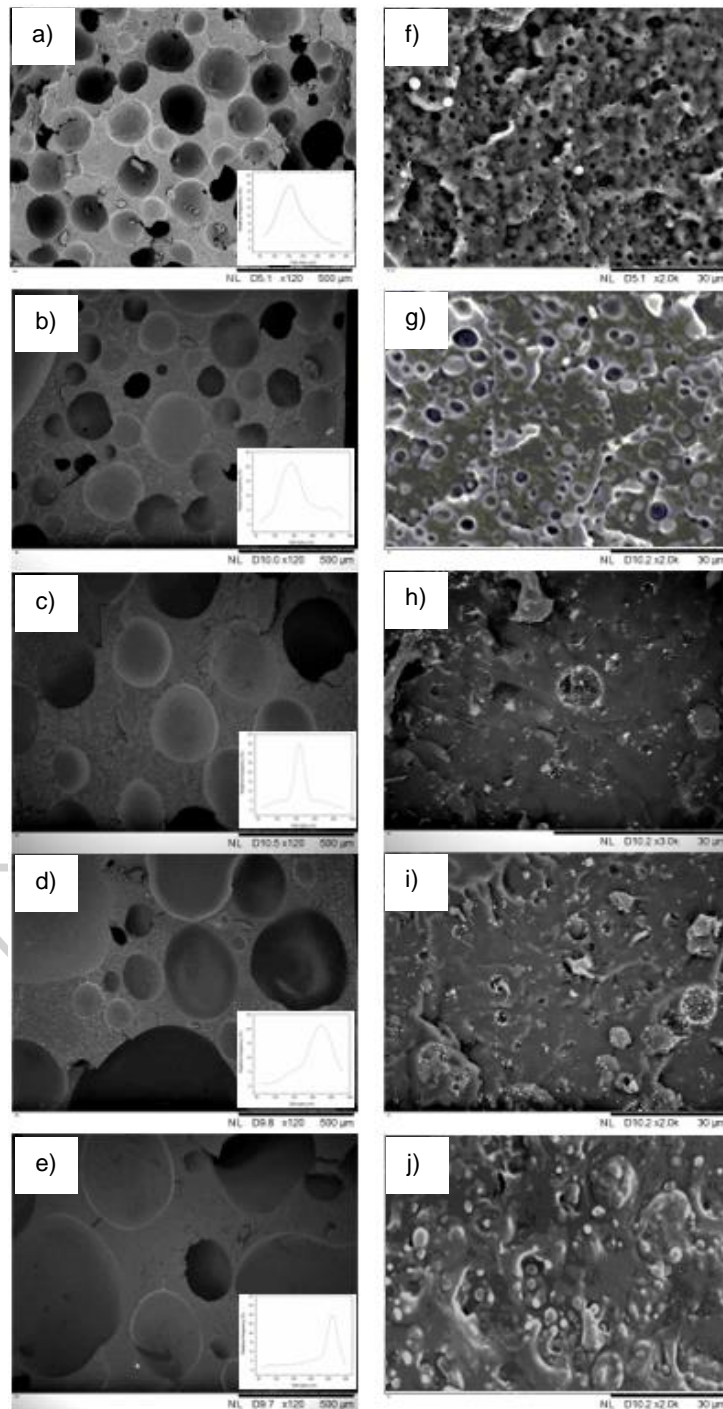
ตารางที่ 4.13 แสดงอัตราส่วนผสมของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO

PLA (%wt)	PBS (%wt)	PEG (%wt)	ADC (phr)	ZnO (phr)
64	16	20	1	0
64	16	20	1	1
64	16	20	1	3
64	16	20	1	5
64	16	20	1	7

4.2.1 ลักษณะพื้นฐานวิทยาของโพลีคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS/PEG/ZnO

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนปริมาณ ZnO ต่อสมบัติของโพลีเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS ที่ผสมกันในสัดส่วนร้อยละ 80:20 โดยน้ำหนักและมีการเติมสารเร่งฟูในปริมาณคงที่ 1 phr โดยจะพิจารณาการเติม ZnO ในปริมาณ 1, 3, 5 และ 7 phr แล้วทำการหาปริมาณการเติม ZnO ที่เหมาะสมสำหรับนำไปเตรียมขึ้นรูปเป็นโพลีคอมโพสิตต่อไป รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS ที่มีการเติม ZnO ในปริมาณต่าง ๆ พบว่า ZnO ที่เติมในพอลิเมอร์ผสมมีการรวมกลุ่มกันอยู่ในจุดเดียวไม่กระจายตัวในพอลิเมอร์ผสมเนื่องจากการเติม ZnO [34] ส่งผลให้ความหนืดในระบบ

มากขึ้นทำให้การกระจายตัวของสารเร่งฟลูออเรสเซนซ์ในตัวโพลีเมอร์ทำได้ไม่ดีโดยพิจารณาจากความหนืดด้วยการวัดค่าดัชนีการไหล (MFI) ดังแสดงในตารางที่ 4.14

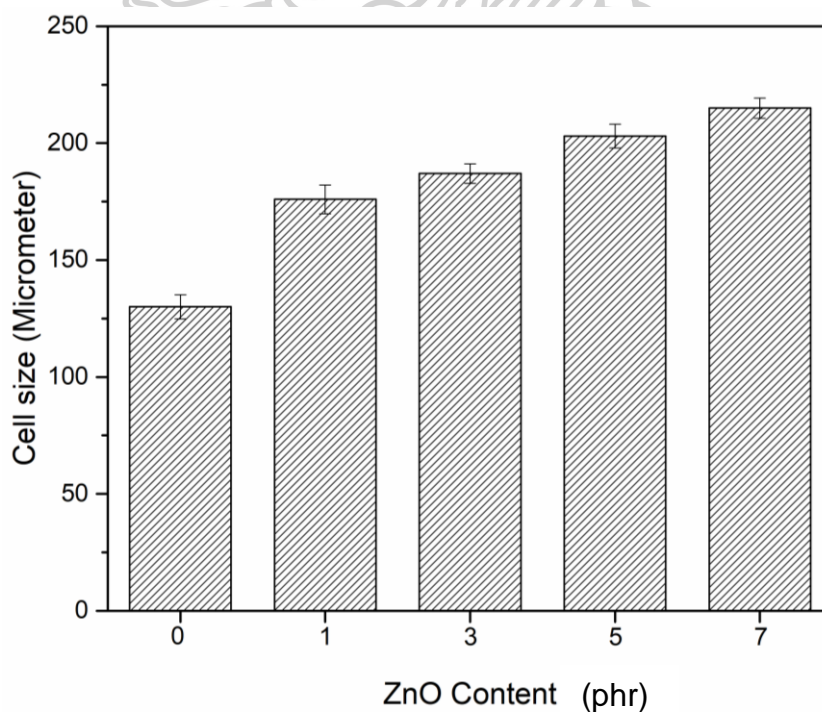


รูปที่ 4.14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมคอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS/PEG/ZnO โดยเปลี่ยนปริมาณของ ZnO a) 0phr b) 1phr c) 3phr d) 5phr e) 7phr กำลังขยาย 120x และ f) 0phr g) 1phr h) 3phr i) 5phr j) 7phr กำลังขยาย 2000x

เมื่อพิจารณาขนาดของเซลล์โพลีโคมดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อปริมาณ ZnO ในระบบมากขึ้นทำให้ขนาดของรูพรุนใหญ่ขึ้นเนื่องจาก ZnO ไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของพอลิเมอร์ผสม เป็นเหตุทำให้ความหนืดในระบบมากขึ้นซึ่งวัดจากค่า MFI ของระบบโพลีคอมโพสิต เมื่อความหนืดในระบบมีค่ามากขึ้นทำให้ไปขัดขวางการกระจายตัวของสารเร่งฟู[35] เมื่อนำไปขึ้นรูปเป็นโพลีโคมจึงทำให้โพลีคอมโพสิตที่มีปริมาณ ZnO มากเกิดการรวมกลุ่มกันของสารเร่งฟูจนเป็นเหตุทำให้เกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอ[36]

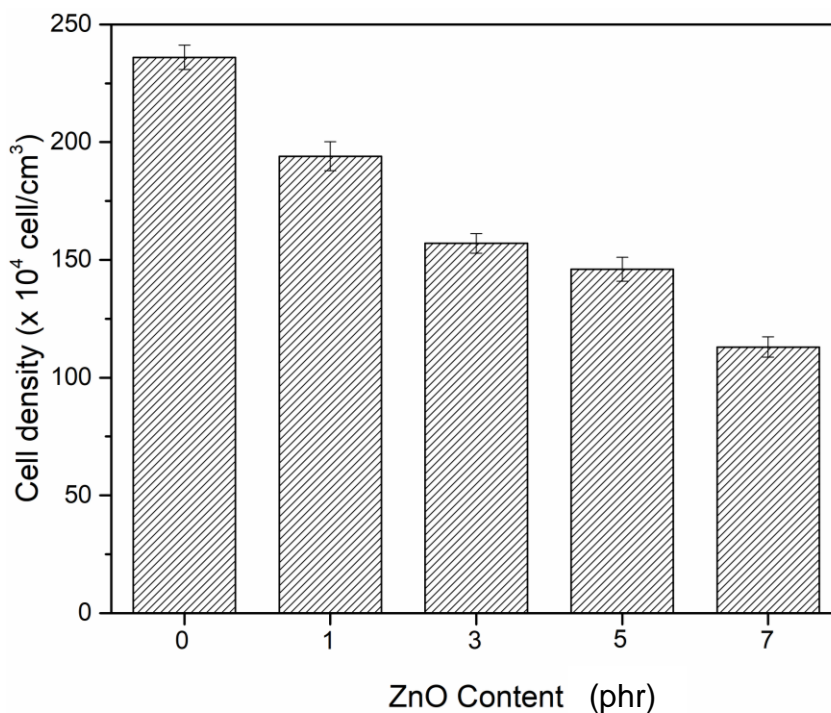
ตารางที่ 4.14 แสดงค่า Melt flow index (MFI) ของพอลิเมอร์คอมโพสิตในอัตราส่วนต่าง ๆ

Samples	MFI (g/10 min)	Viscosity (Pa • s)
PLA/PBS (80/20)	12.23	16753
PLA/PBS/ZnO (80/20/1phr)	11.49	17662
PLA/PBS/ZnO (80/20/3phr)	11.23	18211
PLA/PBS/ZnO (80/20/5phr)	11.03	18378
PLA/PBS/ZnO (80/20/7phr)	10.86	19669



รูปที่ 4.15 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบขนาดของรูพรุนของโพลีคอมโพสิต

PLA/PBS/PEG/ZnO

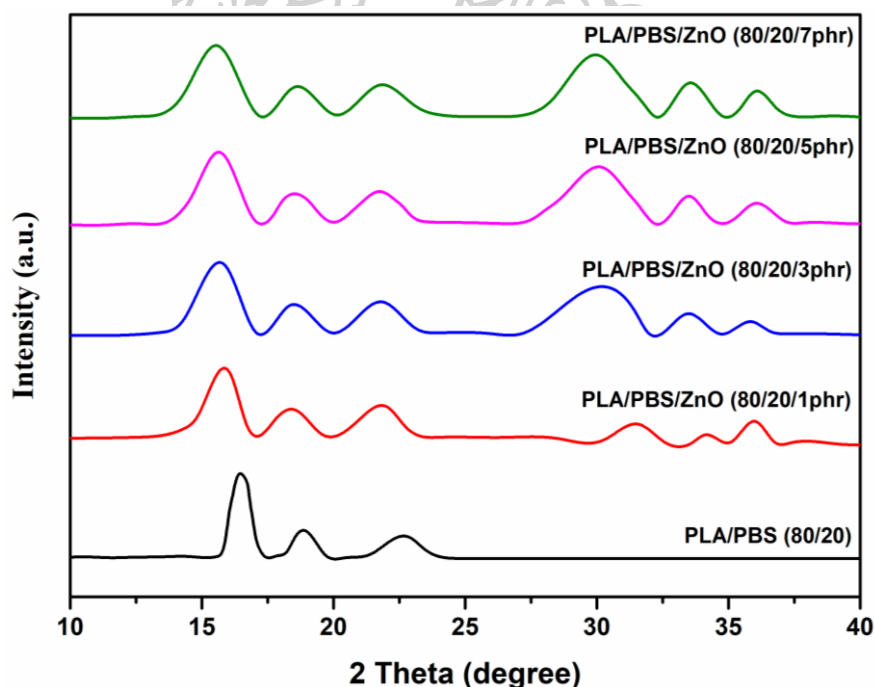


รูปที่ 4.16 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบปริมาณรูพรุนของโพลีคอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS/PEG/ZnO

จากรูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณรูพรุนของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO ที่มีการเติม ZnO ในปริมาณที่ต่างกัน พบว่าเมื่อปริมาณ ZnO มากขึ้นส่งผลให้จำนวนเซลล์โพลีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของโพลีชีวภาพลดลงซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับขนาดของเซลล์โพลี โดยเมื่อเซลล์โพลีมีขนาดใหญ่จะทำให้จำนวนเซลล์โพลีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรมีปริมาณน้อยเกิดจากการรวมตัวกันของฟองแก๊สในขณะขึ้นรูปในทางกลับกันเมื่อปริมาณ ZnO น้อยลงส่งผลให้จำนวนเซลล์โพลีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของโพลีชีวภาพมากขึ้นเนื่องจากที่ปริมาณ ZnO น้อยจะมีขนาดเซลล์โพลีที่เล็กซึ่งขนาดเซลล์โพลีที่เล็กนั้นจะทำให้ผนังเซลล์ของโพลีขณะขึ้นรูปมีความแข็งแรงมากกว่าด้วยเหตุนี้ทำให้โพลีชีวภาพที่มีเซลล์โพลีขนาดเล็กไม่เกิดการแตกออกของผนังเซลล์จึงไม่เกิดการรวมตัวกันของเซลล์โพลีดังเช่นโพลีคอมโพสิตที่มีเซลล์โพลีขนาดใหญ่ [37] โดยที่เซลล์โพลีขนาดใหญ่จะมีจำนวนเซลล์โพลีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรน้อย

4.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO

รูปที่ 4.17 แสดง XRD pattern ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO ที่เติม ZnO ในปริมาณต่าง ๆ โดย diffraction peak ของ ZnO จะปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ 30° 34° และ 36° ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกในระนาบ (100), (002) และ (101) [38] เมื่อปริมาณของ ZnO เพิ่มขึ้น ตำแหน่งของ diffraction peak ไม่เปลี่ยนแปลงจากตำแหน่งเดิมแสดงให้เห็นว่าการผสมพอลิเมอร์ระหว่าง PLA, PBS และ ZnO ไม่ส่งผลให้โครงสร้างของผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียว แต่เมื่อพิจารณาโพลีคอมโพสิตที่มีการเติม ZnO ปริมาณ 1 phr พบว่า diffraction peak ของ ZnO จะปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ 32° ซึ่งต่างกับโพลีคอมโพสิตที่มีการเติม ZnO ในปริมาณอื่นแต่ค่าดังกล่าวยังคงอยู่ในช่วง diffraction peak ของ ZnO ที่สามารถเกิดขึ้นได้ ในงานวิจัยของ J. Zhou และคณะ[39] โดยในงานวิจัยเป็นการสังเคราะห์ PLA/PBS เช่นเดียวกับในงานวิจัยนี้โดยทั้งตำแหน่งของ diffraction peak ของ ZnO อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับในงานวิจัย เมื่อปริมาณ ZnO เพิ่มขึ้น diffraction peak ของวัสดุคอมโพสิตสูงขึ้นเช่นเดียวกับในงานวิจัย



รูปที่ 4.17 XRD patterns ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO

จากตารางที่ 4.15 เมื่อพิจารณาปริมาณผลึก (X_c) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2 พบว่า เมื่อปริมาณ ZnO ในโพลีคอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS/ZnO มากขึ้นจะมีปริมาณผลึกเพิ่มมากขึ้นด้วยซึ่งเป็นไปตามกฎการผสมเนื่องจากในโพลีคอมโพสิต PLA/PBS ที่มีปริมาณ ZnO 1phr มีปริมาณผลึก 12.13% และ ในโพลีคอมโพสิต ระหว่าง PLA/PBS ที่มีปริมาณ ZnO 7phr มีปริมาณผลึก 77.00% เมื่อปริมาณ ZnO สูงขึ้นจะทำให้ปริมาณผลึกสูงขึ้นด้วยดังแสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 แสดงปริมาณผลึกของโพลีคอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS/ZnO

Samples	X_c (%)
PLA/PBS (80/20)	30.88
PLA/PBS/ZnO (80/20/1phr)	39.72
PLA/PBS/ZnO (80/20/3phr)	48.13
PLA/PBS/ZnO (80/20/5phr)	56.27
PLA/PBS/ZnO (80/20/7phr)	63.38

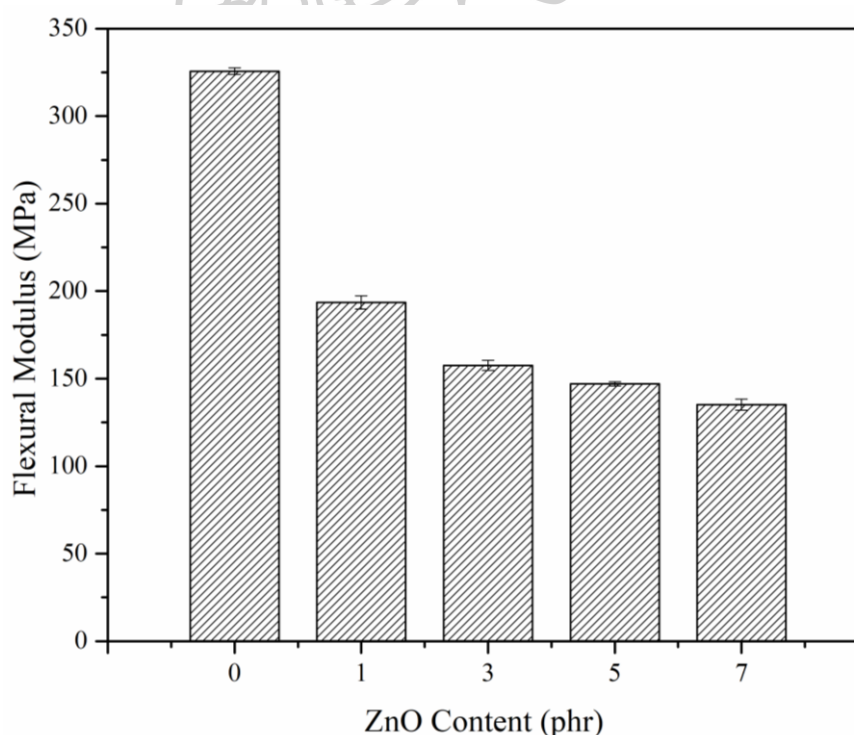
4.2.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO

รูปที่ 4.18 แสดงผลการทดสอบสมบัติการต้านทานการโค้งงอของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO โมดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus) โดยแสดงการเปรียบเทียบค่า Young's modulus ของโพลีคอมโพสิตระหว่าง PLA และ PBS โดยมีการเติม PEG ปริมาณ 20% โดยน้ำหนักคงที่ และมีการเติมปริมาณ ZnO ในปริมาณ 1, 3, 5 และ 7 phr พบว่าเมื่อปริมาณ ZnO ในโพลีคอมโพสิตมากขึ้นทำให้ค่า Young's modulus ลดลงแสดงถึงความสามารถในการต้านทานการเสียรูปของโพลีคอมโพสิตน้อยลงซึ่งเกิดจากปัจจัยหลักสองปัจจัยคือ ขนาดรูพรุนและผนังของเซลล์โพลี เมื่อพิจารณาถึงขนาดรูพรุนจากรูปที่ 4.15 แสดงลักษณะของขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นเมื่อปริมาณ ZnO มากขึ้น เมื่อพิจารณาผนังเซลล์โพลีจากลักษณะสัณฐานวิทยาของโพลีที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จะเห็นว่าผนังของผนังเซลล์ที่เล็กกว่าโพลีที่มีรูพรุนขนาดเล็กเมื่อผนังเซลล์มีขนาดเล็กทำให้ชิ้นงานโพลีสามารถรับแรงได้น้อยลง นอกจากนี้การรวมตัวกันของ ZnO ที่เติมเข้าไปซึ่งดูได้จากโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาจากรูปที่ 4.15(g) และรูปที่ 4.15(f) จะสังเกตเห็นผนังสีขาวเกาะบริเวณขอบรอบรูพรุนซึ่งเกิดจากการรวมกลุ่มกันของ ZnO ทำให้ค่า Young's modulus ของโพลีลดลงเมื่อปริมาณ ZnO มากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.16 โดยค่า Flexural modulus ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO ที่มีปริมาณการเติม ZnO ที่ 1 phr เท่ากับ 196.33 ± 2.24 MPa และค่า Flexural modulus ของ

โพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO ที่มีปริมาณการเติม ZnO ที่ 7 phr เท่ากับ 130.24 ± 2.17 MPa หากปริมาณการเติม ZnO ในโพลีคอมโพสิต 3, 5 และ 7 phr พบว่ามีค่าลดลง 40% - 60% อีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้สมบัติเชิงกลลดลงคือการผสมพอลิเมอร์คอมโพสิตเป็นการใช้พอลิเมอร์ผสมจากส่วนแรกมาผ่านความร้อนซ้ำซึ่ง PLA ซึ่งอ่อนไหวต่อความร้อนเมื่อผ่านความร้อนหลายครั้งทำให้เกิดการย่อยสลายไปบางส่วนซึ่งเป็นเหตุทำให้สมบัติเชิงกลของโพลีคอมโพสิตลดลง

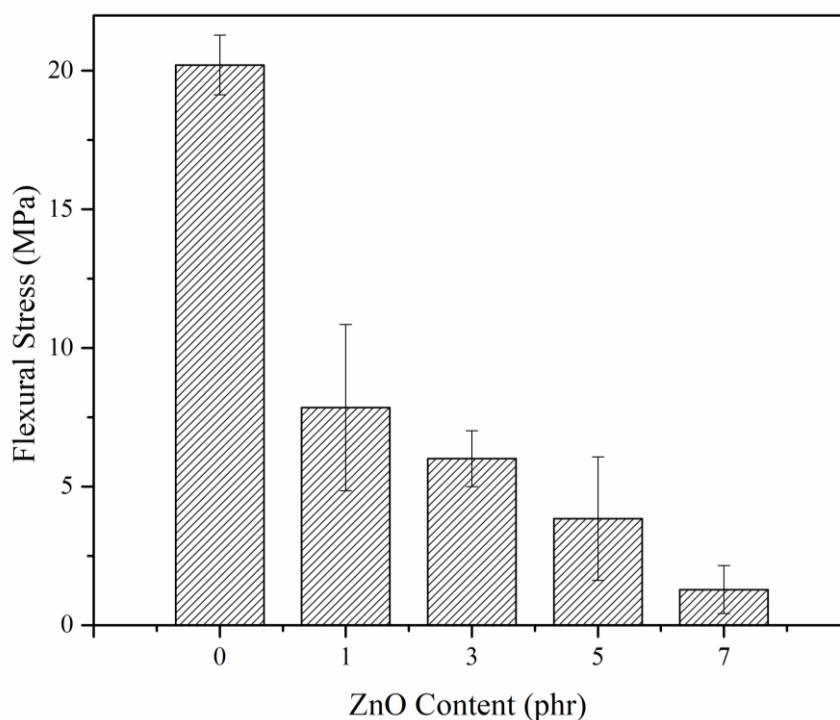
ตารางที่ 4.16 แสดงค่า Flexural Modulus ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO

Samples	Flexural Modulus (MPa)
PLA/PBS (80/20)	325.05 ± 1.26
PLA/PBS/ZnO (80/20/1phr)	196.33 ± 2.24
PLA/PBS/ZnO (80/20/3phr)	161.15 ± 2.03
PLA/PBS/ZnO (80/20/5phr)	148.67 ± 1.45
PLA/PBS/ZnO (80/20/7phr)	130.24 ± 2.17



รูปที่ 4.18 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Flexural modulus ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างระบบโพลีชีวภาพและระบบโพลีคอมโพสิตพบว่าการเติม ZnO ไม่ช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลในด้าน Flexural Modulus เนื่องจากเกิดการรวมตัวของ ZnO ที่ใส่เข้าไปตั้งแต่ปริมาณ 1 phr การเติม ZnO เข้าไปในระบบโพลีชีวภาพจึงไม่ส่งผลให้ค่า Flexural Modulus เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.19 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Flexural stress ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO

รูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.17 แสดงผลการทดสอบสมบัติการต้านทานการโค้งงอของโพลีคอมโพสิตในด้านความแข็งแรงในการกด (Flexural stress) โดยแผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Flexural stress ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO พบว่าเมื่อปริมาณ ZnO ในโพลีคอมโพสิตมากขึ้นทำให้ค่า Flexural stress ลดลงแสดงถึงความสามารถในการต้านทานแรงในการกดของโพลีชีวภาพน้อยลงโดยแรงที่มากระทำในลักษณะการกดซึ่งเกิดจากปัจจัยหลักคือ ขนาดรูพรุนและผนังเซลล์โพลี โดยแนวโน้มของค่า Flexural stress จะเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับ Flexural modulus

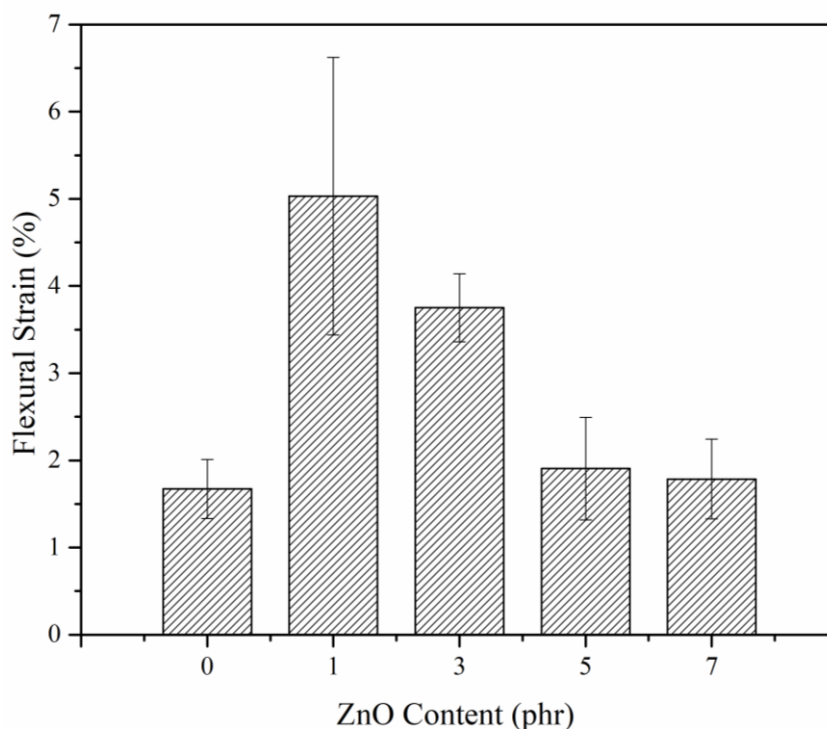
ตารางที่ 4.17 แสดงค่า Flexural Stress ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO

Samples	Flexural stress (MPa)
PLA/PBS (80/20)	20.13 ± 2.25
PLA/PBS/ZnO (80/20/1phr)	7.61 ± 4.36
PLA/PBS/ZnO (80/20/3phr)	6.37 ± 1.14
PLA/PBS/ZnO (80/20/5phr)	4.26 ± 3.73
PLA/PBS/ZnO (80/20/7phr)	1.35 ± 1.34

จากรูปที่ 4.19 แสดงผลการทดสอบสมบัติการต้านทานการโค้งงอของโพลีคอมโพสิตในด้านความสามารถในการยืดหยุ่น (Elongation at yield strength) ในงานวิจัยนี้จะใช้ Elongation at yield strength ไม่ใช่ Elongation at break เนื่องจากการกดชิ้นงานจะกำหนดระยะในการกดที่แน่นอนซึ่งในบางชิ้นงานเมื่อกดไป 8% ไม่เกิดการแตกหักเกิดขึ้นจึงไม่สามารถใช้ค่า Elongation at break โดยแผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Elongation at yield strength พบว่าเมื่อปริมาณ ZnO ในโพลีคอมโพสิตมากขึ้นทำให้ค่า Elongation at yield strength ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับโพลีชีวภาพ PLA/PBS/PEG แล้วพบว่าค่า Elongation at yield strength ของโพลีคอมโพสิตที่ปริมาณ ZnO 1phr สูงกว่าค่า Elongation at yield strength ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ที่ไม่เติม ZnO เนื่องจากการเติม ZnO ช่วยในเรื่องการกระจายตัวของ PBS และ PEG ได้ดีขึ้นซึ่งโดยทั่วไปแล้ว PEG ถูกนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในการลดค่า melt strength[40] ของพอลิเมอร์ อีกทั้ง PBS ยังเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีความเหนียว เมื่อพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดสามารถกระจายตัวในโพลีคอมโพสิตได้ดีจึงเป็นเหตุทำให้ความสามารถในการยืดหยุ่นจึงสูงกว่าโพลีชีวภาพ PLA/PBS/PEG

ตารางที่ 4.18 แสดงค่า Elongation at yield strength ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO

Samples	Elongation at yield strength (%)
PLA/PBS (80/20)	1.64 ± 0.59
PLA/PBS/ZnO (80/20/1phr)	5.13 ± 3.45
PLA/PBS/ZnO (80/20/3phr)	3.68 ± 0.78
PLA/PBS/ZnO (80/20/5phr)	1.98 ± 1.78
PLA/PBS/ZnO (80/20/7phr)	1.87 ± 1.56

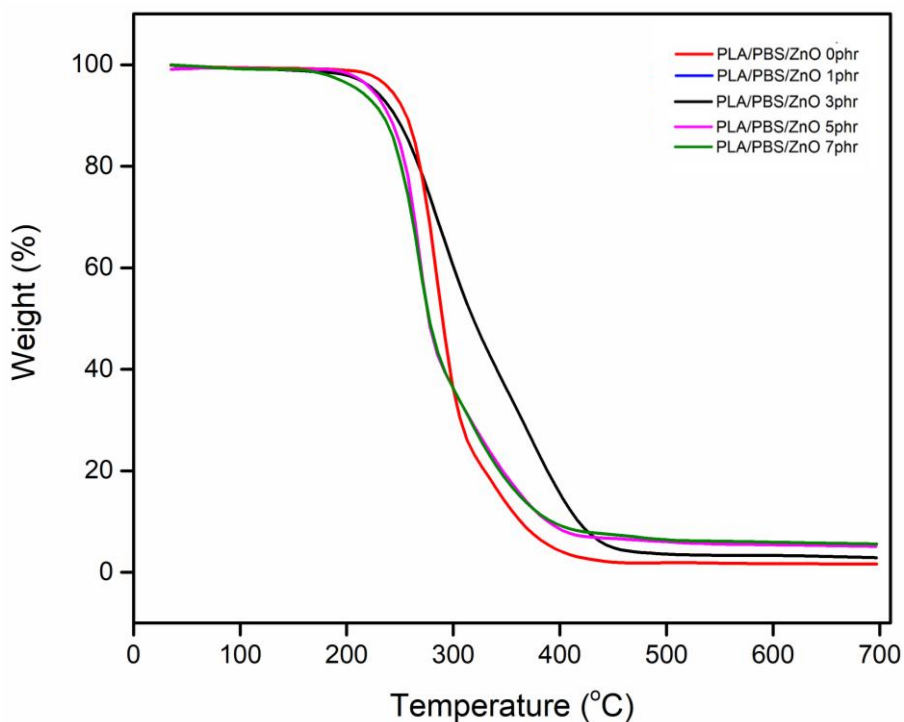


รูปที่ 4.20 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่า Flexural strain ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลของปริมาณการเติม ZnO ในโพลีคอมโพสิตพบว่าโพลีมีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณการเติม ZnO ซึ่งอิทธิพลของขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นทำให้การทนต่อการดัดงอมีค่าลดลงสามารถดูได้จากลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาจากรูปที่ 4.13 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ T. Zhao และคณะ[41] โดยงานวิจัยดังกล่าวเป็นการขึ้นรูปโพลีคอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS และสารตัวเติมที่เติมคือ Nano modified ZnO พบว่าการเติมปริมาณ Nano modified ZnO มากขึ้นทำให้ค่า Flexural modulus รวมไปถึงค่า Tensile stress ลดลงเนื่องจากการรวมกลุ่มกันของ Nano modified ZnO ที่เติมเข้าไปซึ่งค่า Elongation at yield strength ลดลงเมื่อปริมาณการเติม Nano modified ZnO มากขึ้น เนื่องจากขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นของโพลีคอมโพสิต

4.2.4 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO

4.2.4.1 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO ด้วยเทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA)



รูปที่ 4.21 TGA thermogram ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO ที่ปริมาณของ ZnO แตกต่างกัน

รูปที่ 4.21 แสดง TGA thermogram ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO ที่เติม ZnO ในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่าโพลีคอมโพสิตมีการสลายตัวทางความร้อน 3 ชั้น ชั้นที่ 1 ปรากฏที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้สารเร่งฟู Azodicarbonamide (ADC) โดยเกิดการแตกตัวเป็นฟองแก๊ส ชั้นที่ 2 เป็นชั้นการสลายตัวของ PLA ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 280 ถึง 350 องศาเซลเซียส โดยจะมีอัตราการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส ในขณะที่ชั้นที่ 3 เป็นชั้นการสลายตัวของ PBS ซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 350 ถึง 420 องศาเซลเซียส เมื่อปริมาณ ZnO ในโพลีคอมโพสิตมากขึ้น จะทำให้ T_d ของโพลีคอมโพสิตลดลง นั่นคือโพลีคอมโพสิตเกิดการสลายตัวง่ายขึ้น เนื่องจากการเติม

ZnO เข้าไปในระบบทำให้มีแรงเฉือนเกิดขึ้นขณะผสมพอลิเมอร์ในเครื่อง Twin screw extruder จึงเกิดเป็นความร้อนสะสมในระบบมากขึ้นเมื่อเทียบกับระบบโพลีชีวภาพอีกทั้งยังต้องควบคุมสารเร่งฟูไม่ให้เกิดการแตกตัวของผสมอีกด้วยจึงมีการใช้ความเร็วรอบในการขึ้นรูปที่สูงจึงมีแรงเฉือนในระบบมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ X. Gong[42] และคณะ โดยในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ PVA/ZnO เมื่อพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าเมื่อเติม ZnO เข้าไปในระบบ T_d ของพอลิเมอร์มีค่าลดลงเนื่องจากแรงเฉือนในระบบที่เพิ่มมากขึ้นในขั้นตอนการผสมด้วยเครื่อง Twin screw extruder เช่นเดียวกับในงานวิจัยนี้

4.2.4.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)

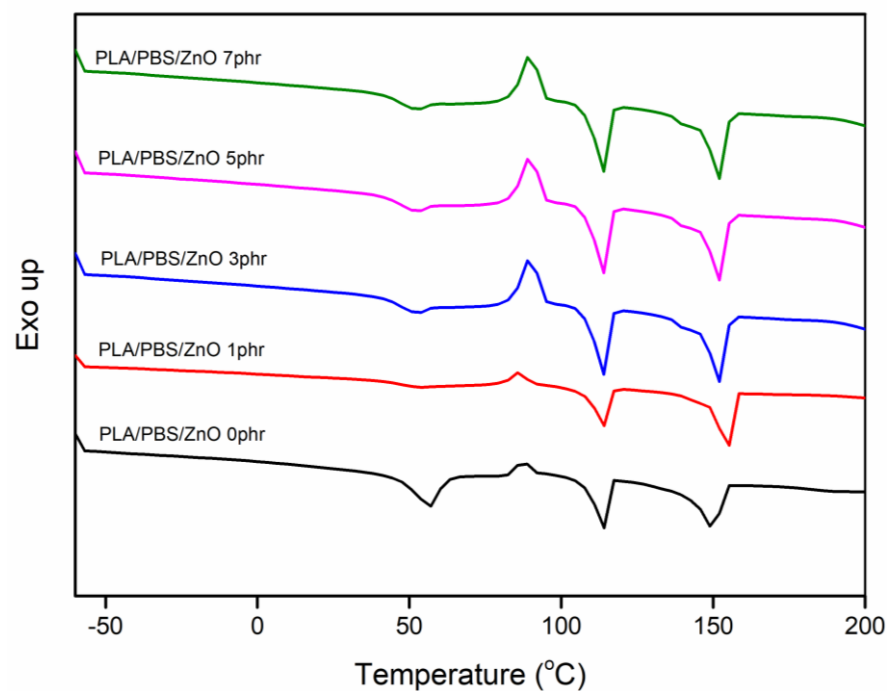
การศึกษาผลของการเติม ZnO ของโพลีคอมโพสิตต่อเสถียรภาพทางความร้อนของโพลีคอมโพสิตสามารถศึกษาได้โดยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 250 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 2 องศาเซลเซียสต่อ นาที ซึ่งในการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC จะศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องได้แก่ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass-Rubbery transition temperature, T_g) อุณหภูมิตกผลึกขณะให้ความร้อน (Cold crystallization temperature, T_{cc}) อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) และปริมาณผลึก (Crystallinity) โดยการอธิบายผลการศึกษาจะแบ่งออกเป็นสามช่วงคือ การให้ความร้อนครั้งที่ 1 (First heating) การหล่อเย็น (Cooling) และการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (Second heating) ตามลำดับ

การให้ความร้อนครั้งที่ 1 (First heating)

เมื่อพิจารณาในส่วนของอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass-Rubbery transition temperature, T_g) ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO ดังรูปที่ 4.22 และตารางที่ 4.19 พบว่าเมื่อเติม ZnO ในโพลีคอมโพสิตค่า T_g ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อนำไปคำนวณเชิงสถิติแล้วพบว่าค่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าเมื่อเติมปริมาณ ZnO มากขึ้นไม่ทำให้ค่า T_g ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO เปลี่ยนแปลง

ในขณะที่ให้ความร้อนแก่โพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO พบพีคของการคายพลังงาน (Exothermic peak) อยู่ในช่วง 80 ถึง 90 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นถึงการเกิดผลึกขณะได้รับความร้อนโดยพฤติกรรมดังกล่าวจะแสดงอุณหภูมิตกผลึกขณะให้ความร้อน (Cold crystallization

temperature, T_c) จากรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่อปริมาณ ZnO มากขึ้นอุณหภูมิที่เกิดผลึกขณะให้ความร้อนไม่เปลี่ยนแปลงแต่พบว่ามีค่าของพีคสูงขึ้นเนื่องจากเมื่อเติม ZnO เข้าไปในระบบขณะทำการผสม ZnO ไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ผสมจึงไม่สามารถเกิดผลึกได้ทันขณะขึ้นรูปเมื่อนำมาทดสอบด้วยเทคนิค DSC จึงแสดงการใช้พลังงานขณะให้ความร้อนในการเกิดผลึกสูงขึ้น แต่อุณหภูมิที่แสดงพีคของ T_c ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อนำไปคำนวณเชิงสถิติแล้วพบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงสรุปได้ว่าเมื่อเติมปริมาณ ZnO มากขึ้นไม่ทำให้ค่า T_c ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO เปลี่ยนแปลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ B. Panyad และคณะ [43] โดยในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBS และมีการใส่ nano-chitosan เป็นตัวคอมโพสิต เมื่อพิจารณาในส่วนของเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าเมื่อปริมาณนาโนซิทิกาในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้นค่าของพีคที่ตำแหน่ง T_c ก็สูงขึ้นเนื่องจากนาโนซิทิกาไปขัดขวางการเกิดผลึกขณะทำการผสมพอลิเมอร์แต่ตำแหน่งของพีคไม่เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับงานวิจัยนี้



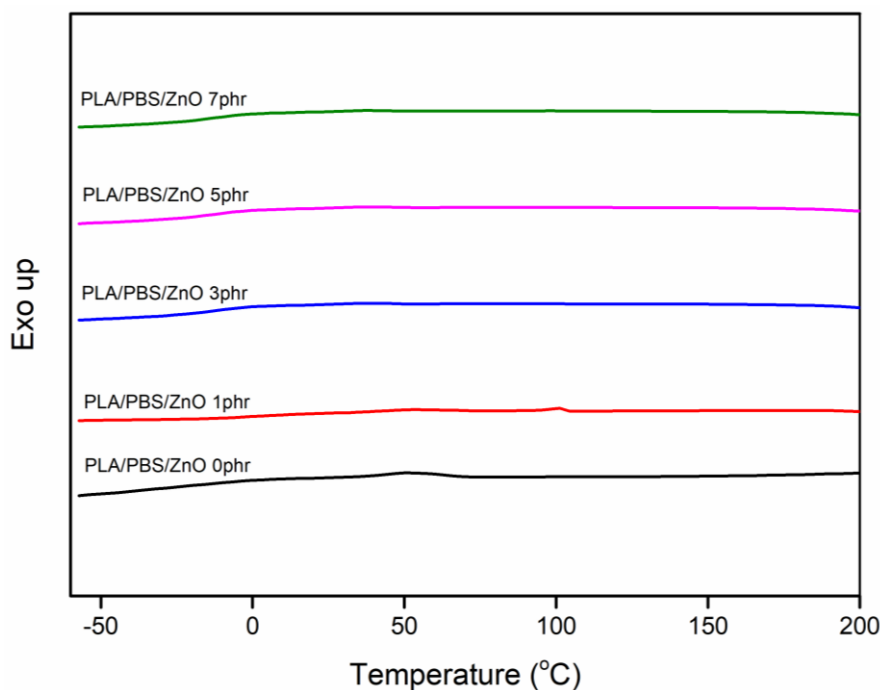
รูปที่ 4.22 กราฟแสดง Differential scanning calorimetry (DSC) ของโพลีชีวภาพในการให้ความร้อนขึ้นที่ 1 (First heating)

ตารางที่ 4.19 แสดงค่าที่ได้จาก DSC thermogram ในขั้น First heating ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO ที่อัตราส่วนต่างกัน

Samples	T _g (°C)	T _{cc} (°C)	T _m PLA (°C)	T _m PBS (°C)	X _c PLA (%)	X _c PBS (%)
PLA/PBS (80/20)	64.15	80.23	148.49	114.54	28.80	17.26
PLA/PBS/ZnO (80/20/1phr)	63.24	79.87	153.12	115.49	47.66	12.96
PLA/PBS/ZnO (80/20/3phr)	62.16	82.14	152.96	114.92	33.50	14.88
PLA/PBS/ZnO (80/20/5phr)	63.87	81.16	152.45	115.18	25.20	9.80
PLA/PBS/ZnO (80/20/7phr)	63.76	80.28	152.71	115.47	33.71	10.26

ในขณะที่ให้ความร้อนกับโพลีชีวภาพพบ Endothermic peak ซึ่งเป็นพีคแสดงอุณหภูมิในการหลอมผลึกในโพลีคอมโพสิตที่มีการผสมระหว่าง PLA/PBS/ZnO โดยจะพบพีคของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดโดย T_m ของ PLA จะแสดงค่าอยู่ระหว่างช่วง 148 ถึง 152 องศาเซลเซียส และ T_m ของ PBS จะแสดงค่าระหว่างช่วง 114 ถึง 115 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าเมื่อปริมาณ ZnO มากขึ้นจะทำให้ T_m ของโพลีชีวภาพทั้งในส่วนของ PLA และ PBS ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อนำไปคำนวณเชิงสถิติพบว่าค่า T_m ของโพลีชีวภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญแต่เมื่อพิจารณาในระบบของโพลีชีวภาพและโพลีคอมโพสิตพบว่า T_m ของโพลีคอมโพสิตมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับโพลีชีวภาพเนื่องจาก ZnO ที่ถูกเติมเข้าไปในระบบไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่ในส่วนที่เป็นผลึกทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในการทำให้สายโซ่เคลื่อนที่แล้วเกิดเป็นผลึกขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ I. Kim และคณะ[44] โดยในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตระหว่าง PLA/ZnO เมื่อพิจารณาในส่วนองเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าเมื่อปริมาณ ZnO มากขึ้นจะมีค่า T_m สูงขึ้นด้วยเนื่องจาก ZnO ที่ถูกเติมเข้าไปในระบบไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่ในส่วนที่เป็นผลึกทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในการทำให้สายโซ่เคลื่อนที่แล้วเกิดเป็นผลึกเช่นเดียวกับงานวิจัยนี้

ขั้นตอนการหล่อเย็น (Cooling)



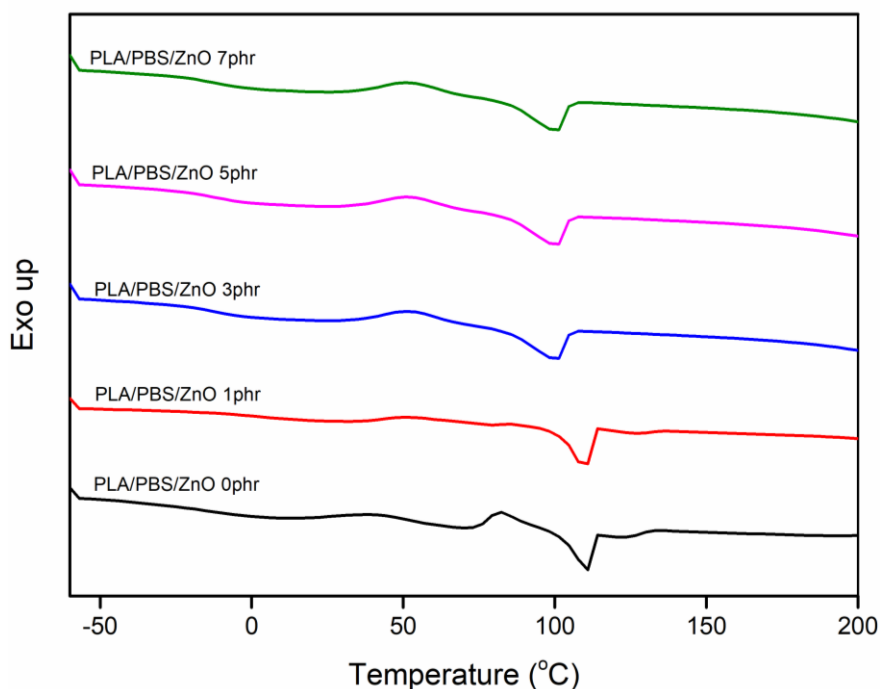
รูปที่ 4.23 กราฟ Differential scanning calorimetry (DSC) ของโพลีคอมโพสิตในขั้นหล่อเย็น

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.23 พบว่าในระบบโพลีคอมโพสิตไม่สามารถเห็น Endothermic peak ซึ่งเป็นพีคแสดงอุณหภูมิในการหลอมผลึกในโพลีคอมโพสิตเนื่องจาก ZnO ไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่ในส่วนที่เป็นผลึกของ PBS ซึ่งมีปริมาณน้อยมีเพียง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักซึ่งถือว่าน้อยมากในระบบโพลีชีวภาพอาจเกิดพีคของการหลอมผลึกขึ้นแต่ยังคงเห็นไม่ชัดเจนเมื่อมีปริมาณ ZnO เข้ามาในระบบเป็นเหตุทำให้ Endothermic peak ไม่แสดงใน DSC thermogram ในขั้นตอนนี้

ตารางที่ 4.20 แสดงค่าที่ได้จาก DSC thermogram ในขั้นตอนการหล่อเย็นของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO ที่อัตราส่วนต่างกัน

Samples	T_c (°C)
PLA/PBS (80/20)	50.13
PLA/PBS/ZnO (80/20/1phr)	-
PLA/PBS/ZnO (80/20/3phr)	-
PLA/PBS/ZnO (80/20/5phr)	-
PLA/PBS/ZnO (80/20/7phr)	-

การให้ความร้อนครั้งที่ 2 (Second heating)

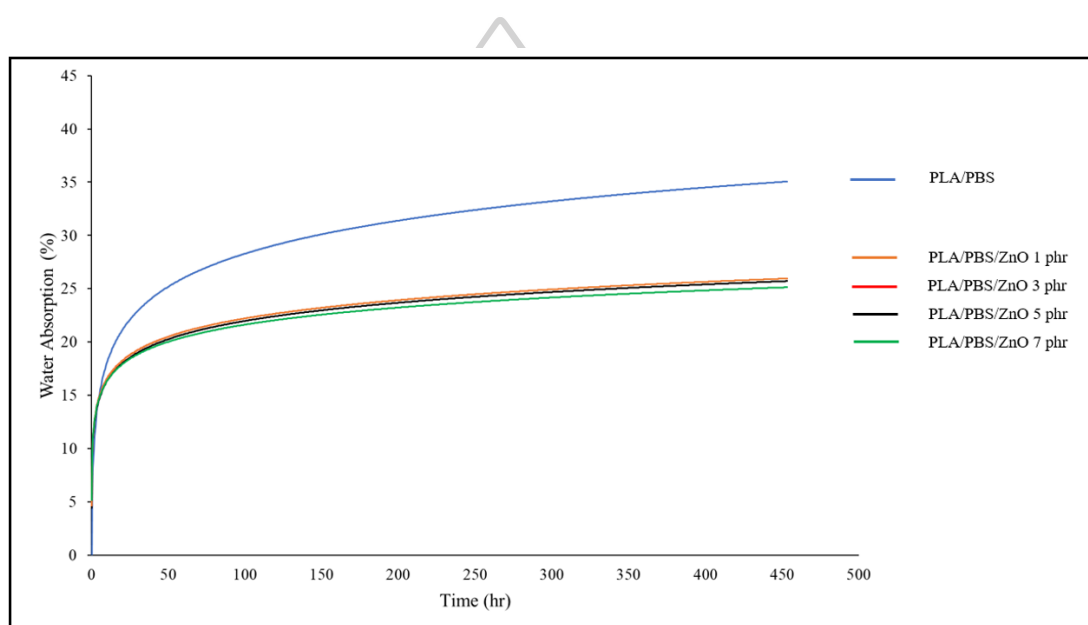


รูปที่ 4.24 กราฟแสดง Differential scanning calorimetry (DSC) ของโพลีคอมโพสิตในการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (Second heating)

จากรูปที่ 4.24 แสดง Differential scanning calorimetry (DSC) ของโพลีคอมโพสิตในการให้ความร้อนครั้งที่ 2 (Second heating) พบว่าไม่ปรากฏพีค T_{cc} ของโพลีคอมโพสิตดังนั้นจึงไม่สามารถเห็นพีค T_m ของ PLA แต่ยังคงเห็นพีค T_g แสดงใน DSC thermogram เมื่อพิจารณากราฟ DSC thermogram ของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO ปริมาณ ZnO 0phr ในช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 90 องศาเซลเซียส จะปรากฏพีคของ Re-crystallization temperature (T_{rc}) เป็นพีคขนาดเล็กที่แสดงก่อนพีคของ T_m ของ PBS ที่แสดงประมาณ 115 องศาเซลเซียส จะเห็นว่า T_{rc} จะแสดงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมผลึก ซึ่งอธิบายพฤติกรรมการตอบสนองด้วยความร้อนของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO ได้ว่า ในขั้นตอนการหล่อเย็นด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาทีเป็นขั้นตอนในการทำให้ PBS เย็นตัวแล้วตกผลึกแต่ในขั้นตอนดังกล่าวนี้ไม่สามารถทำให้ PBS ตกผลึกได้อย่างสมบูรณ์ทำให้เมื่อมีการให้ความร้อนในครั้งที่สองจึงเกิดพีคจุดความร้อนขึ้นที่ตำแหน่ง 80 ถึง 90 องศาเซลเซียสก่อนถึงอุณหภูมิหลอมเหลวของ PBS ที่ตำแหน่งประมาณ 115 องศาเซลเซียส

4.2.5 การศึกษาสมบัติการดูดซับของโพลีคอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS/ZnO

จากรูปที่ 4.25 เป็นการศึกษาสมบัติการดูดซับของโพลีคอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS/ZnO โดยทำการทดสอบการดูดซับเป็นเวลา 2 สัปดาห์จนพบว่าน้ำหนักของโพลีคอมโพสิตที่ใช้ในการทดสอบไม่เพิ่มขึ้นแล้ว ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณของ ZnO ในโพลีคอมโพสิตมากขึ้นจะทำให้โพลีคอมโพสิตดูดซับน้ำได้น้อยลงในทางกลับกันเมื่อปริมาณของ ZnO น้อยลงก็จะทำให้โพลีชีวภาพสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของขนาดของเซลล์โพลี



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับของโพลีคอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS/PEG/ZnO

พิจารณาในส่วนของอิทธิพลของขนาดเซลล์โพลีที่มีผลต่อการดูดซับน้ำ จากรูปที่ 4.25 จะเห็นจากลักษณะทางสัญญาณวิทยาของโพลีคอมโพสิต เมื่อปริมาณ ZnO ในโพลีคอมโพสิตมากขึ้นทำให้ขนาดรูพรุนของโพลีชีวภาพใหญ่ขึ้น เมื่อรูพรุนของโพลีคอมโพสิตมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ปริมาณเซลล์โพลีต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ลดลง เมื่อปริมาณเซลล์โพลีต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ลดลงทำให้การดูดซับน้ำเข้าไปยังโพลีคอมโพสิตมีปริมาณลดลงด้วยเนื่องจากน้ำจะถูกดูดซับเข้าไปยังรูพรุนของโพลีคอมโพสิตเมื่อปริมาณรูพรุนน้อยลงน้ำที่จะถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนจะมีปริมาณที่ลดลงด้วย โดยโพลีคอมโพสิตที่มีปริมาณ ZnO 7phr จะมีความสามารถในการดูดซับที่ 25.10% โดยน้ำหนักและเมื่อปริมาณ ZnO น้อยลงจะมีความสามารถในการดูดซับมากขึ้นโดยความสามารถในการดูดซับของโพลีคอมโพสิตที่มี

ปริมาณ ZnO 0phr จะมีความสามารถในการดูดซับที่ 38.22% ดังนั้นค่าการดูดซับน้ำของโพลีเมอร์ชีวภาพจะอยู่ในช่วง 25.10% - 38.22% เมื่อพิจารณาผลของปริมาณการเติม ZnO ในระบบคอมโพสิตพบว่าความสามารถในการดูดซับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ J. Ma และคณะ [45] เป็นการศึกษาการเตรียมโพลีเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิยูรีเทน (Polyurethane) และโซเดียมพอลิอะซิเลท โดยมีการเตรียมปริมาณโซเดียมพอลิอะซิเลทในปริมาณต่างกัน 0.3phr, 1.6phr, 2.6phr, 5.5phr พบว่าความสามารถในการดูดซับน้ำของโพลีเมอร์คอมโพสิตอยู่ในช่วงที่ไม่กว้างมากซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.21 แสดงค่าการดูดซับของน้ำของโพลีเมอร์คอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO

Samples	การดูดซับ (%)
PLA/PBS (80/20)	38.22
PLA/PBS/ZnO (80/20/1phr)	25.74
PLA/PBS/ZnO (80/20/3phr)	25.62
PLA/PBS/ZnO (80/20/5phr)	25.24
PLA/PBS/ZnO (80/20/7phr)	25.10

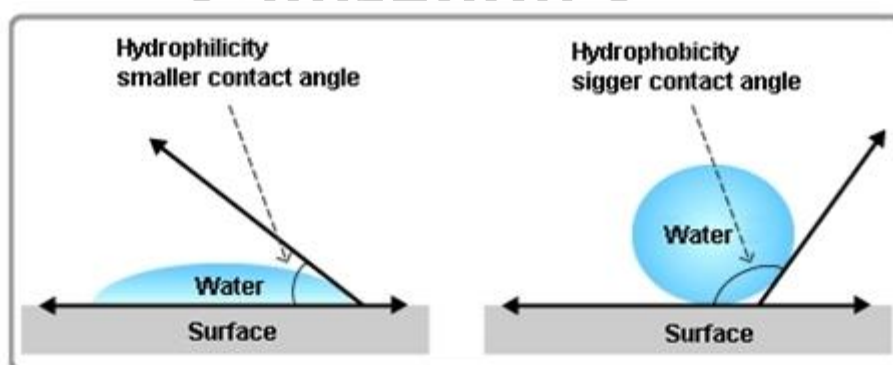
เมื่อพิจารณาอัตราเร็วในการดูดซับน้ำในช่วงแรกพบว่าโพลีเมอร์คอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO ที่มีขนาดรูพรุนใหญ่จะมีอัตราเร็วในการดูดซับน้ำที่เร็วกว่าโพลีเมอร์คอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก เนื่องจากการดูดซับที่ผิวของโพลีเมอร์คอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO ที่มีปริมาณ ZnO มากจะมีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าโพลีเมอร์คอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO ที่มีปริมาณ ZnO น้อย โดยอัตราเร็วในการดูดซับที่ผิวสามารถดูได้จากตารางที่ 4.21 แสดงค่า Contact angle ของน้ำบนผิวชิ้นงานเมื่อ Contact angle มีค่าน้อยแสดงถึงความสามารถในการดูดซับน้ำที่ผิวได้ดีในทางกลับกันเมื่อ Contact angle มีค่ามากแสดงถึงความสามารถในการดูดซับน้ำที่ผิวได้ไม่ดี แต่หากพิจารณาค่า Contact angle ของโพลีเมอร์คอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS/ZnO จะอยู่ในช่วง 38.11° ถึง 49.14° พบว่าค่าไม่แตกต่างกันมากจึงสรุปได้ว่าค่า Contact angle ของโพลีเมอร์คอมโพสิตไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่หากเทียบระหว่างโพลีเมอร์คอมโพสิตและโพลีเมอร์ชีวภาพพบว่าค่า Contact angle ของโพลีเมอร์คอมโพสิตน้อยกว่าค่า Contact angle ของโพลีเมอร์ชีวภาพเนื่องจากความหนืดของโพลีเมอร์คอมโพสิตน้อยกว่าความหนืดของโพลีเมอร์ชีวภาพซึ่งสามารถพิจารณาได้จากการวัดค่า MFI ในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.3 เมื่อความหนืดในระบบน้อยทำให้ในขั้นตอนขึ้นรูปสารเร่งฟูสามารถไหลได้ง่ายเมื่ออยู่ใน

ขั้นตอนการลดอุณหภูมิขณะขึ้นรูปชิ้นงานทำให้สารเร่งฟูไหลมาอยู่บริเวณกลางชิ้นงานแล้วเกิดเป็นรูพรุนบริเวณกลางชิ้นงานมากกว่าบริเวณผิวของชิ้นงานทำให้เมื่อพิจารณาโฟมชีวภาพและโฟมคอมโพสิตที่มีขนาดรูพรุนใกล้เคียงกันเมื่อวัดค่า Contact angle ซึ่งเป็นการวัดที่ผิวโฟมคอมโพสิตจึงมีค่า Contact angle ที่สูงกว่าในระบบโฟมชีวภาพซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ G. Tagliavia และคณะ [46] โดยในงานวิจัยเป็นการขึ้นรูปโฟมระหว่าง PBS/NR โดยใช้ OBSH เป็นสารเร่งฟู โดยมีการเปลี่ยนสัดส่วนการผสม PBS และ NR เมื่อสัดส่วนการผสมเปลี่ยนทำให้ความหนืดในระบบเปลี่ยนไป เมื่อทำการขึ้นรูปพบว่าโฟม PBS/NR ที่มีความหนืดในระบบน้อยรูพรุนที่เกิดขึ้นจะเกิดที่บริเวณส่วนกลางชิ้นงานมากกว่าบริเวณผิวชิ้นงานเมื่อเทียบกับโฟม PBS/NR ที่มีความหนืดในระบบมาก

ตารางที่ 4.22 แสดงค่า Contact angle ของน้ำบนพื้นผิวของโฟมคอมโพสิต PLA/PBS//PEG/ZnO

Samples	Contact angle
PLA/PBS (80/20)	48.34°
PLA/PBS/ZnO (80/20/1phr)	49.14°
PLA/PBS/ZnO (80/20/3phr)	46.72°
PLA/PBS/ZnO (80/20/5phr)	43.23°
PLA/PBS/ZnO (80/20/7phr)	38.11°

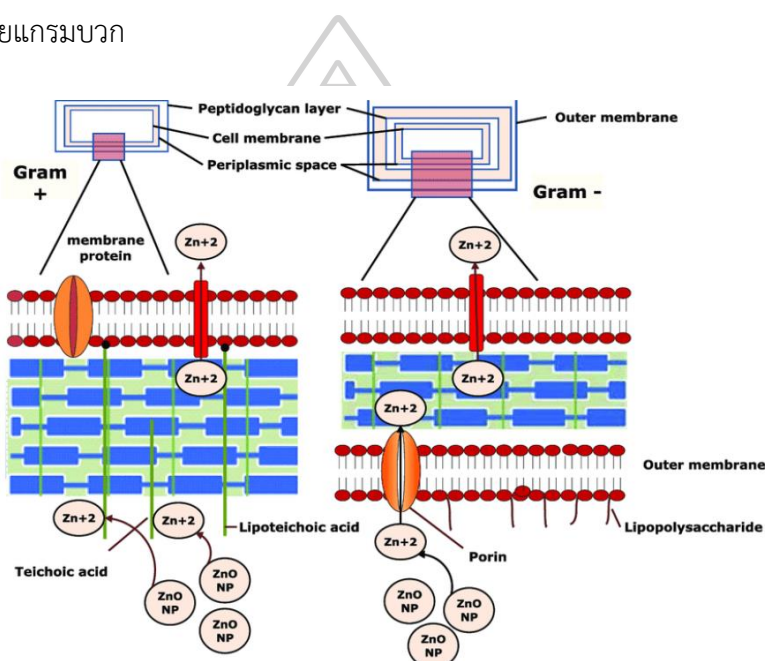
เทคนิคในการศึกษาสภาพพื้นผิวของตัวอย่าง โดยการหยดสารละลาย เช่น น้ำ แอลกอฮอล์ หรือสารเคมีอื่น ๆ ลงบนพื้นผิว และวัดมุมสัมผัสที่เกิดขึ้น สามารถประยุกต์ใช้ในงานวิจัย ซึ่งในงานวิจัยนี้ทั้งโฟมชีวภาพและโฟมคอมโพสิตเป็นโฟมชีวภาพที่มีความชอบน้ำทั้งสองระบบ



รูปที่ 4.26 แสดงการวัดค่า Contact angle [47]

4.2.6 การศึกษาผลของปริมาณ ZnO ต่อสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO (Antibacteria Activity)

บรรจุภัณฑ์อาหารที่มีความสามารถในการต้านทานแบคทีเรีย ควรเป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติต้านหรือยับยั้งการเน่าเสียของอาหาร โดยสารต้านแบคทีเรียจะช่วยลดการเติบโตของจุลินทรีย์และแบคทีเรียเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา คุณภาพและความปลอดภัยของผู้บริโภค สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้การเคลือบผิวด้วยสารต้านแบคทีเรีย คือ ซิงค์ออกไซด์ ในการยับยั้งแบคทีเรียชนิด *Escherichia Coli* (E.coli) ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ และ *Staphylococcus Aureus* (S.aureus) ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก



รูปที่ 4.27 การเข้าทำปฏิกิริยาของอนุภาคซิงค์ออกไซด์กับแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ [48]

การศึกษาสมบัติการต้านทานแบคทีเรียของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO ซึ่งจะมีการปรับเปลี่ยนปริมาณของ ZnO โดยมีปริมาณ ZnO 1, 3, 5 และ 7 phr โดยมีการเทียบกับโพลีชีวภาพ PLA/PBS โดยผลการทดสอบการต้านทานแบคทีเรียชนิด *E.coli* และ *S.aureus* จะถูกรายงานในหน่วยโคโลนีต่อมิลลิเมตร (CFU/ml) ซึ่งได้รายงานไว้ในตารางที่ 4.23 การเลือกใช้ ZnO เนื่องจากเป็น semi-conductor เมื่อถูกแสงกระตุ้นจึงทำให้ไอออนของโลหะหนักเข้าไปทำลายเชื้อแบคทีเรีย อีกทั้งหากมีความชื้นเกิดขึ้นจะทำให้เกิดเป็นเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นอีกหนึ่งตัวที่เข้าไปทำลายเชื้อแบคทีเรีย

ตารางที่ 4.23 แสดงจำนวนโคโลนีต่อมิลลิลิตรและเปอร์เซ็นต์การต้านทานเชื้อแบคทีเรียของโพลีคอมโพสิตของแบคทีเรียชนิด *E.coli*

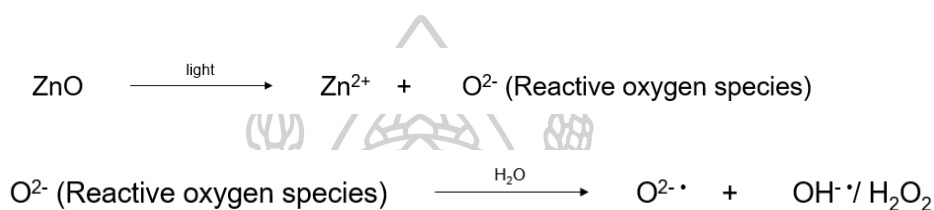
Samples	จำนวนโคโลนี (CFU/มิลลิลิตร) ×	เปอร์เซ็นต์การต้านทานเชื้อแบคทีเรีย
	10^9	
PLA/PBS (80/20)	18.20	-
PLA/PBS/ZnO (80/20/1phr)	10.40	42.85%
PLA/PBS/ZnO (80/20/3phr)	9.45	48.07%
PLA/PBS/ZnO (80/20/5phr)	8.80	51.64%
PLA/PBS/ZnO (80/20/7phr)	7.10	60.99%

ตารางที่ 4.24 แสดงจำนวนโคโลนีต่อมิลลิลิตรและเปอร์เซ็นต์การต้านทานเชื้อแบคทีเรียของโพลีคอมโพสิตของแบคทีเรียชนิด *S.aureus*

Samples	จำนวนโคโลนี (CFU/มิลลิลิตร) ×	เปอร์เซ็นต์การต้านทานเชื้อแบคทีเรีย
	10^9	
PLA/PBS (80/20)	20.50	-
PLA/PBS/ZnO (80/20/1phr)	14.65	28.54%
PLA/PBS/ZnO (80/20/3phr)	14.60	28.78%
PLA/PBS/ZnO (80/20/5phr)	5.00	75.61%
PLA/PBS/ZnO (80/20/7phr)	3.74	81.76%

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.23 พบว่าการเติมปริมาณ ZnO สามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้ ซึ่งพิจารณาได้จากเปอร์เซ็นต์การต้านทานเชื้อแบคทีเรียที่มากขึ้นเมื่อปริมาณ ZnO เพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับโพลีชีวภาพที่ไม่ได้เติม ZnO พบว่าโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 80/20 มีสามารถวัดค่าเปอร์เซ็นต์การต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้ แสดงให้เห็นว่าโพลีชีวภาพไม่สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติม ZnO ทำให้โพลีคอมโพสิตมีความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียที่สูงขึ้นสังเกตได้จากเปอร์เซ็นต์การต้านทานเชื้อแบคทีเรียที่สูงขึ้น มีประสิทธิภาพในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้ดีซึ่งเป็นไปในลักษณะเดียวกับที่ทั้งเชื้อ *E.coli* และ *S.aureus* โดยมีกลไกเริ่มต้นจากการเกิดปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง (Photocatalytic) ทำให้ ZnO เกิดการปล่อย Reactive

oxygen species (ROS) หลังจากนั้น ROS จะเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออน ($O_2^{\cdot-}$) ไฮดรอกซิลไอออน (OH^{\cdot}) ออกซิเจนเดี่ยวหรือเปอร์ออกไซด์ไอออน (H_2O_2) ดังแสดงในรูปที่ 4.28 ซึ่งซูเปอร์ออกไซด์และไฮดรอกซิลไอออนจะไม่สามารถเข้าไปจับกับผนังเซลล์ของแบคทีเรียได้เนื่องจากมีประจุเป็นลบแต่เปอร์ออกไซด์จะแทรกซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้ง่ายทำให้เซลล์ของแบคทีเรียตาย นอกจากนี้ ROS ยังมีการปล่อยซิงค์ออกไซด์ไอออน (Zn^{2+}) ซึ่งจะไปจับกับผนังเซลล์ของแบคทีเรียซึ่งเป็นประจุลบจะส่งผลให้โปรตีนจำพวก ดีเอ็นเอ (DNA) ลิพิด (Lipid) ของแบคทีเรียทำให้เซลล์แตกและตายในที่สุด



รูปที่ 4.28 แสดงปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยแสง (บน) และปฏิกิริยาถูกกระตุ้นด้วยความชื้น (ล่าง)

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO พบว่าการเติม ZnO ในปริมาณสูงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้มากขึ้น โดยเมื่อพิจารณาโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO ปริมาณ ZnO 7 phr ซึ่งเปอร์เซ็นต์การต้านทานเชื้อแบคทีเรียชนิด E.coli เท่ากับ 60.99% และเปอร์เซ็นต์การต้านทานเชื้อแบคทีเรียชนิด S.aureus เท่ากับ 81.76% แตกต่างกัน 11.17% แสดงให้เห็นว่า ZnO มีประสิทธิภาพในการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย S.aureus ได้ดีกว่าการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย E.coli

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 การศึกษาผลของอัตราส่วน PLA/PBS ต่อสมบัติของโพลีชีวภาพระหว่าง PLA/PBS

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมโพลีชีวภาพ PLA/PBS/PEG เพื่อนำไปเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัด (Compression molding) เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วน PLA/PBS ต่อสมบัติทางด้านสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสมบัติการดูดซับน้ำของโพลีชีวภาพ PLA/PBS พบว่าเมื่อปริมาณ PBS มากขึ้นขนาดของรูพรุนจะใหญ่ขึ้น ความหนาแน่นของปริมาณรูพรุนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ลดลง ทำให้ความสามารถในการต้านทานการดัดงอลดลงแต่ความสามารถในการยืดหยุ่นดีขึ้น อุณหภูมิในการสลายตัวไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ลดลง อุณหภูมิหลอมเหลวไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง สามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณที่น้อยลงแต่มีอัตราเร็วในการดูดซับในช่วงแรกมากขึ้น

5.2 การศึกษาผลปริมาณการเติม ZnO ต่อสมบัติของโพลีคอมโพสิตระหว่าง PLA/PBS/PEG

โพลีชีวภาพ PLA/PBS/PEG ที่อัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการศึกษาโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO เมื่อพิจารณาผลของปริมาณการเติม ZnO ต่อสมบัติทางด้านสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสมบัติการดูดซับน้ำของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/PEG/ZnO พบว่า เมื่อปริมาณ ZnO มากขึ้นขนาดของรูพรุนจะใหญ่ขึ้น ความหนาแน่นของปริมาณรูพรุนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ลดลง ทำให้ความสามารถในการต้านทานการดัดงอลดลง ความสามารถในการยืดหยุ่นก็ลดลงเช่นกันแต่เมื่อเทียบกับโพลีชีวภาพว่าความสามารถในการยืดหยุ่นมากขึ้น อุณหภูมิในการสลายตัวลดลง อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง สามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณที่น้อยลงแต่มีอัตราเร็วในการดูดซับในช่วงแรกมากขึ้น ความสามารถในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียมากขึ้นทั้งเชื้อ E.coli และ S.aureus

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.7.1 ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถทำชิ้นงานตัวอย่างเป็นโพลีนิ่มได้เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติแข็งเปราะ หากต้องการทำให้ขึ้นรูปได้โพลีนิ่ม ต้องมีการปรับโครงสร้างของ PLA ก่อนแล้วจึงทำการขึ้นรูปเป็นโพลีในขั้นตอนถัดไป

5.7.2 การควบคุมการทำงานของสารเร่งฟุ้งยังทำได้ไม่เต็มที่ควรเนื่องจากต้องควบคุมไม่ให้สารเร่งฟุ้งทำงานขณะทำการผสมซึ่งจะมีบางส่วนที่เกิดการแตกตัวออกหากต้องการควบคุมให้สารเร่งฟุ้งไม่ทำงานในขั้นตอนนี้ควรปรับปรุงพอลิเมอร์ที่ใช้ให้มีอุณหภูมิหลอมเหลวลดลง

5.7.3 รูปแบบที่ใช้ในการขึ้นรูปโฟมควรจะเปลี่ยนจากการกดอัดเป็น CO₂ Supercritical เนื่องจากโดยส่วนใหญ่แล้วการทำด้วยเทคนิค CO₂ Supercritical จะได้โครงสร้างเป็นเซลล์เปิดเนื่องจากเป็นการใช้ CO₂ โดยตรง

5.7.4 ใช้เทคนิค Dynamic mechanical analysis (DMA) เพื่อความแม่นยำในการใช้อุณหภูมิในการผสมและขึ้นรูป







ภาคผนวก ก
ข้อมูลผลการทดลอง

1. ข้อมูลการทดสอบสมบัติการดูดซับน้ำของโพลีชีวภาพ PLA/PBS และ โพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO

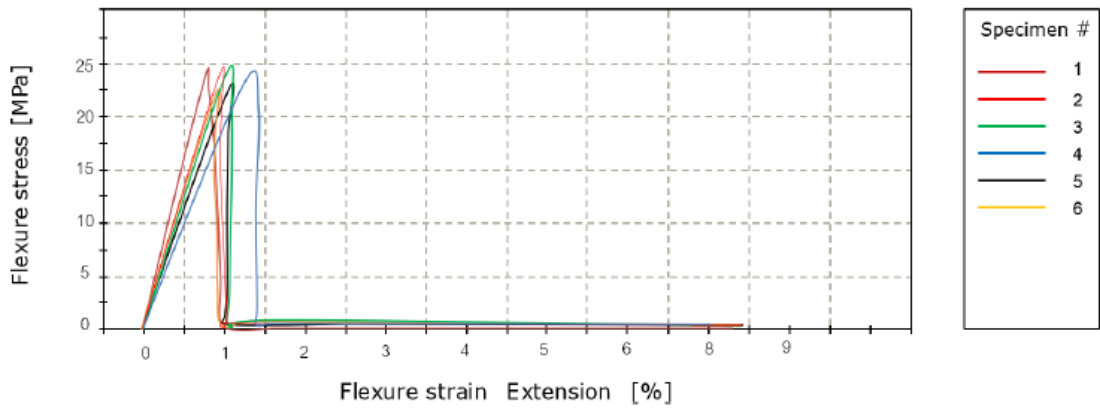
ตารางที่ ก.1 แสดงข้อมูลน้ำหนักของน้ำที่ดูดซับในโพลีชีวภาพ

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักของน้ำที่ดูดซับเข้าไปในชิ้นงานตัวอย่าง PLA/PBS (กรัม)								
	100/0	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60	30/70	20/80	0/100
0.083	3.23	3.48	2.39	3.19	2.05	3.46	4.29	1.44	0.10
0.167	3.77	5.06	2.98	4.35	2.15	4.55	4.91	1.59	0.35
0.333	4.85	6.57	4.97	6.18	3.59	6.25	5.95	2.08	0.48
1.333	7.14	8.69	8.70	9.06	5.75	7.95	8.25	3.21	0.54
2.333	8.93	9.86	10.72	11.3	7.38	9.37	9.47	3.38	0.91
3.333	9.41	10.21	12.1	11.87	8.12	10.48	10.05	3.94	1.35
4.333	10.46	10.51	13.83	12.77	8.33	10.81	11.98	4.80	1.66
5.333	11.51	11.09	15.31	13.71	10.06	11.04	11.37	4.49	1.75
7.333	12.54	12.04	17.72	15.23	11.42	11.7	12.96	4.94	1.94
9.333	13.81	12.57	18.82	16.32	12.73	12.31	13.66	5.22	2.31
21.333	18.83	16.55	22.65	17.59	16.15	14.34	17.21	7.42	2.41
45.333	23.42	20.66	25.76	18.15	19.47	21.14	24.51	12.67	2.94
69.333	30.05	22.92	29.53	21.67	22.16	26.32	29.6	15.01	3.43
117.33	30.42	25.61	30.5	24.25	23.14	30.49	32.26	15.71	3.91
165.33	31.08	28.95	31.73	26.00	24.12	33.32	34.57	18.17	4.48
213.33	33.58	31.77	33.73	28.11	26.11	34.42	36.04	19.27	4.65
261.33	34.84	35.8	35.41	31.17	26.77	42.06	38.47	20.98	4.74
309.33	35.25	36.69	37.51	31.93	28.2	42.67	39.63	21.29	4.81
357.33	36.14	37.31	38.22	32.77	28.49	43.58	40.00	22.10	4.98

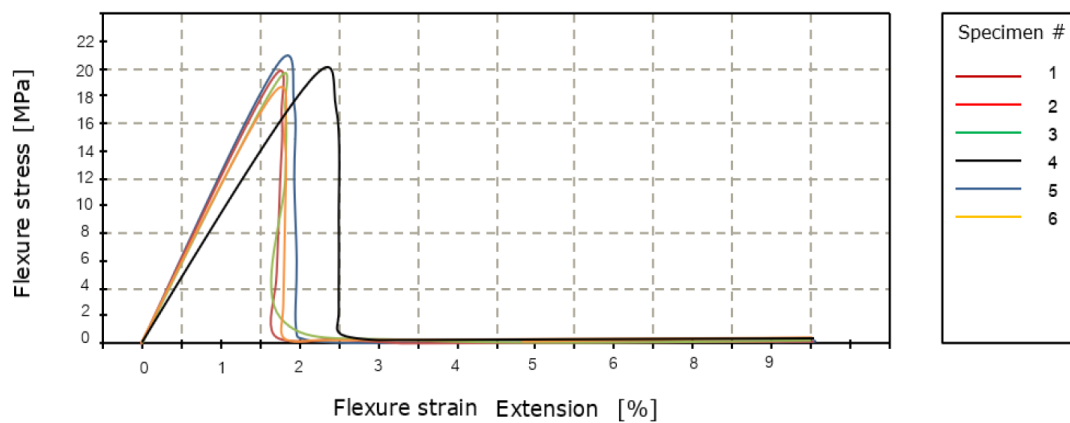
ตารางที่ ก.2 แสดงข้อมูลน้ำหนักของน้ำที่ดูดซับในโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักของน้ำที่ดูดซับเข้าไปในชิ้นงานตัวอย่าง PLA/PBS/ZnO (กรัม)				
	ZnO 0phr	ZnO 1phr	ZnO 3phr	ZnO 5phr	ZnO 7phr
0.0833	3.48	4.01	4.16	4.22	4.25
0.1667	5.06	6.05	6.35	6.41	6.45
0.3333	6.57	8.06	8.14	8.24	8.35
1.3333	8.69	10.24	10.39	10.56	10.67
2.3333	9.86	12.12	12.56	12.74	12.93
3.3333	10.21	13.45	13.68	13.84	13.91
4.3333	10.51	14.39	14.5	14.52	14.61
5.3333	11.09	15.26	15.66	15.75	15.86
7.3333	12.04	16.29	16.47	16.64	16.76
9.3333	12.57	17.35	17.69	17.73	17.78
21.333	16.55	18.98	19.14	19.06	18.65
45.333	20.66	20.03	20.41	20.13	19.57
69.333	22.92	21.22	21.39	21.12	20.14
117.333	25.61	22.34	22.48	22.23	21.23
165.333	28.95	22.98	23.21	22.89	22.87
213.333	31.77	23.51	24.03	23.21	23.19
261.333	35.80	24.03	24.65	23.59	23.55
309.333	36.69	24.56	25.02	24.12	23.96
357.333	37.31	24.95	25.16	24.68	24.43
381.333	37.98	25.02	25.37	24.97	24.65
405.333	38.03	25.38	25.41	25.13	24.87
429.333	38.14	25.65	25.56	25.32	25.04
453.333	38.20	25.74	25.62	25.24	25.10

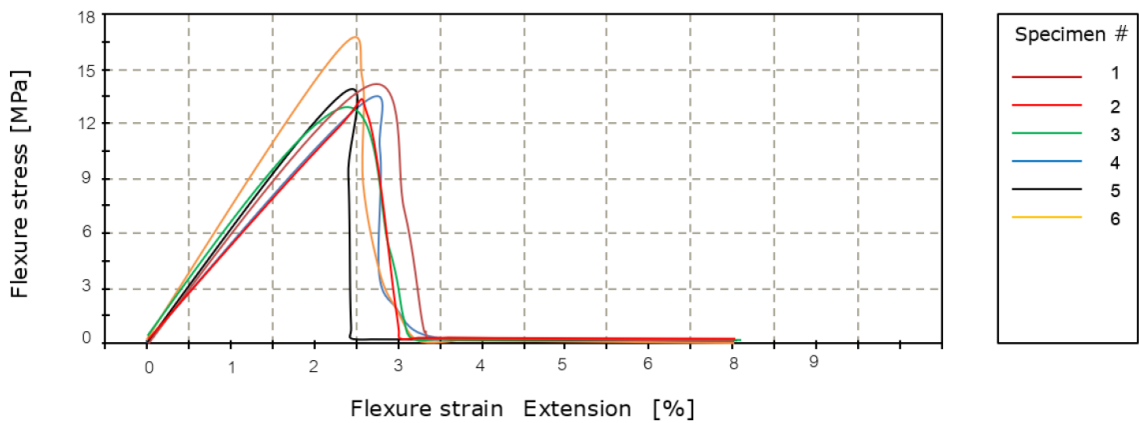
2. ข้อมูลการทดสอบสมบัติเชิงกลของโพลีชีวภาพ PLA/PBS และ โพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO



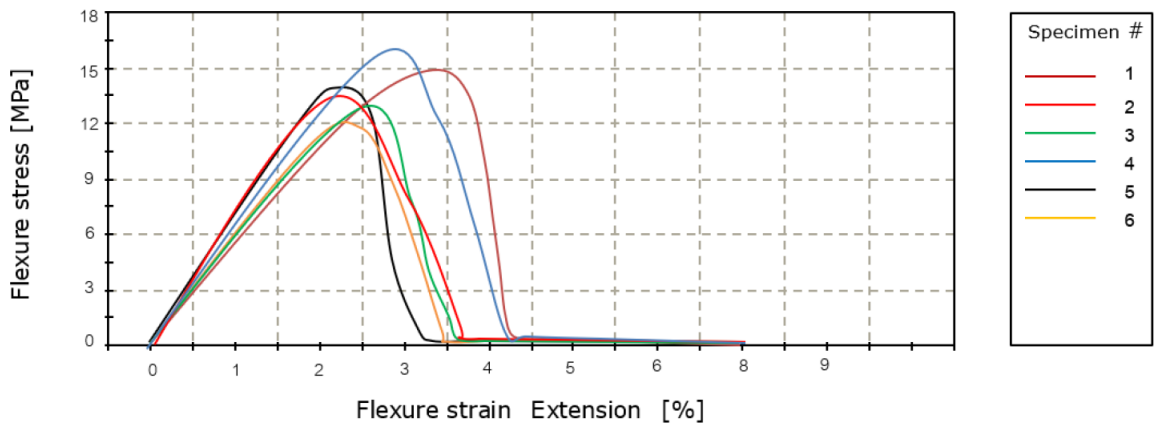
รูปที่ ก.1 แสดงกราฟ Stress – Strain curve ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 100/0



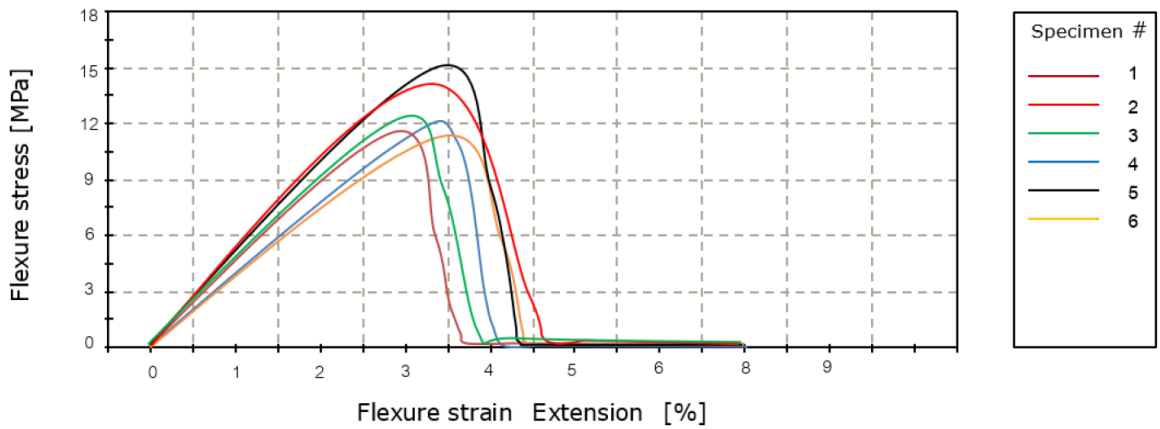
รูปที่ ก.2 แสดงกราฟ Stress – Strain curve ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 80/20



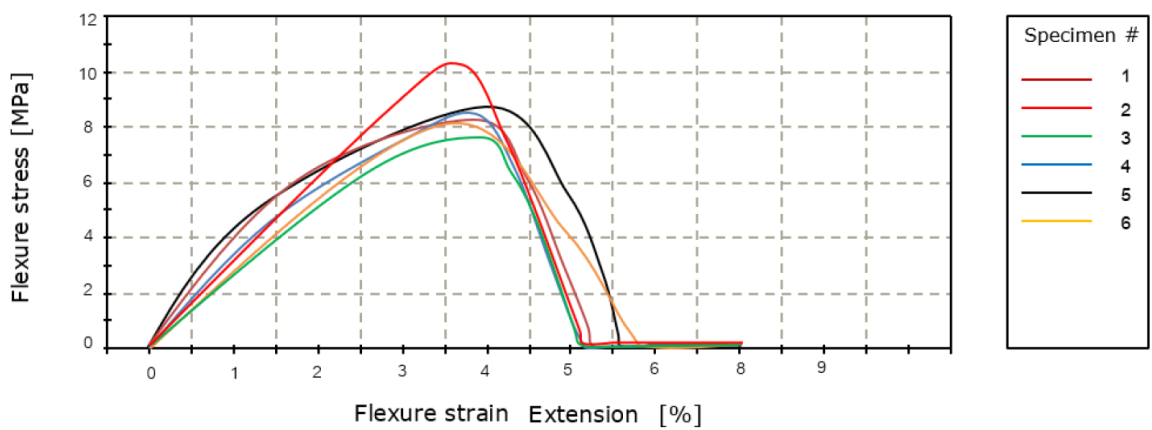
รูปที่ ก.3 แสดงกราฟ Stress – Strain curve ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 70/30



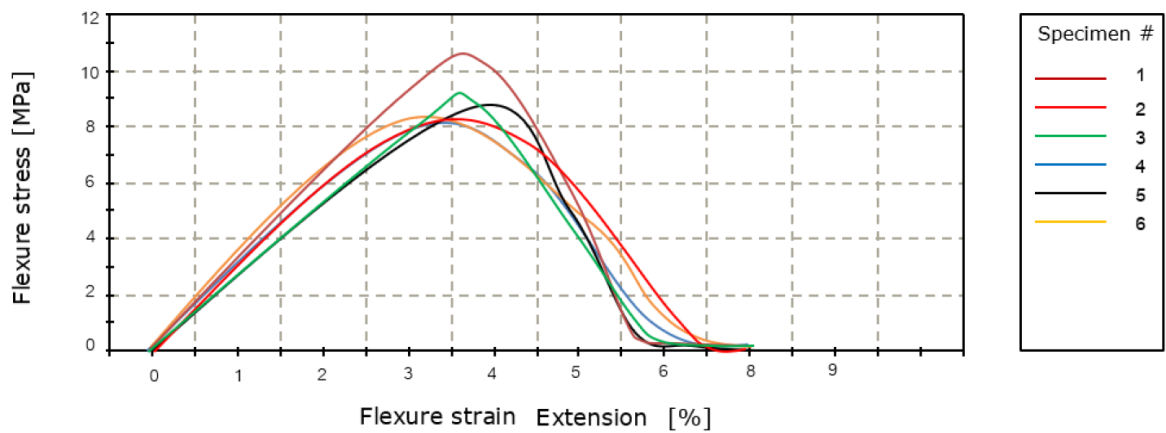
รูปที่ ก.4 แสดงกราฟ Stress – Strain curve ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 60/40



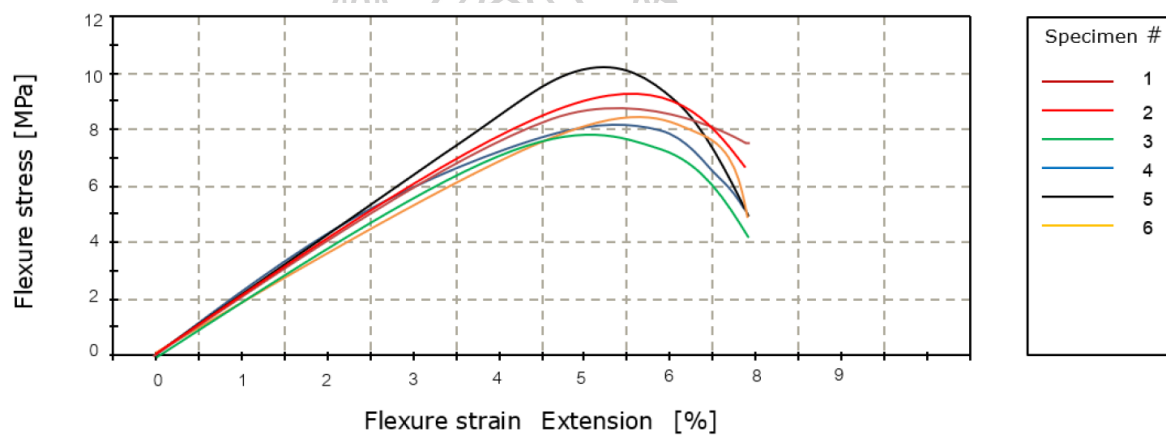
รูปที่ ก.5 แสดงกราฟ Stress – Strain curve ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 50/50



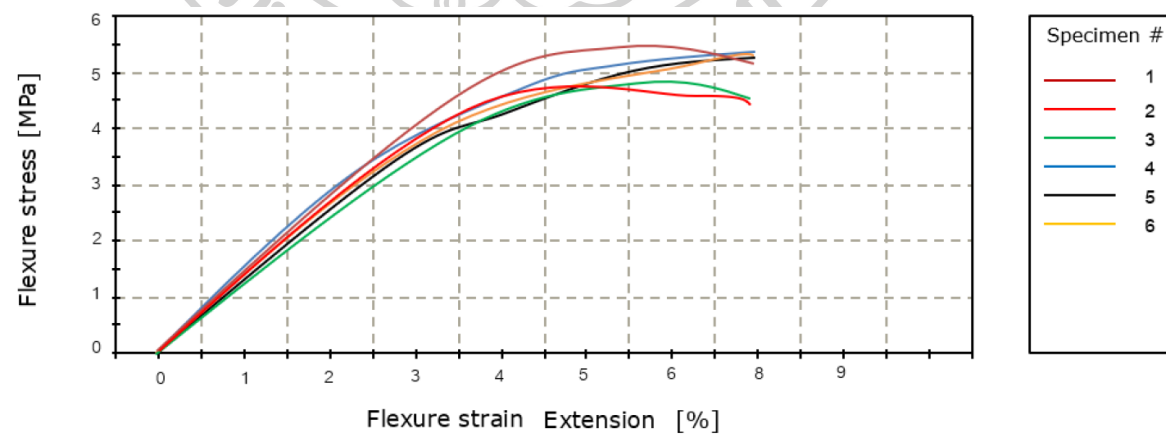
รูปที่ ก.6 แสดงกราฟ Stress – Strain curve ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 40/60



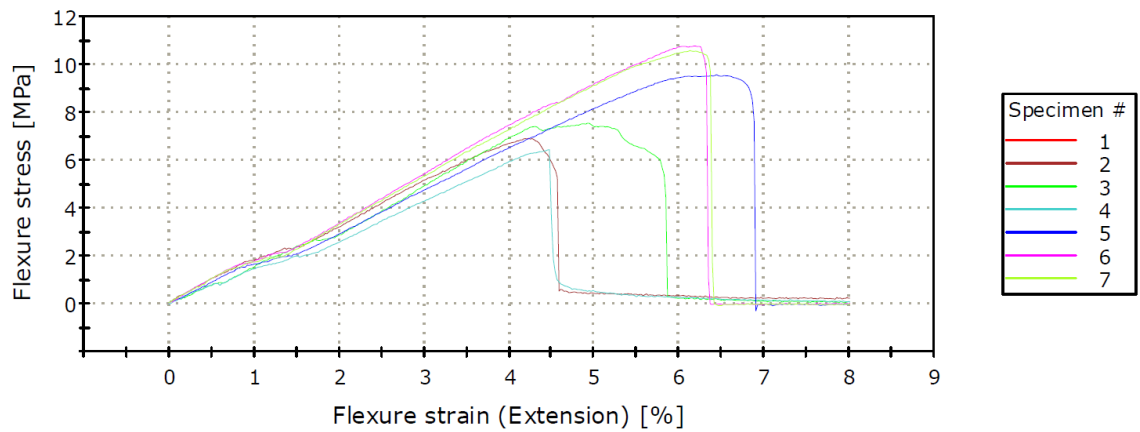
รูปที่ ก.7 แสดงกราฟ Stress – Strain curve ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 30/70



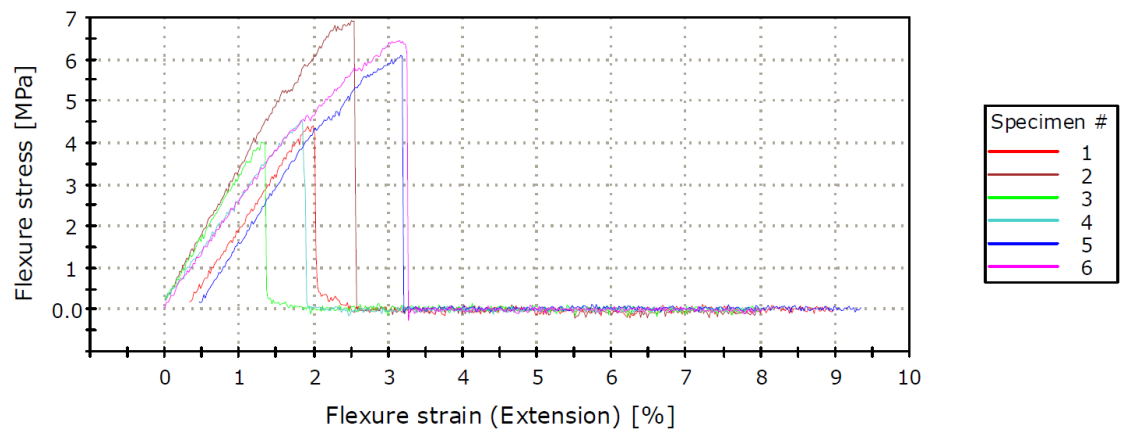
รูปที่ ก.8 แสดงกราฟ Stress – Strain curve ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 20/80



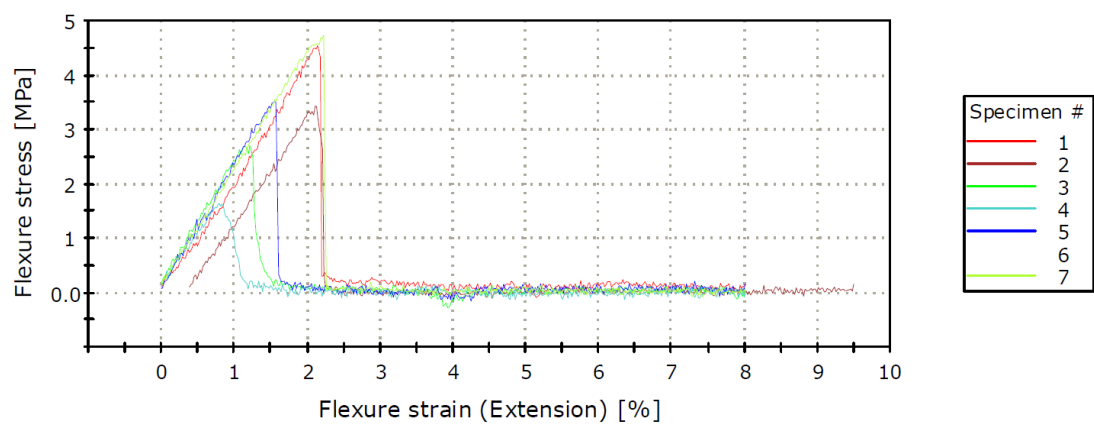
รูปที่ ก.9 แสดงกราฟ Stress – Strain curve ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 0/100



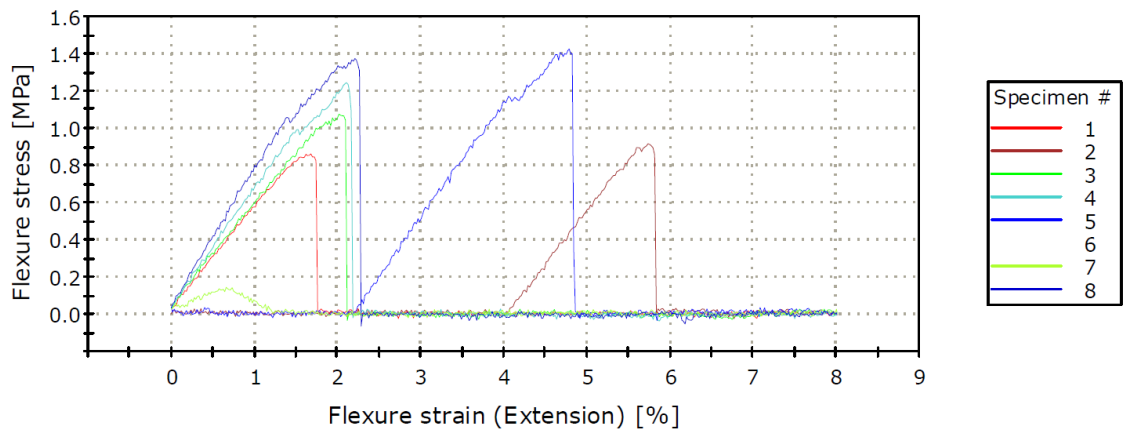
รูปที่ ก.10 แสดงกราฟ Stress – Strain curve ของโพลีคอมโพสิต ปริมาณ ZnO 1phr



รูปที่ ก.11 แสดงกราฟ Stress – Strain curve ของโพลีคอมโพสิต ปริมาณ ZnO 3phr



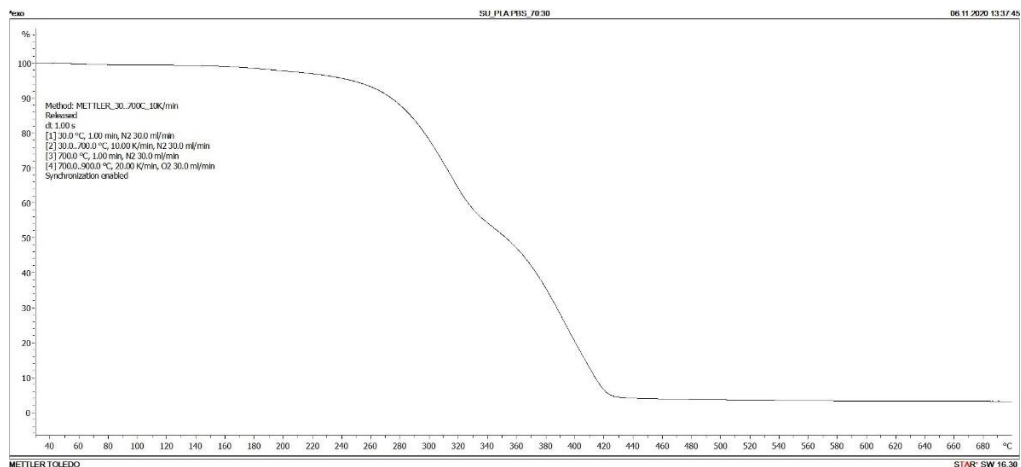
รูปที่ ก.12 แสดงกราฟ Stress – Strain curve ของโพลีคอมโพสิตปริมาณ ZnO 5phr



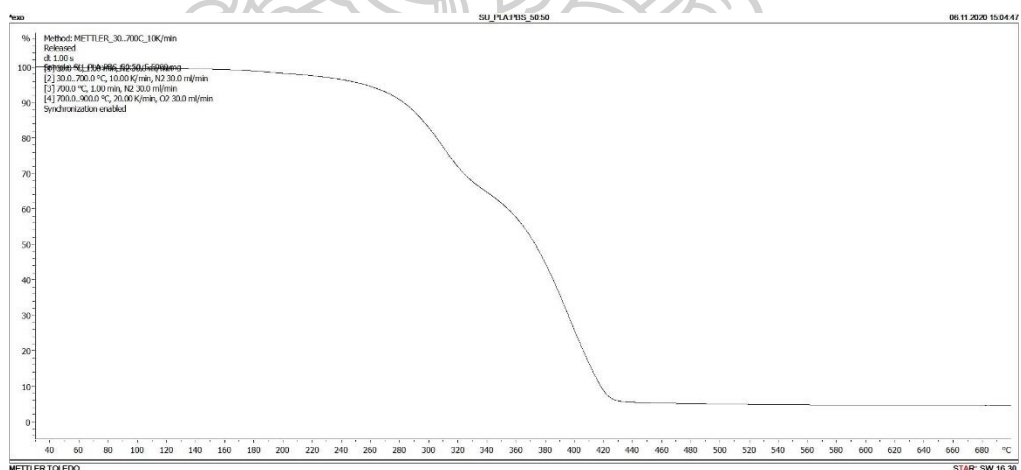
รูปที่ ก.13 แสดงกราฟ Stress – Strain curve ของโพลีคอมโพสิตปริมาณ ZnO 7phr



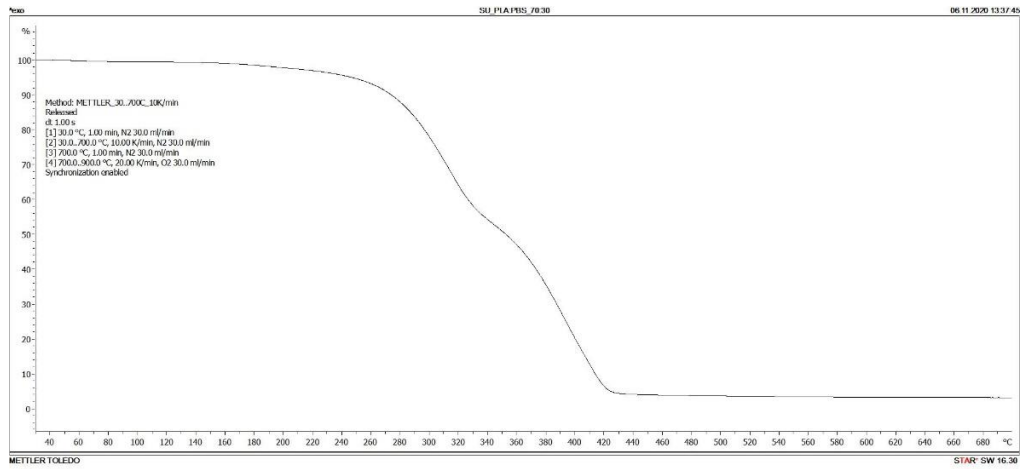
3. ข้อมูลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของโพลีชีวภาพ PLA/PBS และ โพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO ด้วยเทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA)



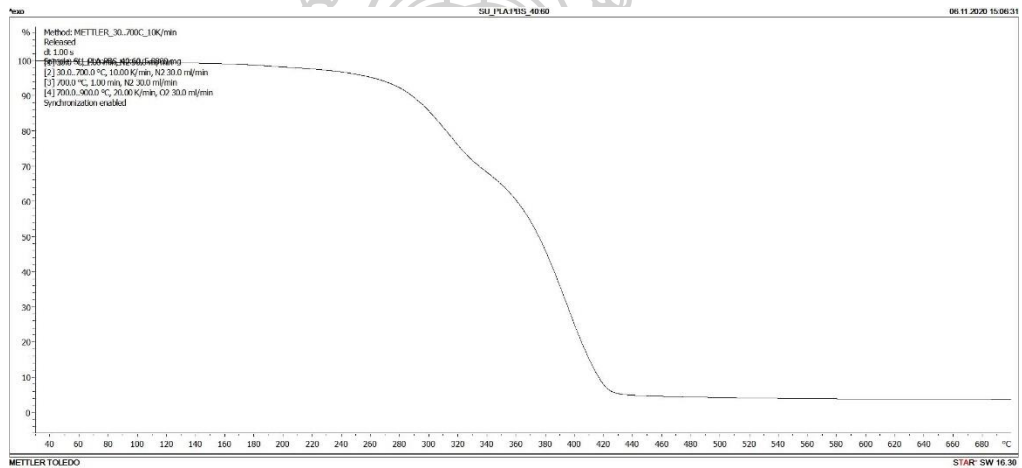
รูปที่ ก.14 แสดง TGA thermogram ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 100/0



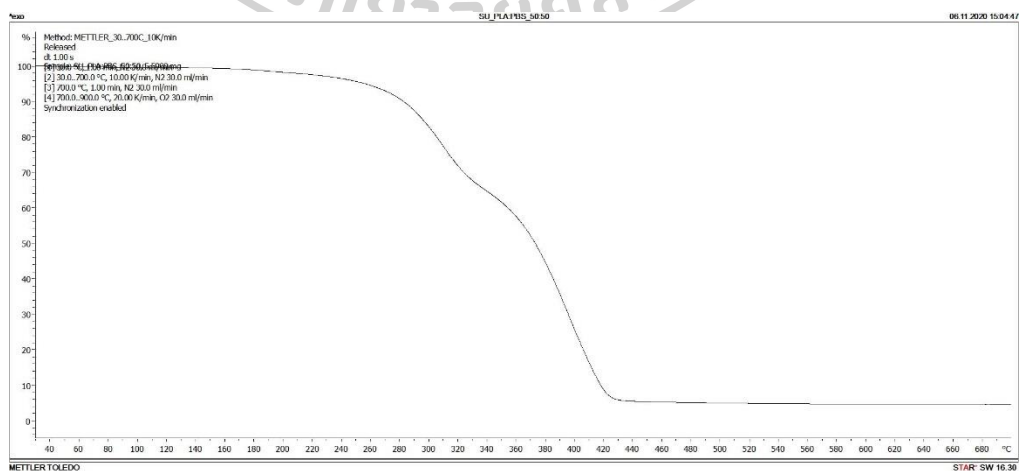
รูปที่ ก.15 แสดง TGA thermogram ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 80/20



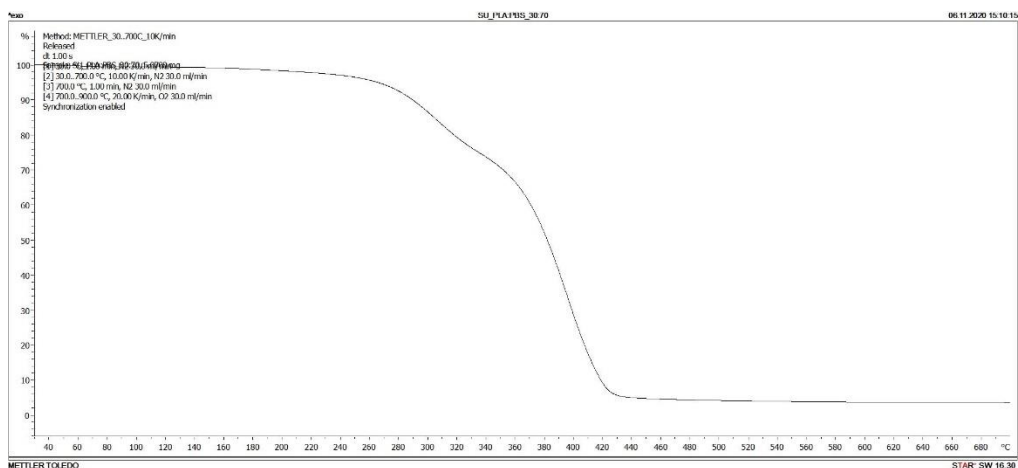
รูปที่ ก.16 แสดง TGA thermogram ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 70/30



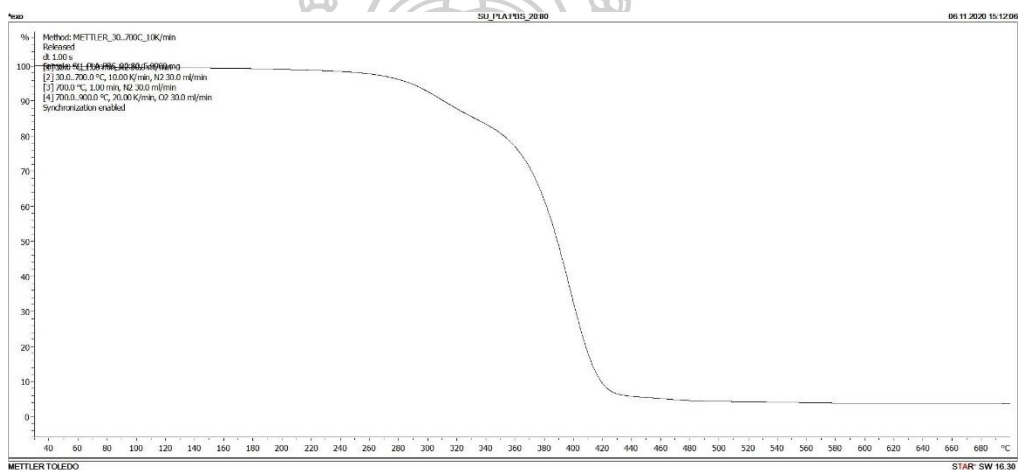
รูปที่ ก.17 แสดง TGA thermogram ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 60/40



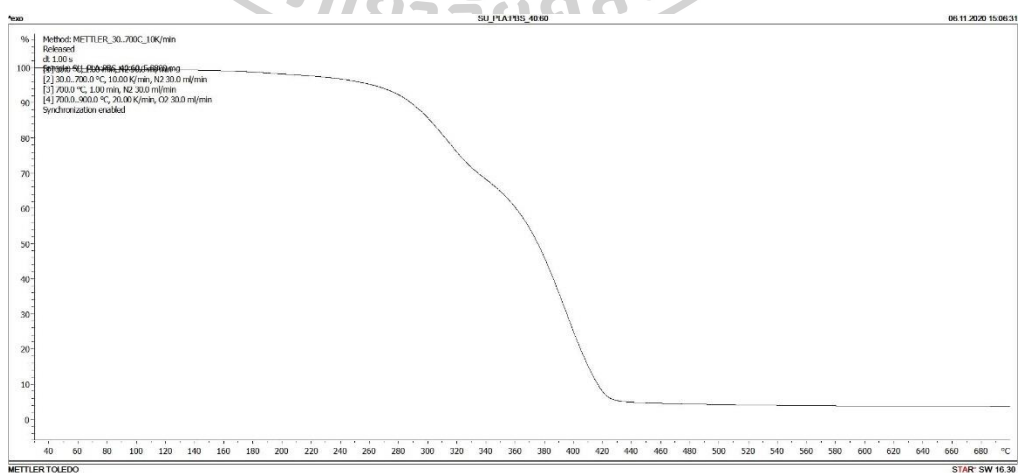
รูปที่ ก.18 แสดง TGA thermogram ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 50/50



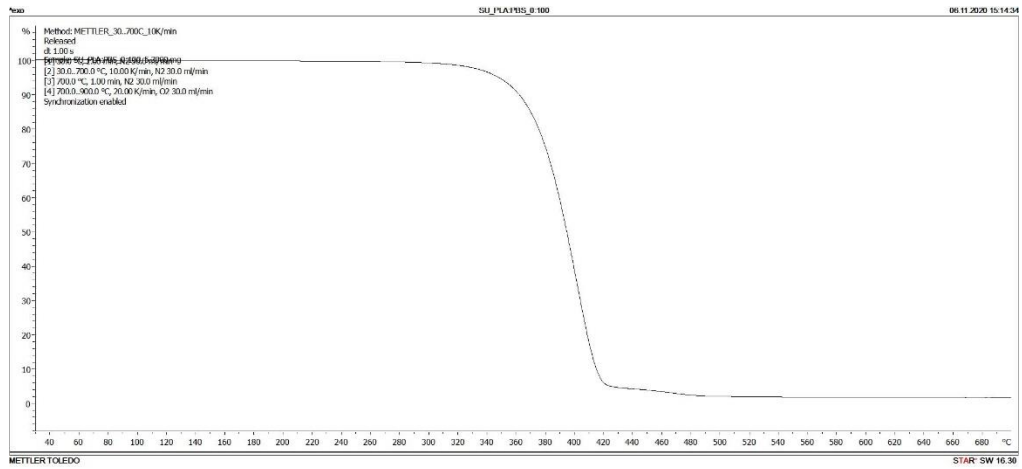
รูปที่ ก.19 แสดง TGA thermogram ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 40/60



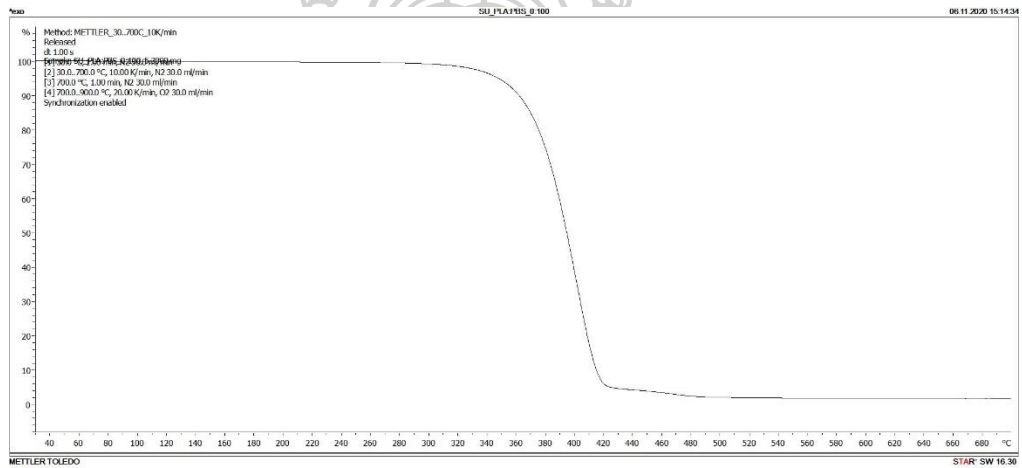
รูปที่ ก.20 แสดง TGA thermogram ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 30/70



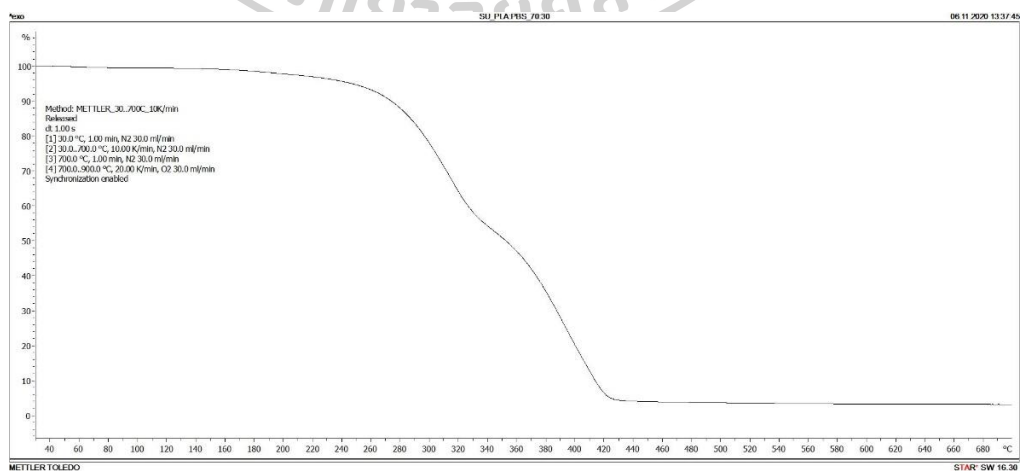
รูปที่ ก.21 แสดง TGA thermogram ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 20/80



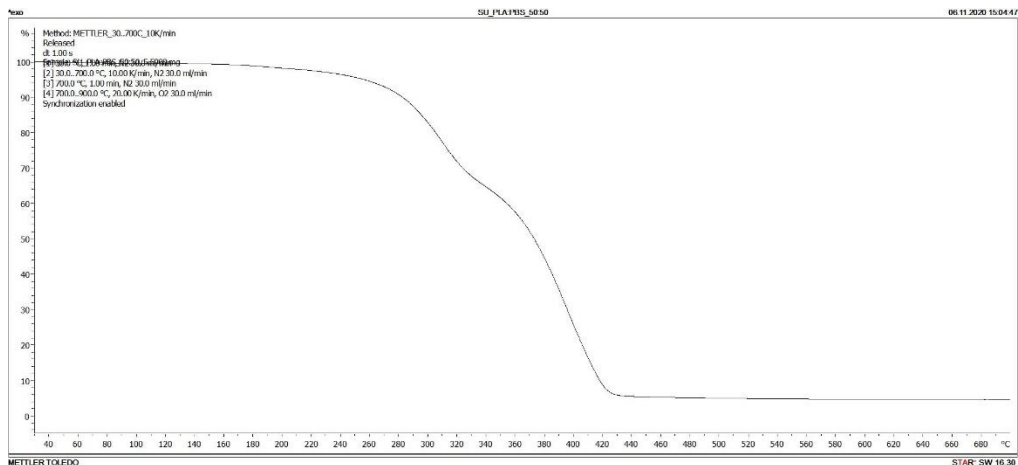
รูปที่ ก.22 แสดง TGA thermogram ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 0/100



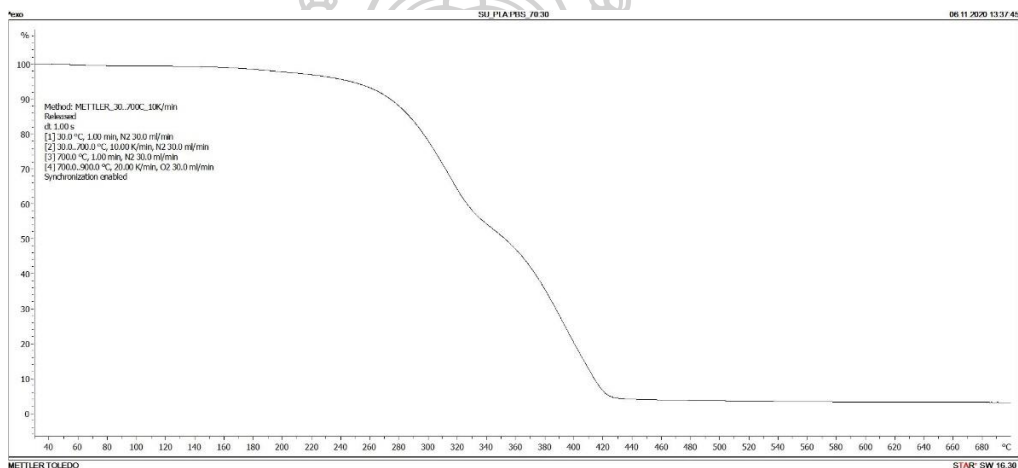
รูปที่ ก.23 แสดง TGA thermogram ของโพลีคอมโพสิตปริมาณ ZnO 1phr



รูปที่ ก.24 แสดง TGA thermogram ของโพลีคอมโพสิตปริมาณ ZnO 3phr

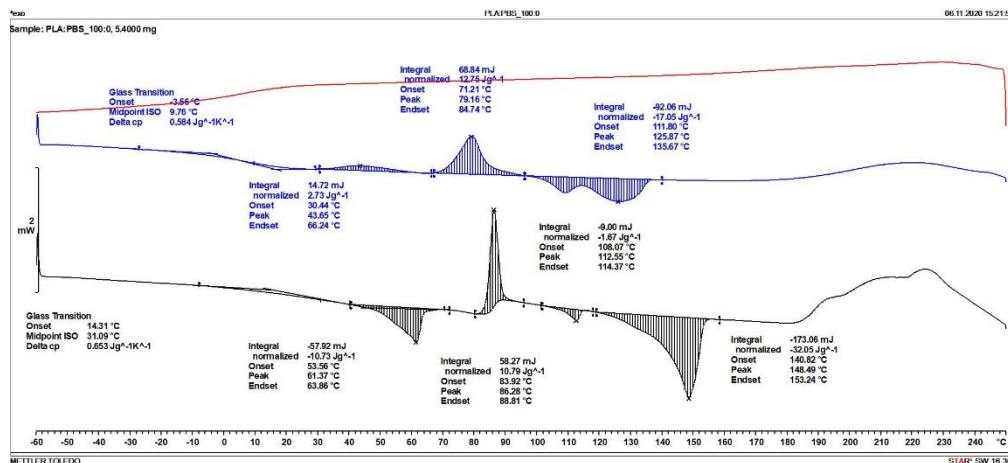


รูปที่ ก.25 แสดง TGA thermogram ของโฟมคอมโพสิตปริมาณ ZnO 5phr

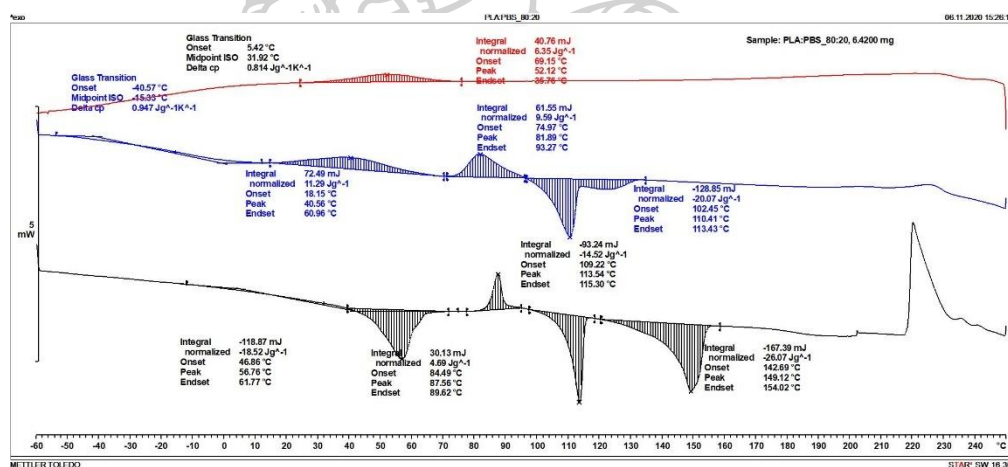


รูปที่ ก.26 แสดง TGA thermogram ของโฟมคอมโพสิตปริมาณ ZnO 7phr

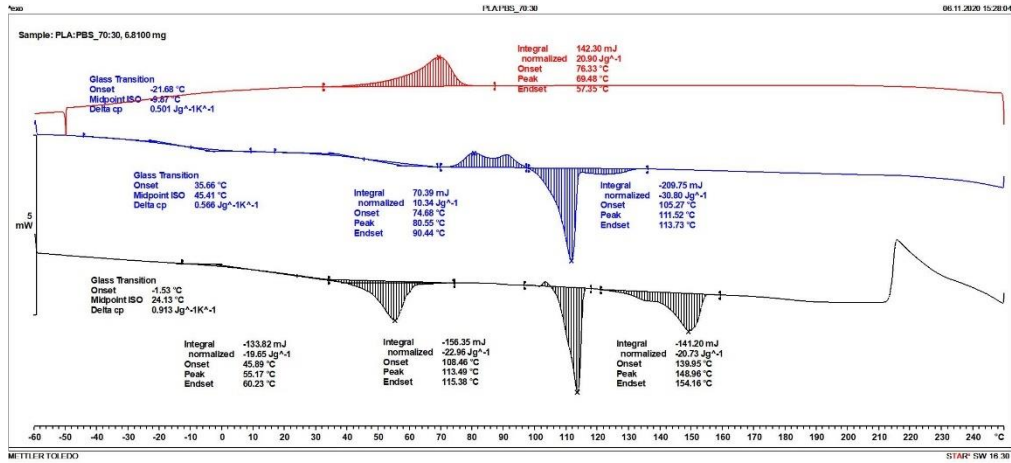
4. ข้อมูลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของโพลีชีวภาพ PLA/PBS และ โพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimeter (DSC)



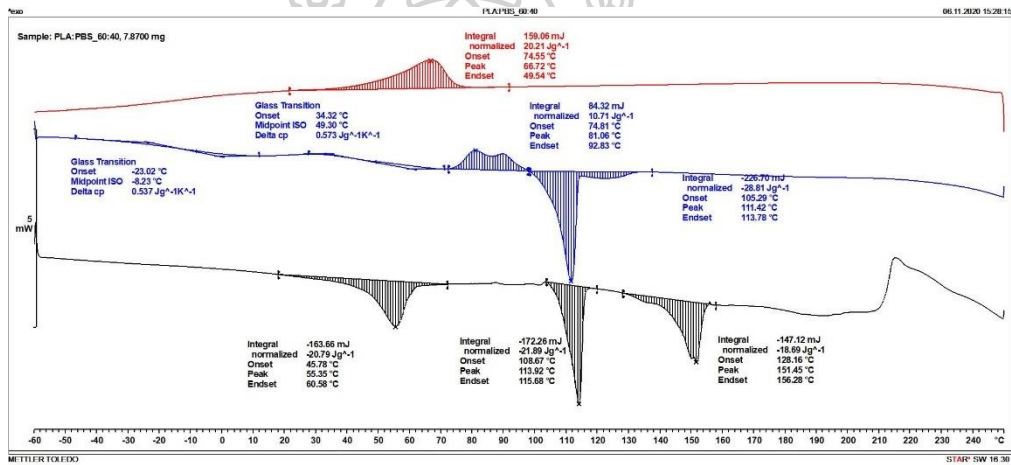
รูปที่ ก.27 แสดง DSC thermogram ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 100/0



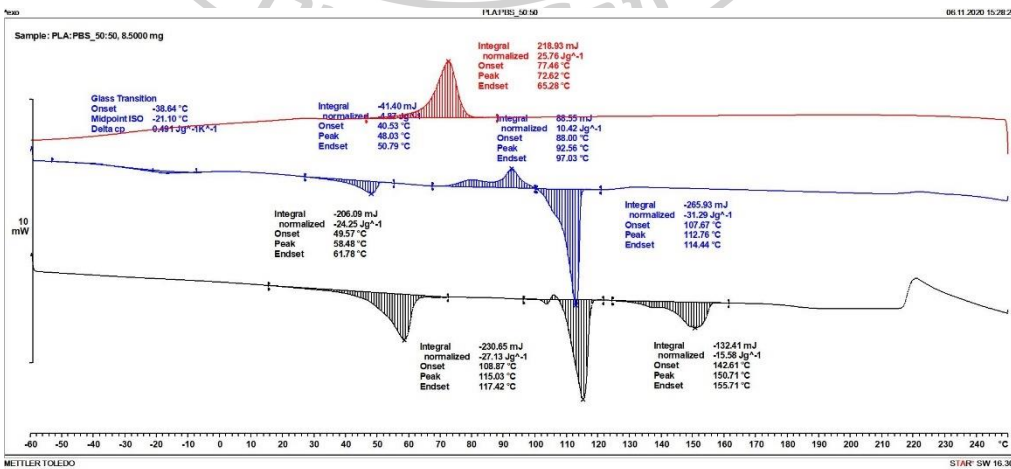
รูปที่ ก.28 แสดง DSC thermogram ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 80/20



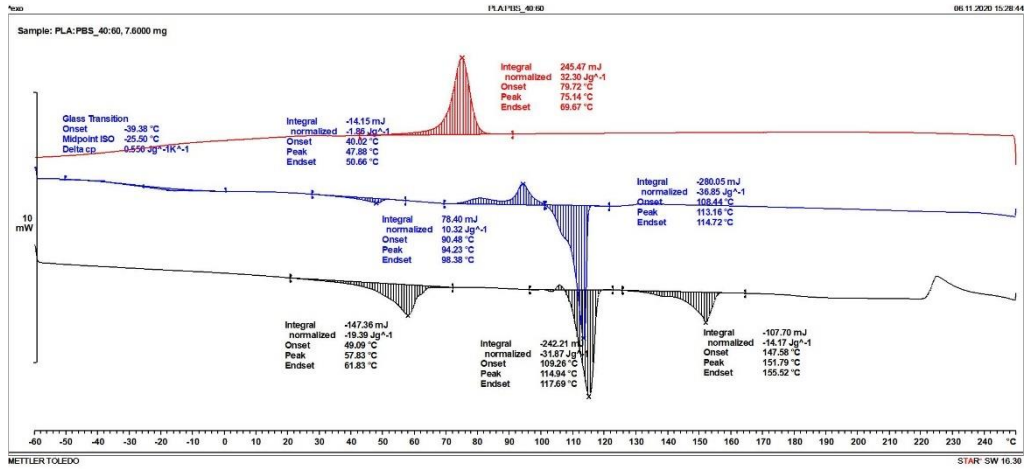
รูปที่ ก.29 แสดง DSC thermogram ของโพลิเอทิลีน กราฟ PLA/PBS ปริมาณ 70/30



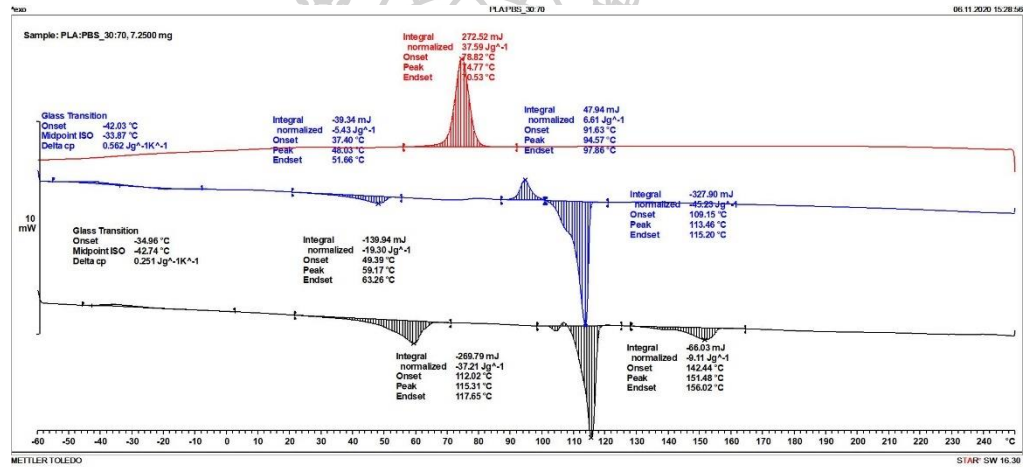
รูปที่ ก.30 แสดง DSC thermogram ของโพลิเอทิลีน กราฟ PLA/PBS ปริมาณ 60/40



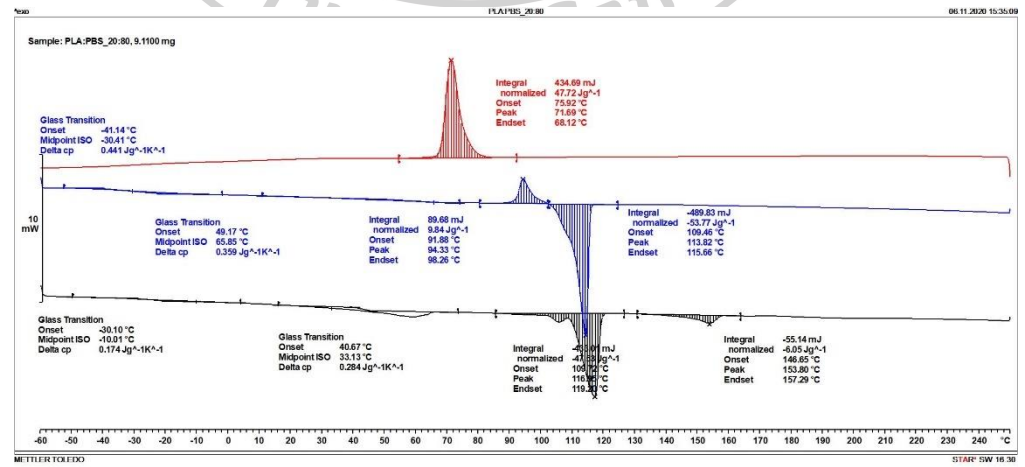
รูปที่ ก.31 แสดง DSC thermogram ของโพลิเอทิลีน กราฟ PLA/PBS ปริมาณ 50/50



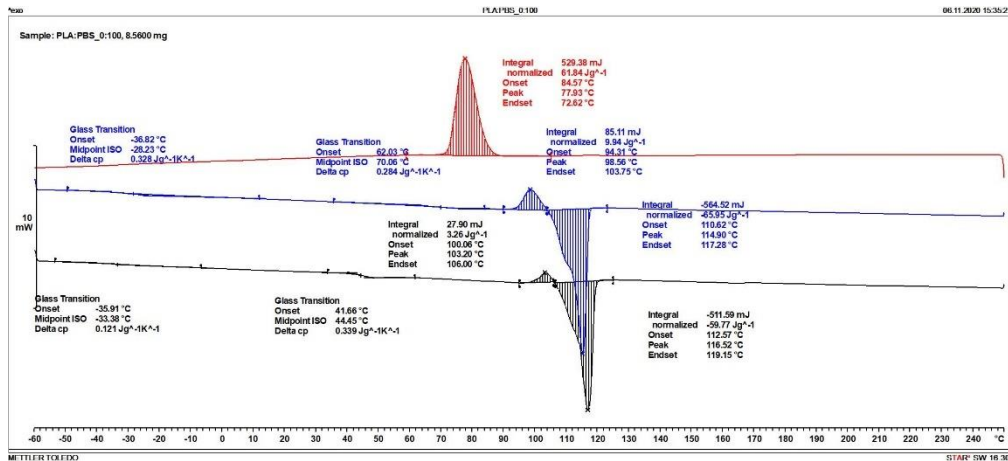
รูปที่ ก.32 แสดง DSC thermogram ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 40/60



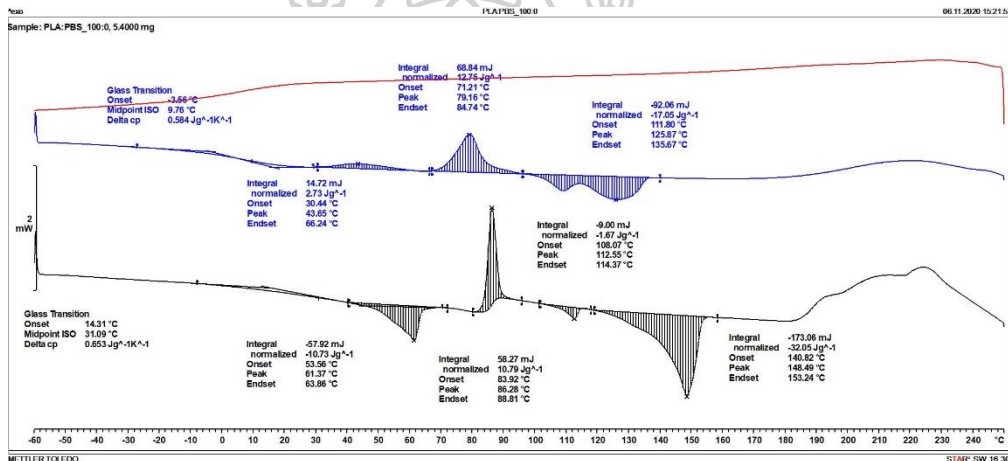
รูปที่ ก.33 แสดง DSC thermogram ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 30/70



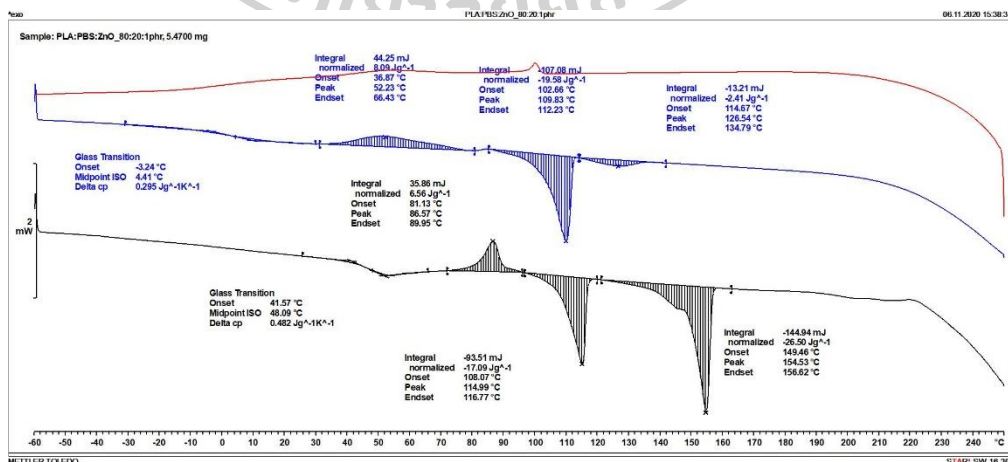
รูปที่ ก.33 แสดง DSC thermogram ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 20/80



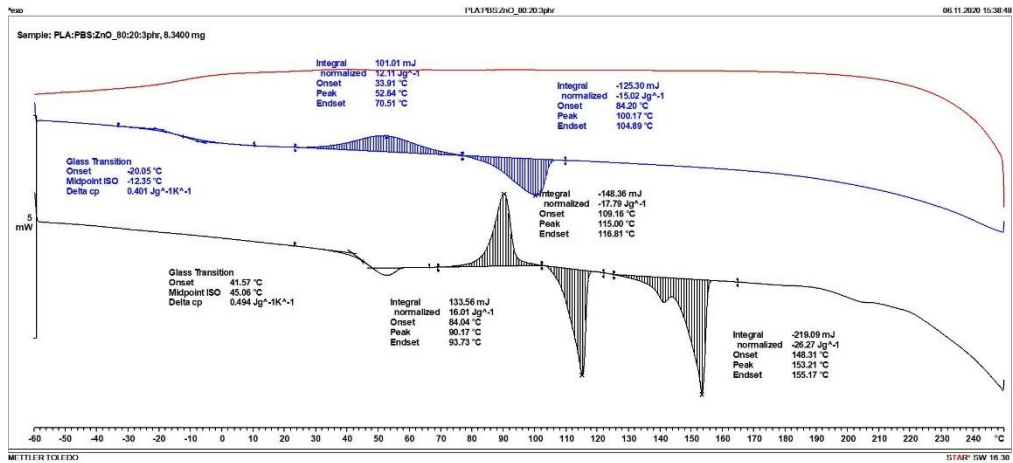
รูปที่ ก.34 แสดง DSC thermogram ของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 0/100



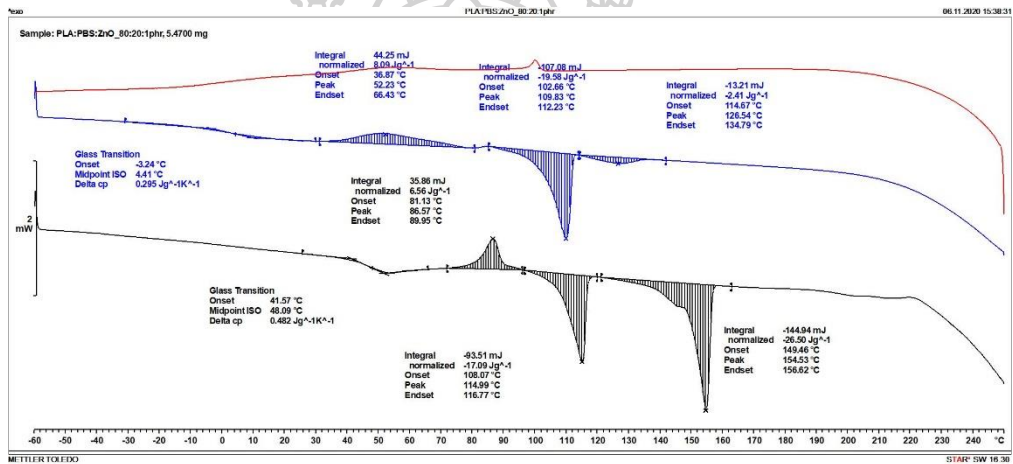
รูปที่ ก.35 แสดง DSC thermogram ของโพลีคอมโพสิตปริมาณ ZnO 1phr



รูปที่ ก.36 แสดง DSC thermogram ของโพลีคอมโพสิตปริมาณ ZnO 3phr



รูปที่ ก.36 แสดง DSC thermogram ของโพลีคอมโพสิตปริมาณ ZnO 5phr

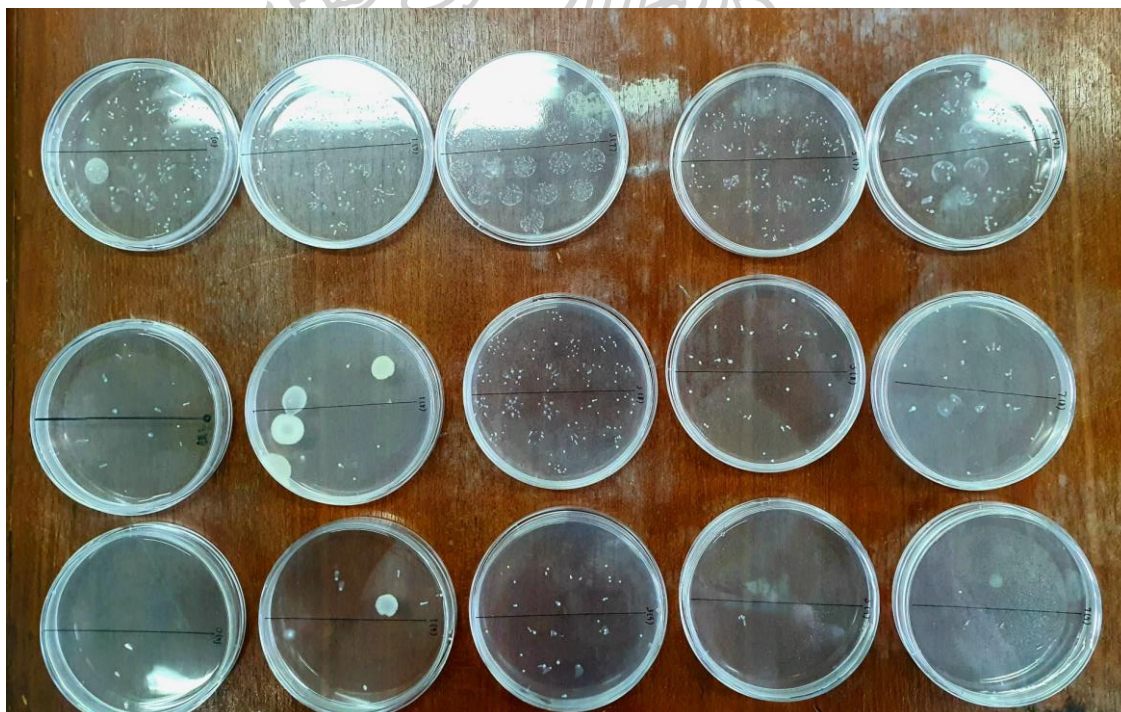


รูปที่ ก.37 แสดง DSC thermogram ของโพลีคอมโพสิตปริมาณ ZnO 7phr

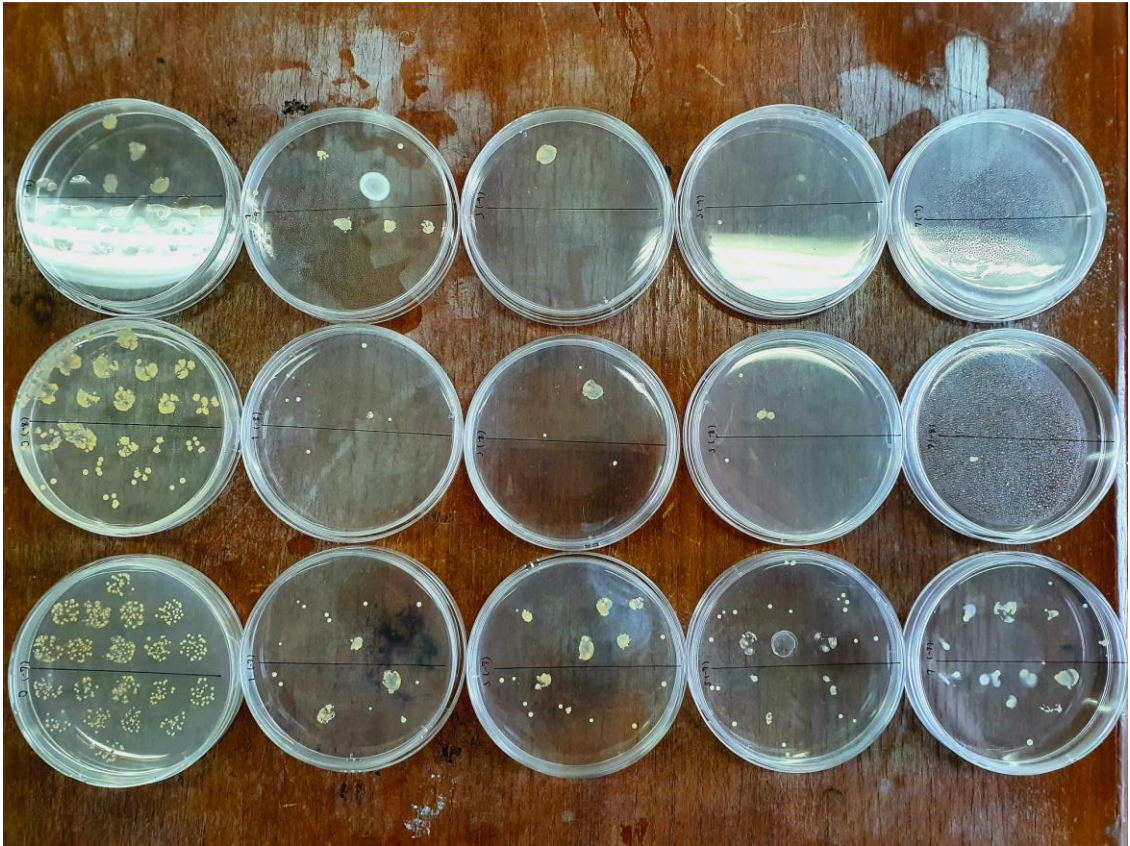
5. ข้อมูลการทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของโพลีเมอร์ชีวภาพ PLA/PBS และ โพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO

ตาราง ก.3 แสดงจำนวนโคโลนีต่อมิลลิลิตรของโพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO

ปริมาณ ZnO โพลีคอมโพสิต (phr)	จำนวนโคโลนี (CFU/มิลลิลิตร) $\times 10^9$			
	<i>E.coli</i>		<i>S.aureus</i>	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
0	17.8	18.6	19.7	21.3
1	10.7	10.1	15.8	13.5
3	9.7	9.2	10.7	18.5
5	8.5	9.1	5.4	4.6
7	7.3	6.9	3.2	4.3



รูปที่ ก.38 แสดงจำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียชนิด *E.Coli*



รูปที่ ก.38 แสดงจำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียชนิด *S.aureus*



6. ข้อมูลการทดสอบความหนาแน่นของของโพลีชีวภาพ PLA/PBS และ โพลีคอมโพสิต PLA/PBS/ZnO

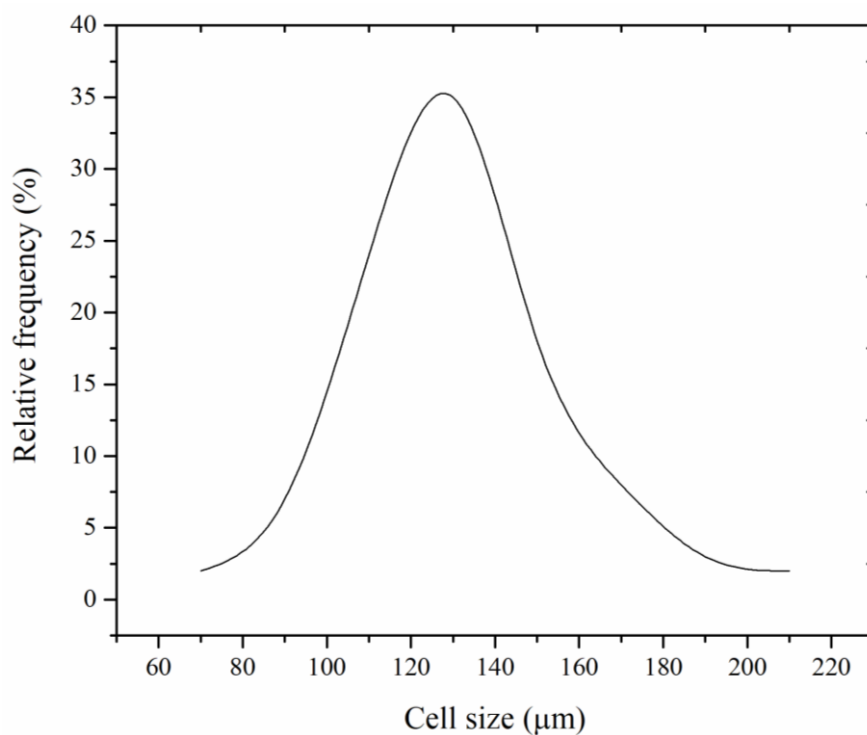
ตารางที่ ก.4 แสดงค่าความหนาแน่นและน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบของโพลีชีวภาพ

ชิ้นงานทดสอบ PLA/PBS	น้ำหนักชิ้นงานทดสอบ (g)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
100/0	1.46	0.54
80/20	1.38	0.68
70/30	1.65	0.72
60/40	1.52	0.78
50/50	1.63	0.82
40/60	1.59	0.83
30/70	1.37	0.86
20/80	1.46	0.91
0/100	1.52	1.06

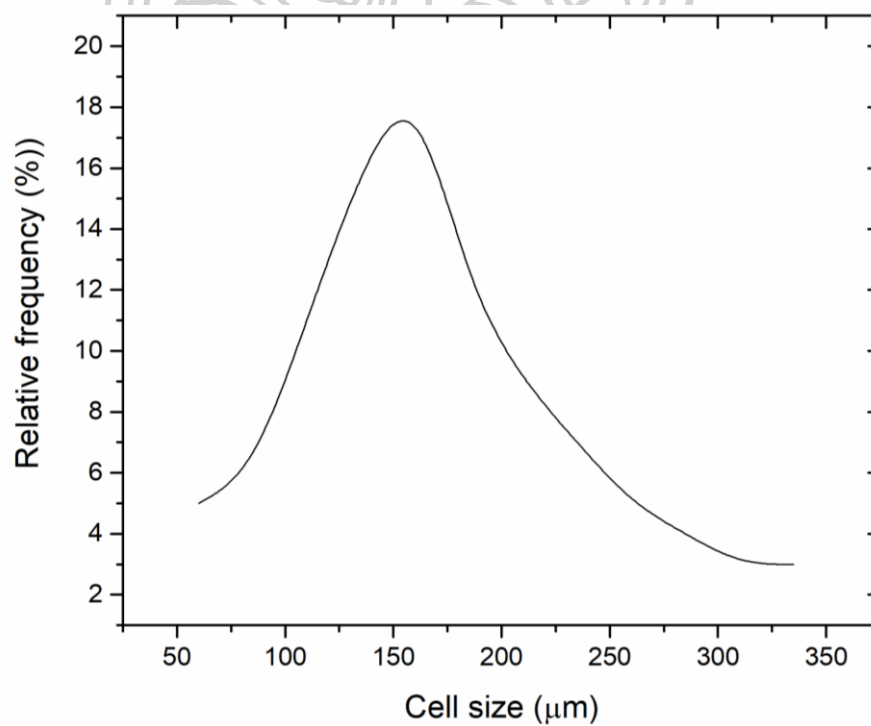
ตารางที่ ก.5 แสดงค่าความหนาแน่นและน้ำหนักของชิ้นงานทดสอบของโพลีคอมโพสิต

ชิ้นงานทดสอบ PLA/PBS/ZnO	น้ำหนักชิ้นงานทดสอบ (g)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
80/20/0phr	1.45	0.94
80/20/1phr	1.48	0.96
80/20/3phr	1.46	0.91
80/20/5phr	1.49	0.93
80/20/7phr	1.47	0.98

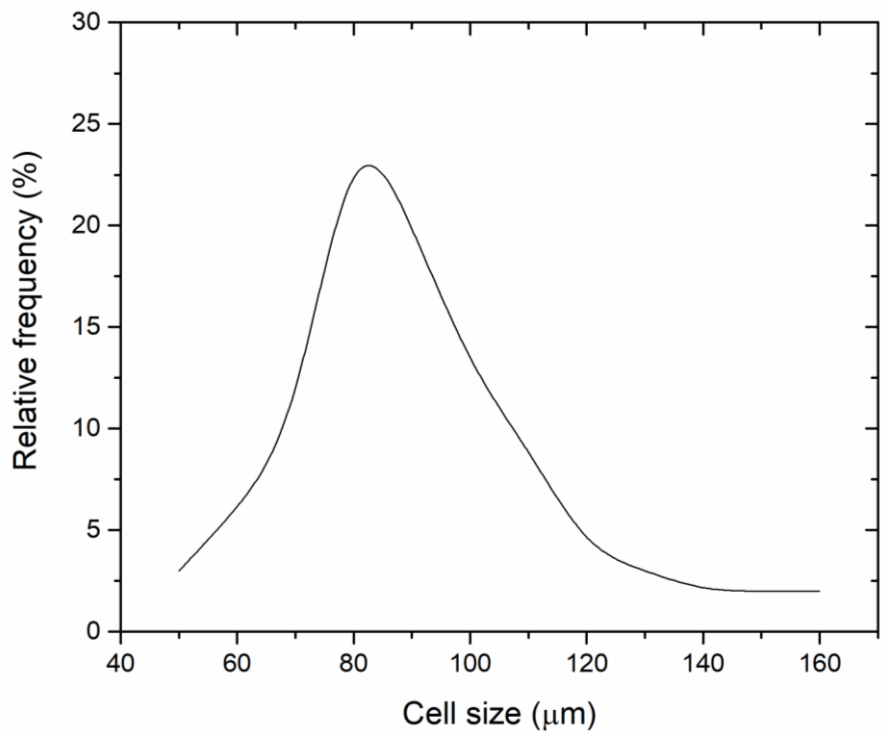
7. ข้อมูลการกระจายตัวของรูพรุนของโพลีชีวภาพ PLA/PBS



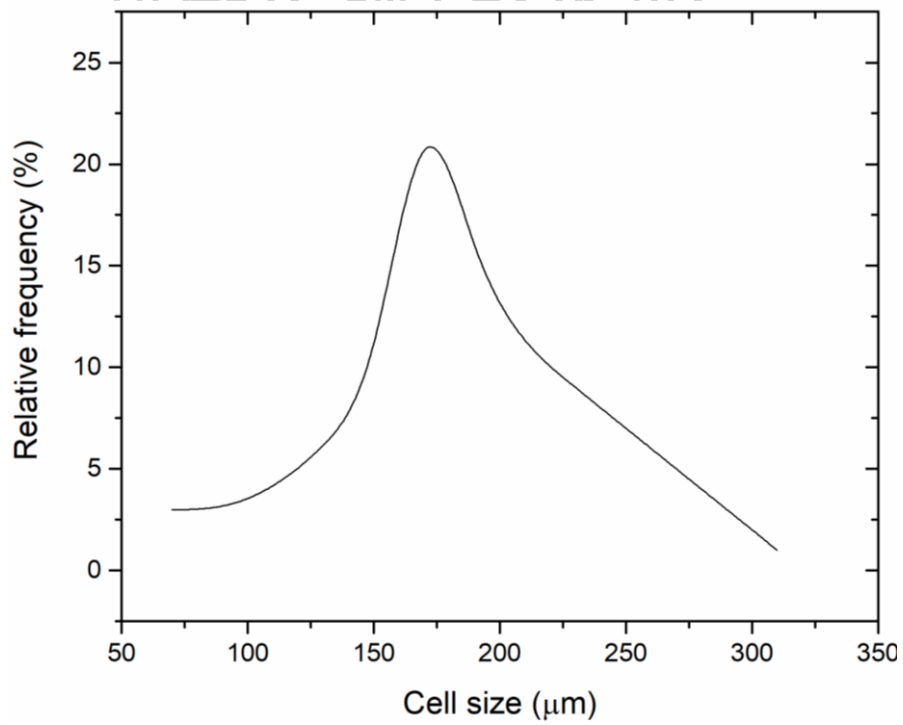
รูปที่ ก.39 แสดงการกระจายตัวของรูพรุนของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 100/0



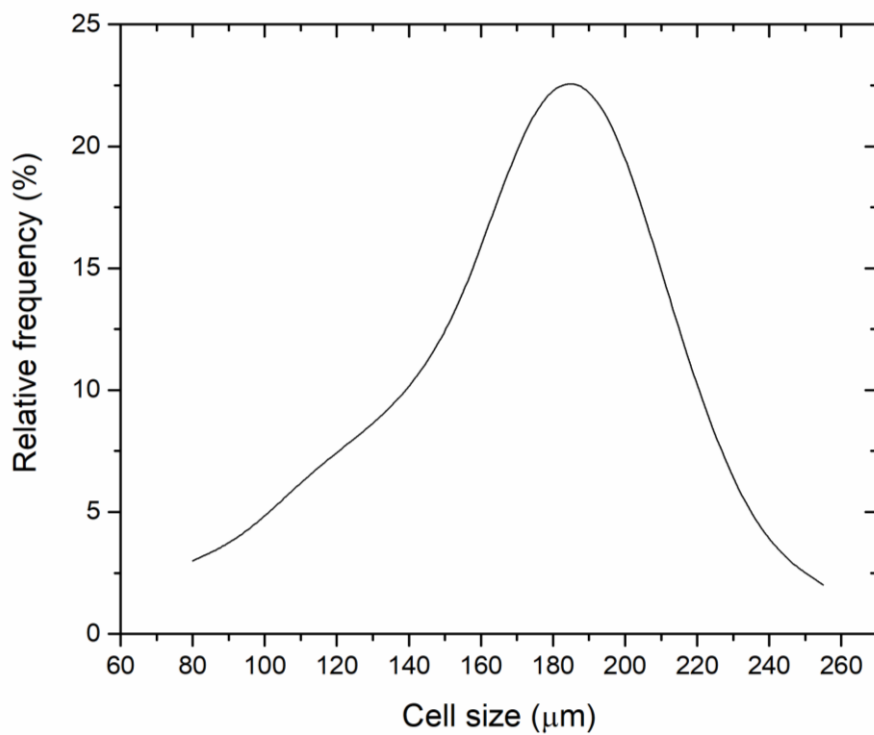
รูปที่ ก.40 แสดงการกระจายตัวของรูพรุนของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 80/20



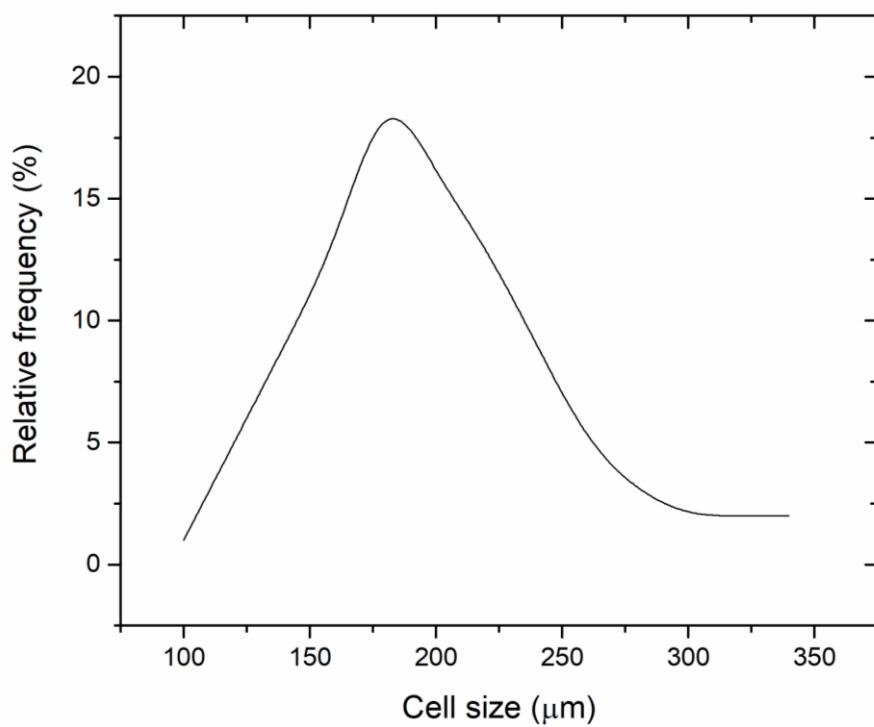
รูปที่ ก.41 แสดงการกระจายตัวของรูพรุนของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 70/30



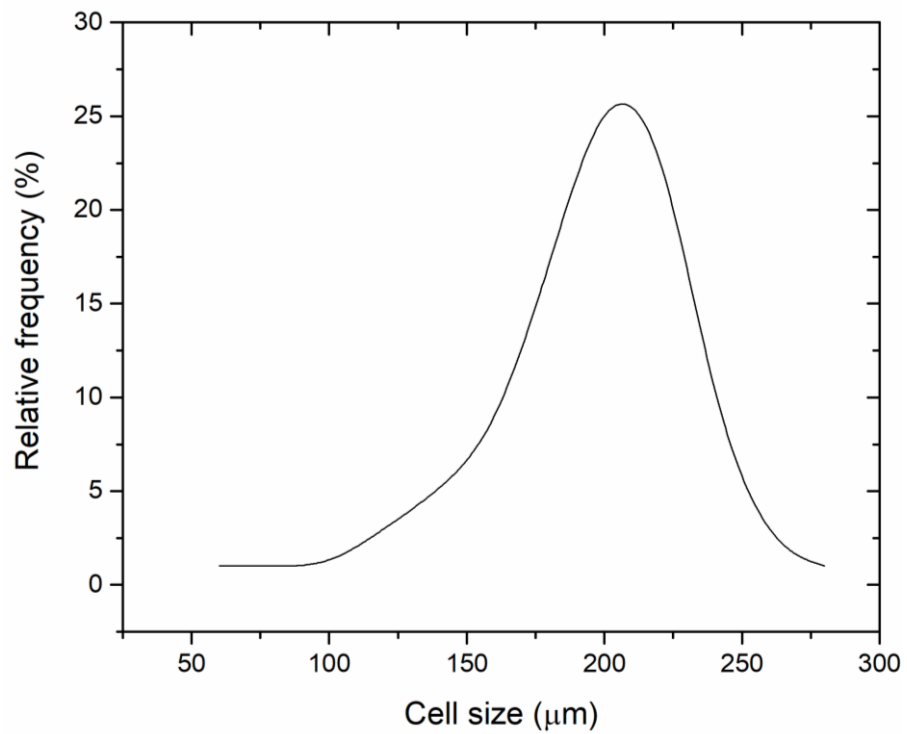
รูปที่ ก.42 แสดงการกระจายตัวของรูพรุนของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 60/40



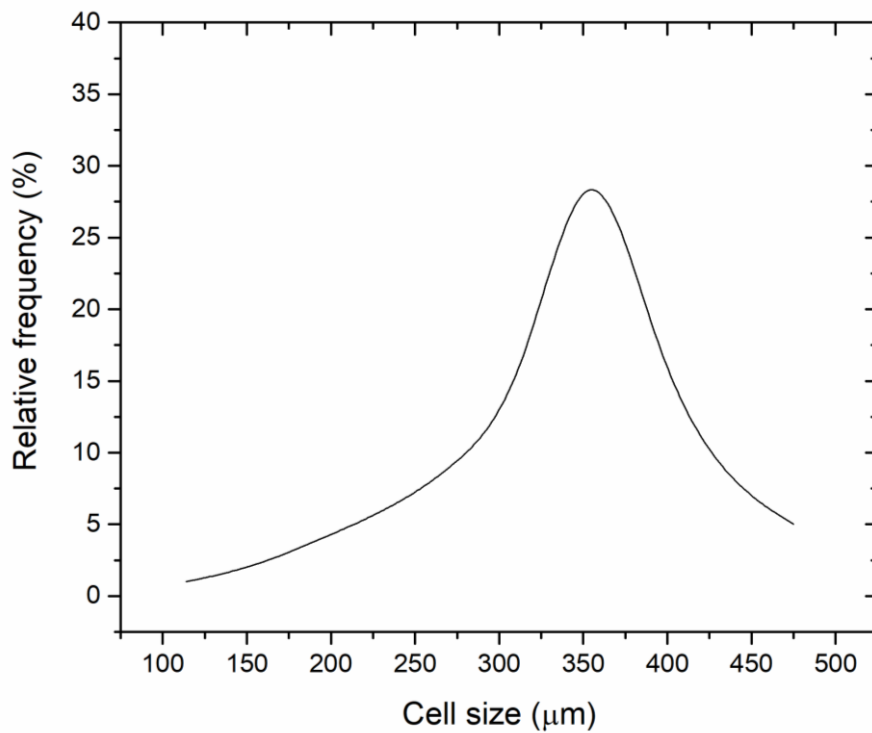
รูปที่ ก.43 แสดงการกระจายตัวของรูพรุนของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 50/50



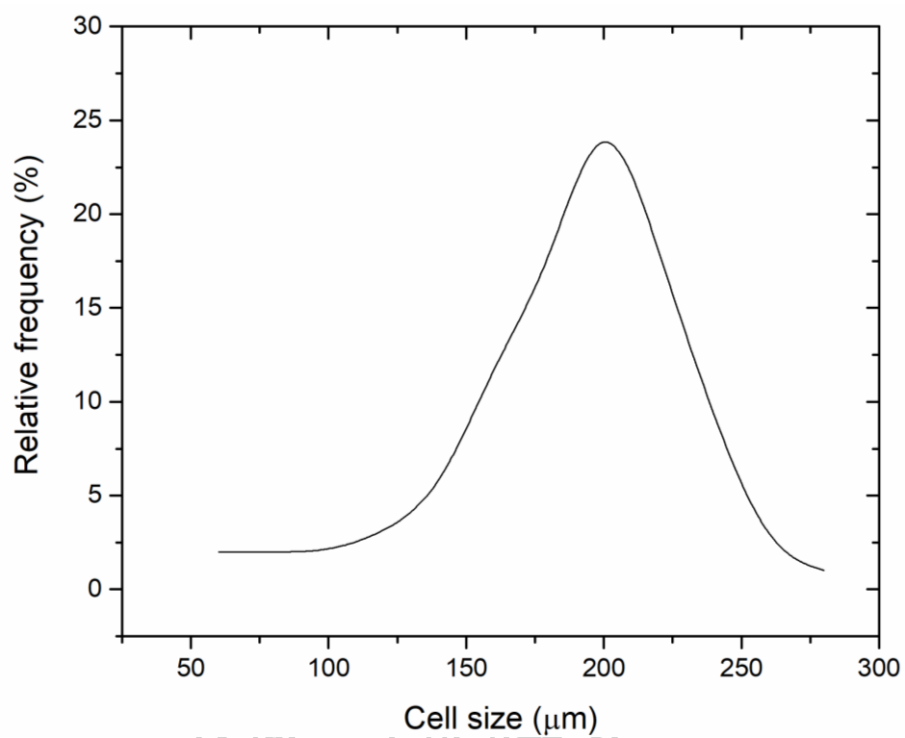
รูปที่ ก.44 แสดงการกระจายตัวของรูพรุนของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 40/60



รูปที่ ก.45 แสดงการกระจายตัวของรูพรุนของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 30/70



รูปที่ ก.46 แสดงการกระจายตัวของรูพรุนของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 20/80



รูปที่ ก.47 แสดงการกระจายตัวของรูพรุนของโพลีเมอร์ PLA/PBS ปริมาณ 0/100

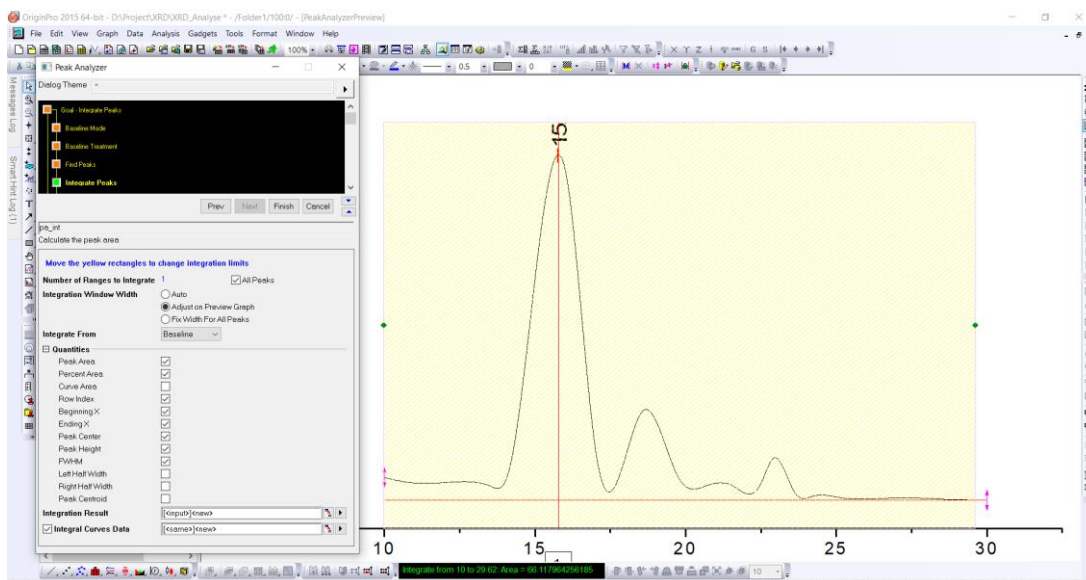




ภาคผนวก ข
แสดงการคำนวณ

I. ขั้นตอนการหาปริมาณผลึกจากการทดสอบด้วยเครื่อง XRD โดยโปรแกรม Origin Pro 2015

1. หาพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดของ XRD pattern

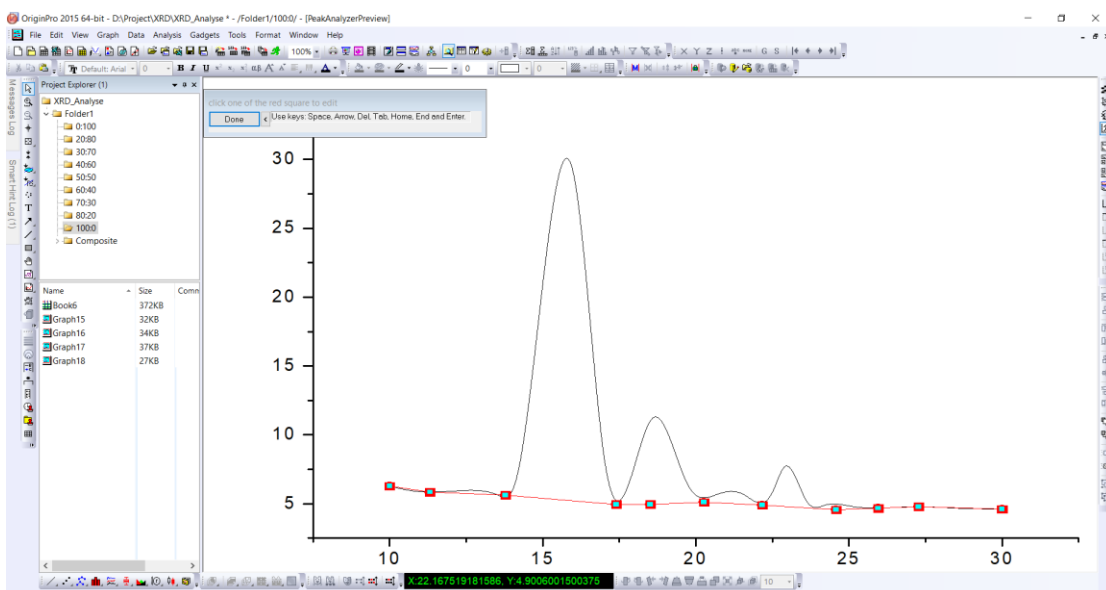


2. ค่าที่ได้แสดงในหน้าต่าง Plot data เพื่อนำตัวเลขมาคำนวณ

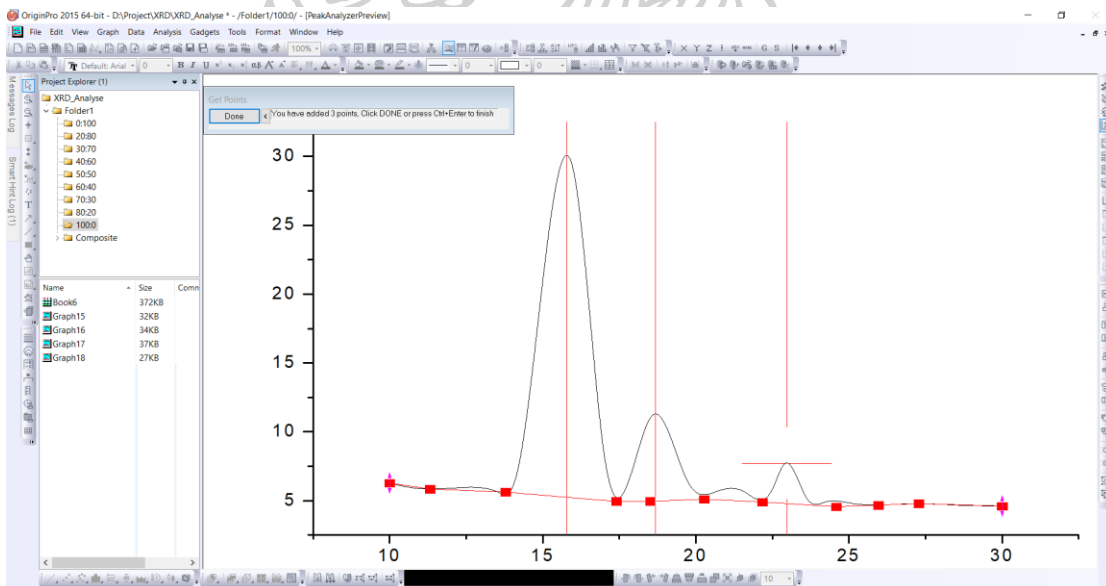
The screenshot shows the 'Integration Results' table in the 'Plot Data' window. The table contains the following data:

Long Name	Index	Area	AreaIntg(%)	Row Index	Beginning X	Ending X	FWHM	Center	Height
Integral Result of "Y"	1	66.11796	99.99776	289	10	29.62	1.7701	15.78	25.47355

3. หาพื้นที่ใต้กราฟของพีคในส่วนที่เป็น crystalline โดยปรับ base line ของ XRD pattern



4. เลือก peak ที่แสดงใน XRD pattern



5. ค่าที่ได้จะแสดงในหน้าต่าง plot data

OriginPro 2015 64-bit - D:\Project\XRD\XRD_Analyse - Folder1\1000\ - [Book6]

File Edit View Plot Column Worksheet Analysis Statistics Image Tools Format Window Help

Project Explorer (1)

XRD_Analyse

Folder1

- 0:100
- 20:80
- 30:70
- 40:60
- 50:50
- 60:40
- 70:30
- 80:20
- 100:0
- Composite

Name Size Com

- Book6 443KB
- Graph15 32KB
- Graph16 34KB
- Graph17 37KB
- Graph18 40KB

Long Name	Index	Area	AreaIntgP(%)	Row Index	Beginning X	Ending X	FWHM	Center	Height
Comments	Integral Result of "Y"	Integral Result of "Y"	Integral Result of "Y"	Integral Result of "Y"	Integral Result of "Y"	Integral Result of "Y"	Integral Result of "Y"	Integral Result of "Y"	Integral Result of "Y"
Fit(x)=									
1	1	43.44378	76.51804	289	13.8	17.46	1.73778	15.78	24.83621
2	2	8.85208	15.59125	434	17.48	20.26	1.35815	18.68	6.34562
3	3	2.45599	4.32576	649	22.18	23.86	0.80186	22.98	2.95475
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									
35									
36									
37									

Integration Results | Integrated Curve Data6 | Plot Data6



II. การคำนวณการเปลี่ยนค่า MFI เป็นค่า Viscosity

โพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 80/20

เส้นผ่านศูนย์กลางหัวตาย (D) = 2.095 มิลลิเมตร

ความยาวของตาย (L) = 8 มิลลิเมตร

ความหนาแน่นของโพลีชีวภาพ (ρ) = 0.68 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (g) = 9.81 m/s²

ค่า Melt flow index (MFI) = 12.18 กรัม/10 นาที

น้ำหนักของลูกตุ้มที่ใช้ทดสอบ = 2.16 กิโลกรัม

เวลา (t) = 600 วินาที

$$\text{จาก } \eta_{app} = \frac{\pi r^4 \times \Delta P \times \rho \times t}{8L \times MFI} = \frac{R^2 \times mg \times \rho \times t}{8L \times MFI} ; \Delta P = \frac{F}{A} = \frac{mg}{\pi R^2}$$

$$\eta_{app} = \frac{(1.0475 \times 10^{-3})^2 \times 2.16 \times 9.81 \times 0.68 \times 600}{8 \times (8 \times 10^{-3}) \times 12.18} = 11213 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

III. การคำนวณปริมาณผลึกของ PLA และ PBS ด้วยเครื่อง DSC

จากสูตร
$$\% X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_m^o \times Wt.} \times 100\% \quad ; \text{ wt. = weight fraction}$$

โพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 80/20

ปริมาณผลึกของ PLA

ปริมาณความร้อนที่ใช้หลอมผลึกของ PLA (ΔH_m) = 26.07 J/g

ปริมาณความร้อนที่ใช้หลอมผลึกในขั้น cold crystallization (ΔH_{cc}) = 14.52 J/g

ปริมาณความร้อนที่ใช้หลอมผลึกของ PLA 100% (ΔH_m^o) = 93 J/g

ปริมาณสัดส่วนของ PLA ($Wt.$) = 0.64

จะได้
$$\%X_c = \frac{26.07 - 14.52}{93 \times 0.64} \times 100\% = 19.32\%$$

ปริมาณผลึกของ PBS

ปริมาณความร้อนที่ใช้หลอมผลึกของ PBS (ΔH_m) = 16.72 J/g

ปริมาณความร้อนที่ใช้หลอมผลึกในขั้น cold crystallization (ΔH_{cc}) = 14.52 J/g

ปริมาณความร้อนที่ใช้หลอมผลึกของ PBS 100% (ΔH_m^o) = 110.3 J/g

ปริมาณสัดส่วนของ PBS ($Wt.$) = 0.32

จะได้
$$\%X_c = \frac{16.72 - 14.52}{11.3 \times 0.32} \times 100\% = 6.23\%$$

IV. การคำนวณความหนาแน่นของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ด้วยเครื่อง Density kits and accessories

จากสูตร
$$\rho = \frac{A}{A-B} \times (\rho_0 - \rho_L) + \rho_L$$

โพลีชีวภาพ PLA/PBS ปริมาณ 80/20

น้ำหนักของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ในอากาศ (A) = 1.38 กรัม

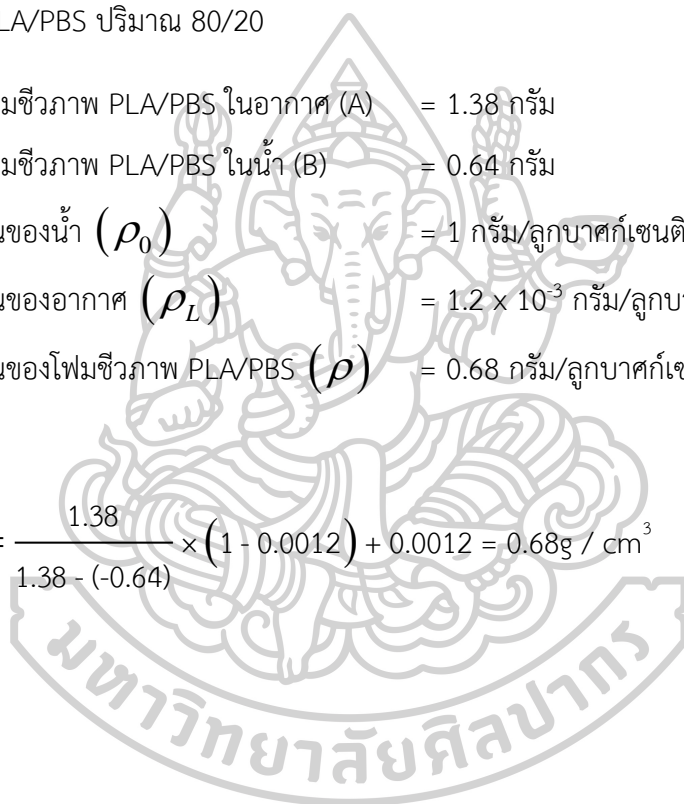
น้ำหนักของโพลีชีวภาพ PLA/PBS ในน้ำ (B) = 0.64 กรัม

ความหนาแน่นของน้ำ (ρ_0) = 1 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ความหนาแน่นของอากาศ (ρ_L) = 1.2×10^{-3} กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ความหนาแน่นของโพลีชีวภาพ PLA/PBS (ρ) = 0.68 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

จะได้
$$\rho = \frac{1.38}{1.38 - (-0.64)} \times (1 - 0.0012) + 0.0012 = 0.68 \text{ g / cm}^3$$



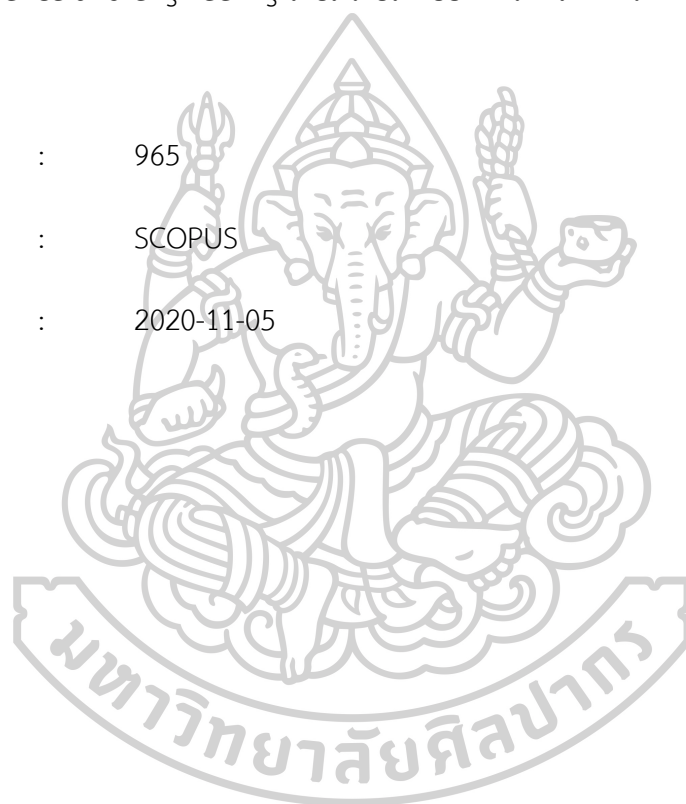


ภาคผนวก ค
การนำเสนอผลงานวิจัย

ได้นำเสนอผลงานวิจัยในที่ประชุม International conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT 2020) ซึ่งจัดขึ้นโดยคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในหัวข้อเรื่อง Mechanical properties and foaming behavior of Poly(lactic acid) blend Polybutylene succinate ซึ่งได้นำเสนอผลงานวิจัยในวันที่ 7 พฤษภาคม พ.ศ. 2563 ในรูปแบบโปสเตอร์

นอกจากนี้บทความวิจัยที่ได้นำเสนอไปในงานดังกล่าว ถูกตอบรับให้ตีพิมพ์ในวารสาร Materials science and engineering โดยมีรายละเอียดการตีพิมพ์ดังนี้

Volume : 965
Database : SCOPUS
Published : 2020-11-05



Mechanical properties and foaming behavior of Poly(lactic acid) blend Polybutylene Succinate

W. Bualuang¹, P. Threepopnatkul^{1,*}, and A. Sittattrakul¹

¹Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand

*Corresponding author: poonsbt@yahoo.com

Abstract. The extensive use of non-biodegradable plastics has been causing serious environmental pollutions because of the degradability issue from especially consumable food packaging. In this research, biodegradable materials i.e., Poly(lactic acid) (PLA) and Polybutylene succinate (PBS) are chosen for the study. PLA/PBS foam was prepared using Azodicarbonamide (ADC) and Poly(ethylene glycol) (PEG) 20 wt% as a blowing agent and plasticizer, respectively. Foamability of different content PLA/PBS blend were investigated. PLA/PBS foam were characterized by Water absorption, Flexural testing, Scanning Electron Microscope (SEM). Flexural properties of PLA/PBS foam (70/30) showed the highest flexural modulus of 384 MPa due to the smallest cell size while PLA/PBS foam (20/80) showed the highest flexural stress of 11 MPa. PLA/PBS foam showed uniform cell size distribution. PLA/PBS foam had water absorption ability due to its porous structure.

1. Introduction

The plastic packaging industry has been continuously developed to suit for the products and consumers needs in the markets and lifestyles. Fresh has been developed and improved to have properties that are more suitable for use. In general, the improvement and development of the packaging properties still focus on reducing pollution to the world. In this research, the properties of the packaging will be developed to be more versatile, focusing on the packaging that is used to store fresh food or foods that contain the liquid in the package. Foam packaging are generally porous materials which have a high surface area, high permeability, and lightweight, leading to lower cost of processing. According to Zhou et al. [1], the packaging will be developed in this research that expected to capable of absorbing any excessive liquid to reduce such problem in the fresh produces. However, environment friendly packaging will also be considered as part of this research. In this recently years, the plastic industries slowed down quite considerably due to behavioral changes of environmental concerns and lifestyle. Basic packaging such as plastic bags with handles that are more likely to be used lesser than before due to the global trend including public and private campaigns. Therefore, it is necessary to search for the innovative ideas of creating more versatile yet less polluted for the muvo packaging. In this study, biodegradable plastics will be used to mold into foam packages. The bioplastics used in this research is biodegradable plastic namely Poly(lactic acid). Currently, Poly (lactic acid) or PLA has been used widely due to its production bases globally. Still, there are some limitations in terms of mechanical properties because of its brittleness if the end product is molded by using only PLA. As a result, the foam packages would be susceptible to crack in the end user's hands. This will definitely cause the hesitation for consumers of not wanting to use PLA for foam packaging. Therefore, it is technically necessary to raise its overall



Content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 3.0 licence](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

Published under licence by IOP Publishing Ltd

properties mechanically into the packages. Polybutylene Succinate (PBS) is a biodegradable plastic as same as Poly(lactic acid). Only PBS cannot be produced from natural materials. PBS possesses good flexibility and better thermal stability than Poly(lactic acid)[2]. Stability of foaming is another important property related to its elasticity. Therefore, PBS is selected for blending with PLA in this study. In this research, mechanical properties, foaming behavior and water absorption are thoroughly investigated on the PLA/PBS foam.

2. Experimental

Materials

Poly(lactic acid) (PLA) (2003D, $\rho = 1.24 \text{ g cm}^{-3}$, and $\text{MFI} = 6 \text{ g } 10 \text{ min}^{-1}$) and Poly butylene succinate (PBS) (FZ91PM, $\rho = 1.26 \text{ g cm}^{-3}$, and $\text{MFI} = 5 \text{ g } 10 \text{ min}^{-1}$) was supplied by Nature Works and PTT MCC BioChem, Thailand, respectively. Poly ethylene glycol (PEG) ($M_w = 8,000$) were supplied by A.C.S.Xenon Limited Partnership was used as a plasticizer. Azodicarbonamide (ADC) (Sunfoam SB00P, Lautan Luas Co., Ltd., Thailand) was used as a chemical foaming agent. PLA, PBS, ADC, and PEG were dried at 70°C for 24 h. before use.

Compounding and foaming processes

The mixture of various PLA and PBS proportions were prepared as seen in Table 1. The contents of ADC and PEG at 1 phr, 20%wt respectively. PLA/PBS blend was extruded by a co-rotating twin-screw extruder ($L/D = 32$, LTE20-32, Labtech Engineering Co., Ltd.) with the temperature profile of 110, 120, 130, 140, 145, 150, 160, and 150°C from hopper to die and the screw speed of 150 rpm. The extrudate was dried at 70°C for 24 h and then sequentially foamed by compression molding (PR1D-W300L350) with the temperature profile of 150°C preheat 3 min and compression time 5 min.

Table 1. The composition of compounding formulations.

Sample	PLA (wt%)	PBS (wt%)	PEG (wt%)	ADC (phr)
PLA100/PBS0	100	0	20	1
PLA80/PBS20	80	20	20	1
PLA70/PBS30	70	30	20	1
PLA60/PBS40	60	40	20	1
PLA50/PBS50	50	50	20	1
PLA40/PBS60	40	60	20	1
PLA30/PBS70	30	70	20	1
PLA20/PBS80	20	80	20	1
PLA0/PBS100	0	100	20	1

Foam morphology analysis

To investigate the foam microstructure, samples were cryo-fractured under liquid nitrogen and then coated using a Gold (Au) sputtering technique. Samples were observed by using a scanning electron microscope (SEM, TM3000, Hitashi). The micrographs were also used to calculate the number of bubbles per cm^3 of foam using Eq. (1).

$$N_f = \left(\frac{nM^2}{A} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

where N_f is the number of bubbles, n is the number of cells, M is the magnification factor, A is the area of the micrographs.

Water absorption

Weight of the samples was recorded at different time intervals and compared with the initial dry weight. The weight gain was then calculated. Water absorption ratio was calculated using the following Equation (2).

$$\text{Absorption ratio} = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

Where W_t is the weight gain at time t and W_0 is the initial dry weight before treatment.

Mechanical properties

Flexural tensile strength and Flexural modulus of the PLA/PBS foam were tested according to ASTM D790 using a universal testing machine (Instron model 55R4502) at the crosshead speed of 10 mm min^{-1} with 5 kN .

3. Results and discussion

3.1. Mechanical properties

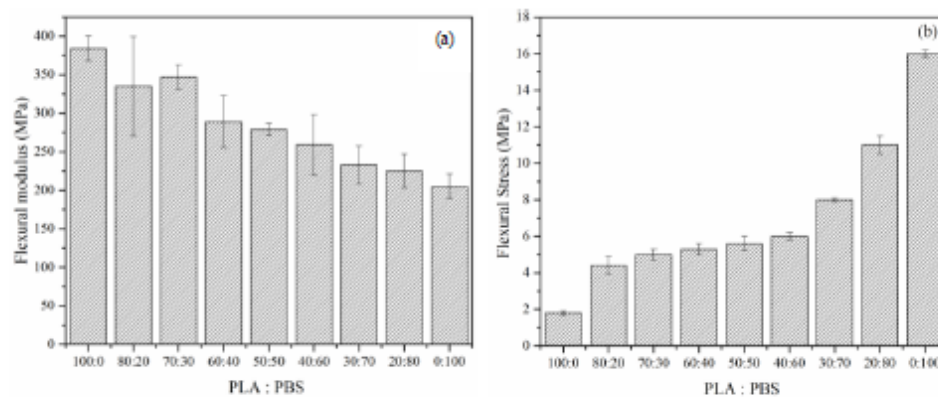


Figure 1. (a) Flexural modulus, (b) Flexural stress of PLA-PBS blend foam samples

The mechanical properties of foam samples are shown in Figure 1. The results showed that flexural tensile strength and flexural modulus of PLA/PBS foam. Flexural tensile strength increased with increasing PBS fraction because the structure of PLA/PBS foam at PBS-rich has porous less than PLA/PBS foam at PLA-rich due to large pore size may be stress concentration[3]. Moreover, the Flexural modulus of PLA/PBS blend foam follows approximately the rule of mixtures over the whole composition range. Flexural modulus of PLA/PBS blend foam decreased with increasing PBS fraction due to pore size. The small pore size has a larger cell wall than the large pore size which PLA-rich has pore size larger than PBS-rich therefore PLA-rich has higher flexural modulus than PBS-rich[4].

3.2. Scanning Electron Microscope

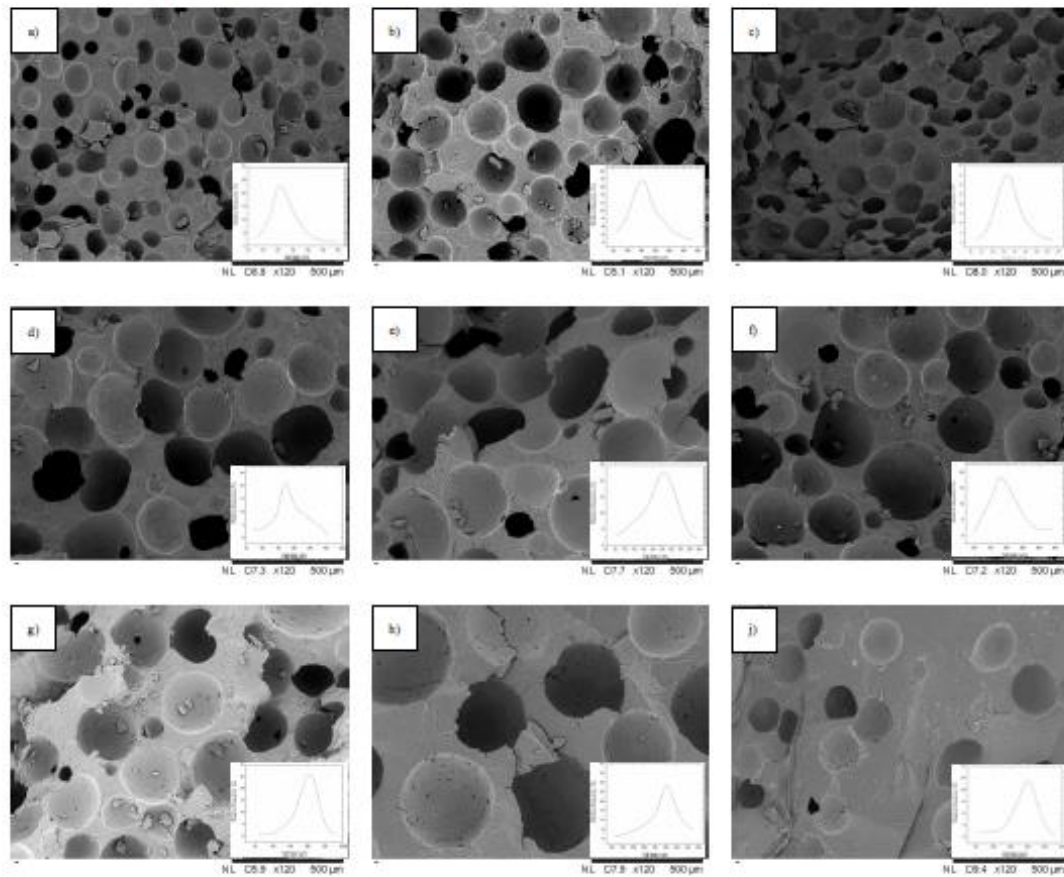


Figure 2. SEM micrographs different weight percent of PLA-PBS blend at 120x magnification a) 100:0, b) 80:20, c) 70:30, d) 60:40 e) 50:50, f) 40:60, g) 30:70, h) 20:80, i) 0:100

PLA-PBS blend foam morphology was investigated as shown in Figure 2. All samples showed uniform cell size distribution. PLA foam has a cell size of about 125 microns and cell density about $240 \times 10^4 \text{ cell/cm}^3$ while PBS foam has cell size about 150 microns and cell density about $180 \times 10^4 \text{ cell/cm}^3$ as shown in Figure 3. The cell size of PLA-PBS foam increases with PBS fraction increase while the cell density of PLA-PBS foam decreased with PBS fraction increase as shown in Figure 3 as a result of the difference between viscosity of PLA and PBS phase and temperature processing of PLA/PBS. PLA has a melting temperature at 160°C and PBS have a melting temperature at 115°C when forming the specimen, using temperature processing at 150°C leading to PBS-rich couldn't hold and agglomerated into larger cell size when compared to high PLA fraction results in higher cell size and lower cell density in PLA-PBS foam with higher PBS fraction but cell size of PLA-PBS at 80:20 have the larger more than pure PBS because ADC is compatible with PLA more than PBS thus number of porous in PLA-PBS at 80:20 more than pure PBS and agglomerated. One more reason PBS showed lower viscosity than PLA[5], PBS-rich have larger pore size more than PLA-rich as a result of the viscosity PLA-PBS foam decreased with PBS fraction increase[6].

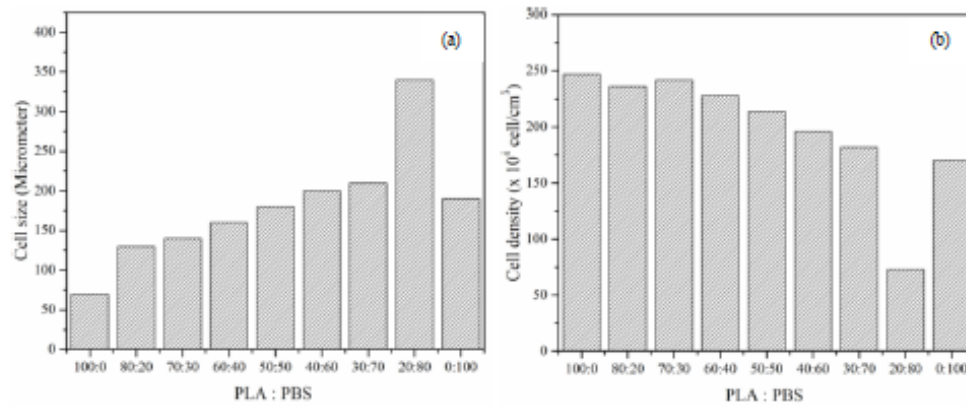


Figure 3. (a) cell size and (b) cell density of PLA-PBS blend foam sample

3.3. Water absorption

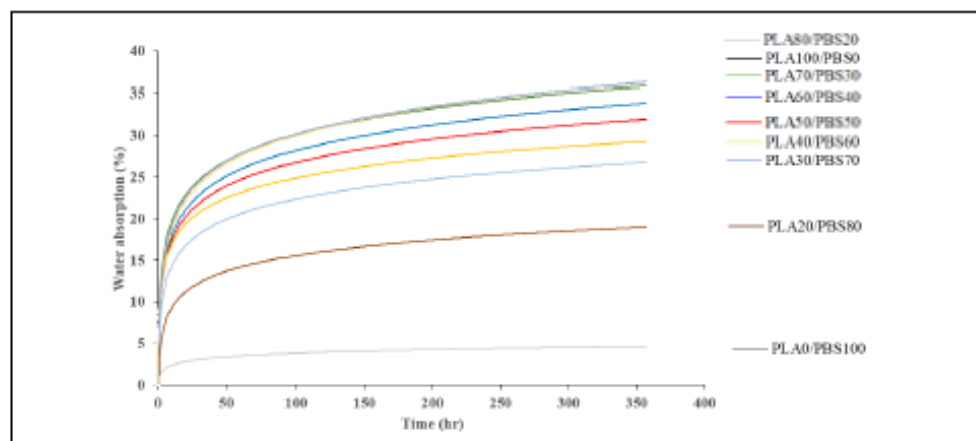


Figure 4. The water absorption of PLA/PBS blend foam samples

The water absorption of PLA/PBS blend foam is shown in Figure 4. All samples had water absorption ability due to its porous structure. Water absorption of PLA/PBS foam with PLA-rich and PBS-rich has been investigated and it was found to decrease with increasing PBS content due to the polarity of PBS less than the polarity of PLA[7], leading to water can absorb into PLA-rich more than PBS-rich. PLA100/PBS0 increased in weight by 35%, it's the highest absorption ability while PLA0/PBS100 increased in weight by 4.98%, it's the lowest absorption ability.

4. Conclusion

PLA/PBS foams at different PLA and PBS ratios were prepared by compression molding. Foam samples showed more uniform cell morphologies and higher flexural modulus of PLA-rich samples, whereas flexural stress of PLA/PBS foam increased with increasing PBS fraction. The cell size of PLA/PBS foam increases with PBS fraction increase while the cell density of PLA-PBS foam decrease with PBS fraction increase. Water absorption of PLA/PBS foam was found to increase with increasing PBS content.

5. Acknowledgment

This research was financially supported by the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University.

References

- [1] J. Zhou, Z. Yao, C. Zhou, D. Wei, S. Li, Mechanical properties of PLA/PBS foamed composites reinforced by organophilic montmorillonite, *Journal of Applied Polymer Science*. 131 (2014).
- [2] Joël R., Richard G. and Michel F. Champagne, *Extrusion Foaming of Poly(Lactic acid) Blown with CO₂: Toward 100% Green Material*, pp. 83-116 (2005)
- [3] J. Charoenta., C. Tongpin, *Thermoplastic Vulcanizate Foam Prepared from NR/PBS Blends*, The 2019 Pure and Applied Chemistry International Conference, pp. 77-82 (2019)
- [4] K. Ketkul, P. Threepopnatkul., D. Aussawasathien, K. Hrimchum, *Poly(Lactic Acid) (PLA) - Polybutylene Succinate (PBS) - Activated Carbon Composite Foams*, *Key Engineering Materials* Vol. 751, pp. 344-349 (2017)
- [5] V. Philsaard, S. Naimlaung, S. Pavasupree, S. Philsaard, *Preparation of Polymer Blends between Polylactic acid and Poly(butylenes succinate) for Injection Molding Application*, Thailand, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (2014)
- [6] B. Panyad, N. Hongsnipun, *Modification of mechanical properties and flame retardancy of Polybutylene succinate for using in electrical housing*, Thailand, Silpakorn University (2011)
- [7] D. Preechawong, M. Peesan, P. Supaphol, R. Rujiravanit, *Preparation and characterization of starch/poly(l-lactic acid) hybrid foams*. *Carbohydrate Polymers*, 59(3), 329-337. (2005)

รายการอ้างอิง

1. Jompang, L., et al., *Poly (lactic acid) and poly (butylene succinate) blend fibers prepared by melt spinning technique*. 2013. **34**: p. 493-499.
2. Pantani, R., et al., *PLA-ZnO nanocomposite films: Water vapor barrier properties and specific end-use characteristics*. 2013. **49**(11): p. 3471-3482.
3. Reyes-Labarta J. and Adomi M., *Kinetic study of the decompositions involved in the thermal degradation of commercial azodicarbonamide*. 2008. **107**(1): p. 339-346.
4. พลาสติก PLA (Polylactic acid). Available from: <https://enchemcom1po.wordpress.com/bioplastics>
5. สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. July 2010; Available from: <http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext>
6. โพลี เอธิลีน ไกคอล คืออะไรแล้วมีประโยชน์หรือโทษอย่างไรกับร่างกายถ้ารับประทานเข้าไป. Available from: <https://www.pharmacy.mahidol.ac.th>
7. ราชภัฏวชิร. *Zinc Oxide*. Available from: <http://haamor.com/th>.
8. พูนศรีไชยสิทธิ์, โฟมพลาสติก. *Polymer science*, 2551: p. 74-78.
9. ทรงกิตติกุล., แก้วพูน. *Ceramics journal*, 2555: p. 16-19.
10. Reignier, J., Robettite G., and Michel C., *Extrusion foaming of poly (lactic acid) blown with CO₂: Toward 100% green material*. 2007. **26**(2): p. 83-115.
11. Ding, W., et al., *Development of PLA/cellulosic fiber composite foams using injection molding: Crystallization and foaming behaviors*. 2016. **83**: p. 130-139.
12. Hassan, N., et al., *Effect of processing temperature and foaming agent loading on properties of polylactic acid/kenaf fiber composite foam*. 2019. **7**: p. 601-606.
13. Ozdemir, E., Jomerdiyier H., and Authoriod P., *Characterizations of PLA-PEG blends involving organically modified montmorillonite*. 2017. **127**: p. 343-349.
14. Li, B., et al., *Biodegradable PLA/PBS open-cell foam fabricated by supercritical CO₂ foaming for selective oil-adsorption*. *Separation and Purification Technology*, 2021. **257**: p. 117949.

15. Rubelo K., et al., *Fabrication of Poly(butylene succinate) phosphorus-containing ionomers microcellular foams with significantly improved thermal conductivity and compressive strength*. Polymer, 2019. **185**: p. 121967.
16. Meekum, U. and Khiansanoi A., *PLA and single component silicone rubber blends for sub-zero temperature blown film packaging applications*. Results in Physics, 2018. **9**: p. 1127-1135.
17. Karst, D. and Yang Y., *Using the solubility parameter to explain disperse dye sorption on polylactide*. Journal of Applied Polymer Science, 2005. **96**(2): p. 416-422.
18. Charoenta J. and Thongpin C. *Thermoplastic Vulcanizate Foam Prepared from NR / PBS Blends*. 2019.
19. Thongpin, C., et al., *Bio-based thermoplastic vulcanizates from natural rubber (bioplastic/NR)*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. **773**: p. 012045.
20. Luo Y., Zhong L., and Guo G., *Biodegradation Assessment of Poly (Lactic Acid) Filled with Functionalized Titania Nanoparticles (PLA/TiO₂) under Compost Conditions*. Nanoscale Research Letters, 2019. **14**(1): p. 56.
21. Silverajah, V., et al., *A Comparative Study on the Mechanical, Thermal and Morphological Characterization of Poly(lactic acid)/Epoxidized Palm Oil Blend*. International journal of molecular sciences, 2012. **13**: p. 5878-98.
22. Hassan, E., et al., *Biodegradable poly (lactic acid)/poly (butylene succinate) fibers with high elongation for health care products*. Textile Research Journal, 2017: p. 004051751770853.
23. Číhal, P., et al., *Poly(butylene succinate)-cellulose triacetate blends: permeation, pervaporation, sorption and physical structure*. Polymer Testing, 2018. **65**: p. 468-479.
24. Gendron, R., et al., *The Supercritical State Paradigm in Thermoplastic Foaming*. Cellular Polymers, 2010. **29**(5): p. 283-300.
25. Jompong, L., et al., *Poly(Lactic Acid) and Poly(Butylene Succinate) Blend Fibers Prepared by Melt Spinning Technique*. Energy Procedia, 2013. **34**: p. 493-499.
26. Lopattananon, N., Wangpradit N., and Kaesaman A., *Effect of Rubber*

- Composition on Foaming and Properties of EVA/NR/PP Thermoplastic Vulcanisates (TPVs)*. Journal of Rubber Research, 2014. **17**: p. 80-95.
27. Homklin, R. and Hongsriphan N., *Mechanical and Thermal Properties of PLA/PBS Co-continuous Blends Adding Nucleating Agent*. Energy Procedia, 2013. **34**: p. 871-879.
 28. Qiu, T., Song M., and Song L., *Testing, characterization and modelling of mechanical behaviour of poly (lactic-acid) and poly (butylene succinate) blends*. Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes, 2016. **2**: p. 7.
 29. Chaiwutthinan, P., et al., *Poly(Lactic Acid)/Poly(Butylene Succinate) Blends Filled with Epoxy Functionalised Polymeric Chain Extender*. Advanced Materials Research, 2013. **664**: p. 644-648.
 30. Yee Bond, T., et al., *Reinforcing Mechanical, Water Absorption and Barrier Properties of Poly(Lactic Acid) Composites with Kenaf-Derived Cellulose of Thermally-Grafted Aminosilane*. Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science, 2015. **38**: p. 563-573.
 31. Chow, W.S., Leu Y., and Ishak Z., *Water Absorption of Poly(lactic acid) Nanocomposites: Effects of Nanofillers and Maleated Rubbers*. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2014. **53**: p. 858-863.
 32. Pouloupoulou, N., et al., *Sustainable Plastics from Biomass: Blends of Polyesters Based on 2,5-Furandicarboxylic Acid*. Polymers, 2020. **12**: p. 225.
 33. Puttajan S., *Charecterization and Preparation of PLA/ENR* 2016, suranaree university of technology.
 34. Borkotoky, S., A. Pal, and Katiyar V., *Poly(lactic acid)/modified chitosan-based microcellular foams: Thermal and crystallization behavior with wettability and porosimetric investigations*. Journal of Applied Polymer Science, 2018. **136**: p. 47236.
 35. Carrasco-Jaim, O., et al., *Synthesis and characterization of PbS/ZnO thin film for photocatalytic hydrogen production*. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2017. **347**.
 36. Marra, A., Cimmino S., and Silvestre C., *Effect of TiO₂ and ZnO on PLA degradation in various media*. 2017. **2**.

37. Chaloenta J., การเตรียมโฟมเทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซตจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ. 2019, Silpakorn University.
38. Chu, Z., et al., *Characterization of Antimicrobial Poly (Lactic Acid)/Nano-Composite Films with Silver and Zinc Oxide Nanoparticles*. *Materials*, 2017. **10**: p. 659.
39. Zhou, J., et al., *Mechanical Properties of PLA/PBS Foamed Composites Reinforced by Organophilic Montmorillonite*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014. **131**.
40. Zhao, T., *Properties of Nano-ZnO Modified PLA/PBS Composite and Foaming System*. 2018.
41. Li, W., et al., *Effects of PLA Film Incorporated with ZnO Nanoparticle on the Quality Attributes of Fresh-Cut Apple*. *Nanomaterials* (Basel, Switzerland), 2017. **7**(8): p. 207.
42. Rahman Khan, M., et al., *Synthesis, Luminescence and Thermal Properties of PVA-ZnO-Al₂O₃ Composite Films: Towards Fabrication of Sunlight-Induced Catalyst for Organic Dye Removal*. *Journal of Polymers and the Environment*, 2018.
43. Khankrua, R., et al., *Thermal and Mechanical Properties of Biodegradable Polyester/Silica Nanocomposites*. *Energy Procedia*, 2013. **34**: p. 705-713.
44. Kim T., et al., *Poly(Lactic Acid)/ZnO Bionanocomposite Films with Positively Charged ZnO as Potential Antimicrobial Food Packaging Materials*. *Polymers*, 2019. **11**: p. 1427.
45. Ma J. and Wang T., *Preparation and characterization of water-absorbing polyurethane foam composites with microsized sodium polyacrylate particles*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018. **135**: p. 46702.
46. Tagliavia, G., Porfiri M., and Gupta N., *Influence of moisture absorption on flexural properties of syntactic foams*. *Composites Part B: Engineering*, 2012. **43**(2): p. 115-123.
47. Kulkarni, V.S. and Shaw C., *Chapter 2 - Surfactants, Lipids, and Surface Chemistry*, in *Essential Chemistry for Formulators of Semisolid and Liquid*

- Dosages*, V.S. Kulkarni and C. Shaw, Editors. 2016, Academic Press: Boston. p. 5-19.
48. Xie, Y., et al., *Antibacterial Activity and Mechanism of Action of Zinc Oxide Nanoparticles against Campylobacter jejuni*. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011. **77**(7): p. 2325.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายวสุธร บัวเหลือง
วัน เดือน ปี เกิด	18 พฤศจิกายน 2538
สถานที่เกิด	เชียงใหม่
วุฒิการศึกษา	พ.ศ.2557-2560 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ปีโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	7 หมู่ที่ 6 ตำบลสบสาย อำเภอสูงเม่น จังหวัดแพร่ 54130
ผลงานตีพิมพ์	Wasutorn Bualuang, Poonsub Threepopnatkul, Aumnard Sittattrakul "Mechanical properties and foaming behavior of Poly(lactic acid) blend Polybutylene Succinate" International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT 2020), The Zigh Pattaya, Chonburi, Thailand 11-13 September, 2020
รางวัลที่ได้รับ	พ.ศ 2561-2562 (4 ภาคการศึกษา) ได้รับทุนการศึกษาและทุนนักศึกษาผู้ช่วยสอน จากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

