

วัสดุเชิงประกอบพอลิแล็คติกแอซิด/แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

POLY(LACTIC ACID) BACTERIAL CELLULOSE-GRAFT-POLY(METHYL METHACRYLATE)  
COMPOSITE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Applied Polymer Science and Textile  
Technology

Department of Materials Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วัสดุเชิงประกอบพอลิแล็คติกแอซิด/แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต
โดย	น.ส.ฐาปนี เพ็ชระ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวี ศรีกุลกิจ

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อัจจงค์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวี ศรีกุลกิจ)	
.....	กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สิริรัตน์ จารุจินดา)	

รูปานี้ เพ็ชระ : วัสดุเชิงประกอบพอลิแล็คติกแอซิด/แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต. ( POLY(LACTIC ACID) BACTERIAL CELLULOSE-GRAFT-POLY(METHYL METHACRYLATE) COMPOSITE) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.กาวี ศรีกุลกิจ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมและศึกษาสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิแล็คติกแอซิด/แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต โดยสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชันที่อัตราส่วนระหว่าง BC:MMA ที่ 1:1 และ 1:5 โดยมี  $K_2S_2O_8$  เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา จาก FTIR สเปกตรัมของแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต (BC1:5) พบค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ขึ้นที่ตำแหน่ง  $1725\text{ cm}^{-1}$  โดยคาดว่าเป็นส่วนของ PMMA ที่ถูกกราฟต์ลงบนแบคทีเรียเซลลูโลส ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค NMR รวมไปถึงการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA และ DSC ยืนยันได้ว่าการกราฟต์ PMMA ลงบนแบคทีเรียเซลลูโลสได้สำเร็จ จากนั้นนำแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เตรียมได้ไปทำการลามิเนตกับแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดด้วยเครื่องอัดแบบ แล้วนำแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดที่ได้ไปศึกษาลักษณะสัญญาณวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และการย่อยสลายด้วยวิธีฝังกลบ จากการศึกษาพบว่าลักษณะสัญญาณวิทยาของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดกับแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต (BC1:5) มีการยืดเกาะที่ต่ำกว่าแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และ BC1:1 จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่าแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดกับแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตสูตร BC1:5 มีเสถียรภาพทางความร้อนมากที่สุด และจากการศึกษาสมบัติเชิงกลของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดกับแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตพบว่ามีค้ำยังสัมมอดูลัสเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์ นอกจากนี้การทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ พบว่าแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยแบคทีเรียเซลลูโลสส่งผลต่อการย่อยสลายที่เร็วขึ้น

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์ ลายมือชื่อนิสิต .....  
และเทคโนโลยีสิ่งทอ  
ปีการศึกษา 2564 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6270032523 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORD: poly(lactic acid), bacterial cellulose, poly(methyl methacrylate),  
bacterial cellulose-graft-poly(methyl methacrylate), laminate sheet

Thapani Phetchara : POLY(LACTIC ACID) BACTERIAL CELLULOSE-GRAFT-  
POLY(METHYL METHACRYLATE) COMPOSITE. Advisor: Assoc. Prof. KAWEE  
SRIKULKIT, Ph.D.

The objective of this research was to prepare and study the properties of poly(lactic acid)/bacterial cellulose-graft-poly(methyl methacrylate) composite. The poly(methyl methacrylate) grafted bacterial cellulose (BC-g-PMMA) was prepared by emulsion polymerization. The grafting was carried out using BC:MMA monomer ratios of 1:1 and 1:5 using  $K_2S_2O_8$  as initiator. FTIR spectrum of BC-g-PMMA (BC1:5) showed strong intensity peak at  $1725\text{ cm}^{-1}$ , corresponding to PMMA carbonyl absorption band. From NMR spectra of BC1:5, chemical shift were observed at 177.5 and 15.9 ppm which were responsible for the carbonyl carbon atom of the PMMA. TGA and DSC results showed that BC1:5 exhibited stepwise degradation and glass transition temperature at  $117\text{ }^\circ\text{C}$  which confirmed the successful grafting reaction. Then, PLA/BC-g-PMMA/PLA laminate sheet were prepared using compression molding machine. The morphology, thermal, mechanical and degradation properties were examined. Good adhesion between BC-g-PMMA and PLA were revealed by SEM analysis. TGA results showed that the PLA laminates exhibited an improved thermal stability when compared to virgin PLA. The PLA laminated with BC-g-PMMA showed a higher young's modulus and flexural modulus than virgin PLA. In addition, the degradation properties also showed that the PLA laminates degrade faster than virgin PLA.

Field of Study: Applied Polymer Science  
and Textile Technology

Student's Signature .....

Academic Year: 2021

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์ เพราะได้รับความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน ทั้งคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบและสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิด้านต่างๆ เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวี ศรีภูกลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ รวมไปถึงให้การสนับสนุนในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย และแนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนการช่วยเหลือเอาใจใส่ดูแล และจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์เป็นอย่างดีมาโดยตลอด

ศาสตราจารย์ ดร.ดวงดาว อัจจงค์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.สิริรัตน์ จารุจินดา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์จากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำทางวิชาการ และให้ความกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

คณะอาจารย์ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความรู้ในด้านวิชาการ ความเอื้อเฟื้อทางด้านวัสดุดิบ เครื่องมือ และสถานที่ทำวิทยานิพนธ์

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ทำวิจัย และเครื่องทดสอบต่างๆ และให้ทุนอุดหนุนการศึกษาเป็นระยะเวลา 2 ปีการศึกษา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช สำหรับทุนอุดหนุนงานวิจัย

บุคลากร รุ่นพี่ รวมถึงเพื่อนๆ ในหลักสูตรวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ และหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำตลอดการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัว ที่ให้การสนับสนุน และคอยให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า จนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

ฐาปนี เพ็ชระ

## สารบัญ

	หน้า
.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
.....ง	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	ง
กิตติกรรมประกาศ.....จ	จ
สารบัญ.....ฉ	ฉ
สารบัญตาราง.....ญ	ญ
สารบัญรูปภาพ.....ฎ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย..... 1	1
1.2 วัตถุประสงค์..... 2	2
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ..... 2	2
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์..... 3	3
2.1 พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA)..... 3	3
2.1.1 กระบวนการการสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิด..... 4	4
2.1.1.1 การสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น โดยตรง (direct condensation polymerization)..... 5	5
2.1.1.2 การสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (ring-opening polymerization)..... 5	5
2.1.2 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด..... 5	5
2.2 แบคทีเรียเซลลูโลส (bacterial cellulose, BC) ..... 6	6
2.2.1 สมบัติและการทำงานของแบคทีเรียเซลลูโลส..... 7	7

2.3 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (poly(methyl methacrylate), PMMA) .....	9
2.4 วัสดุเชิงประกอบ (composite materials).....	10
2.4.1 องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ .....	10
2.4.2 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์.....	10
4.2.2.1 วัสดุเชิงประกอบโลหะ (metal composites).....	10
4.2.2.2 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (ceramic composites).....	11
4.2.2.3 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (polymer composites) .....	11
2.4.3 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามลักษณะของสารเสริมแรง.....	11
2.4.3.1 วัสดุเชิงประกอบแบบอนุภาค (particulate composites).....	12
2.4.3.2 วัสดุเชิงประกอบแบบเส้นใย (fiber composites).....	12
2.4.3.3 วัสดุเชิงประกอบแบบแผ่นหรือลามิเนต (laminar composites).....	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	18
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	18
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมแบคทีเรียเซลลูโลสและการสังเคราะห์แบคทีเรีย เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต .....	19
3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด/แบคทีเรีย เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต .....	20
3.2.3 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ.....	20
3.3 แผนผังขั้นตอนการทดลอง และการวิเคราะห์ทดสอบ .....	21
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	21
3.4.1 การเตรียมแบคทีเรียเซลลูโลส .....	21
3.4.2 การสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยกระบวนการ อิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชัน .....	22



3.4.3 การเตรียมแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดกับแบคทีเรียเซลลูโลส.....	23
3.5 การวิเคราะห์ทดสอบ.....	25
3.5.1 การสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	25
3.5.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM.....	25
3.5.1.2 การหาปริมาณการกราฟต์ (grafting yield).....	25
3.5.1.3 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR.....	26
3.5.1.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA.....	26
3.5.1.5 การวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชันด้วยเทคนิค DSC.....	27
3.5.1.6 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค <sup>13</sup> C-NMR .....	28
3.5.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด .....	28
3.5.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด .....	29
3.5.3.1 เสถียรภาพทางความร้อน.....	29
3.5.3.2 พฤติกรรมทางความร้อน.....	29
3.5.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด .....	29
3.5.4.1 ความทนแรงดึง .....	29
3.5.4.2 ความต้านทานแรงดัดโค้ง.....	30
3.5.5 การทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีฝังกลบของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด.....	31
3.5.6 ทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด.....	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	32
4.1 การสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยกระบวนการอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน.....	32
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต .....	32
4.1.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต .....	33
4.1.3 การหาปริมาณการกราฟต์ (grafting yield).....	34

4.1.4 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR .....	34
4.1.5 การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA.....	36
4.1.6 การวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชันด้วยเทคนิค DSC .....	38
4.1.7 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค <sup>13</sup> C-NMR.....	39
4.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด.....	41
4.3 สมบัติทางความร้อนของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด.....	43
4.3.1 เสถียรภาพทางความร้อน .....	43
4.3.2 พฤติกรรมทางความร้อน.....	45
4.4 สมบัติเชิงกลของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด .....	46
4.4.1 ความทนแรงดึง.....	46
4.4.2 ความต้านทานแรงดัดโค้ง .....	48
4.5 สมบัติการย่อยสลายด้วยวิธีฝังกลบของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด .....	50
4.6 ทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด .....	52
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	54
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	54
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	55
บรรณานุกรม .....	56
ภาคผนวก .....	60
ภาคผนวก ก .....	61
ภาคผนวก ข .....	63
ภาคผนวก ค .....	67
ประวัติผู้เขียน .....	69

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	สมบัติทั่วไปของพอลิแล็คติกแอซิด .....	6
ตารางที่ 2.2	สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของแบคทีเรียเซลลูโลส.....	8
ตารางที่ 2.3	สมบัติทั่วไปของพอลิเมทิลเมทาคริเลต [17].....	9
ตารางที่ 2.4	สมบัติเชิงกลของพอลิแล็คติกแอซิดและวัสดุเชิงประกอบพอลิแล็คติกแอซิด .....	13
ตารางที่ 3.1	สมบัติของพอลิแล็คติกแอซิด เกรด 2003D [29] .....	18
ตารางที่ 3.2	อัตราส่วนการกราฟต์ระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสและเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ ....	22
ตารางที่ 3.3	องค์ประกอบของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดสูตรต่างๆ .....	23
ตารางที่ 3.4	อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการอัดแบบ .....	24
ตารางที่ 4.1	อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และ แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนต่างๆ.....	38
ตารางที่ 4.2	ตำแหน่งคาร์บอนอะตอมและค่าเคมีคัลชีพท์ของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสและ แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	41
ตารางที่ 4.3	อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดสูตรต่างๆ .....	43
ตารางที่ 4.4	ความทนแรงดึง ยืดสัมพันธ์ และการยืดตัว ณ จุดขาดของแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด.....	46
ตารางที่ 4.5	ความต้านทานแรงดัดโค้งและยืดสัมพันธ์ดัดโค้งของพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์ และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด.....	48
ตารางที่ 4.6	ร้อยละน้ำหนักที่หายไปของแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนต พอลิแล็คติกแอซิดหลังการย่อยสลายด้วยวิธีฝังกลบเป็นระยะเวลา 30, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ.....	50
ตารางที่ 4.7	ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดหลังการย่อยสลายด้วยวิธีฝังกลบเป็นระยะเวลา 30, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ.....	51
ตารางที่ 4.8	การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด โดยทำการอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20 นาที .....	53

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	โครงสร้างทางเคมีของพอลิแล็คติกแอซิด.....	3
รูปที่ 2.2	โครงสร้างและการจัดเรียงตัวของแล็คติกแอซิด.....	4
รูปที่ 2.3	กระบวนการสังเคราะห์พอลิแล็คติกแอซิด.....	4
รูปที่ 2.4	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส.....	7
รูปที่ 2.5	โครงสร้างโมเลกุลและสัณฐานวิทยาของแบคทีเรียเซลลูโลส [12].....	8
รูปที่ 2.6	โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	9
รูปที่ 2.7	ลักษณะต่างๆของสารเสริมแรง : (a) วัสดุเชิงประกอบแบบอนุภาค (b) วัสดุเชิงประกอบแบบเส้นใย และ (c) วัสดุเชิงประกอบแบบแผ่นหรือลามิเนต [21].....	12
รูปที่ 2.8	สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิแล็คติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยแบคทีเรียเซลลูโลสและเส้นใยเซลลูโลสจากพืชที่ไม่ถูกตัดแปรและที่ถูกตัดแปรด้วยกระบวนการอะซิทิเลชัน.....	15
รูปที่ 2.9	วัสดุเชิงประกอบลามิเนตที่เสริมแรงด้วยกระดาษนาโนแบคทีเรียเซลลูโลสที่จำนวน 1, 3, 6 และ 12 แผ่น ตามลำดับ.....	16
รูปที่ 2.10	FT-IR สเปกตรัมของพอลิเมทิลเมทาคริเลต-กราฟต์-แป้งสาคุ (B1) พอลิเมทิลเมทาคริเลต (B2) และแป้งสาคุ (B3) [30].....	17
รูปที่ 3.1	แผนผังขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์ทดสอบ.....	21
รูปที่ 3.2	แผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	22
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนการเตรียมแผ่นพอลิแล็คติกแอซิด.....	23
รูปที่ 3.4	เครื่องอัดแบบ.....	24
รูปที่ 3.5	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	25
รูปที่ 3.6	เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์.....	26
รูปที่ 3.7	เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน.....	27
รูปที่ 3.8	เครื่องดีฟเพอเรนเซียสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์.....	27
รูปที่ 3.9	เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์.....	28
รูปที่ 3.10	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล.....	30

รูปที่ 3.11	ชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกล .....	30
รูปที่ 3.12	ชิ้นงานทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีฝังกลบ .....	31
รูปที่ 4.1	ลักษณะทางกายภาพของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสและแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนต่างๆ .....	32
รูปที่ 4.2	ลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสและแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่กำลังขยาย 5,000 เท่า .....	33
รูปที่ 4.3	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต .....	34
รูปที่ 4.4	FTIR สเปกตรัมของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	35
รูปที่ 4.5	เทอร์โมแกรม : (a) TGA และ (b) DTG ของแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนต่างๆ.....	37
รูปที่ 4.6	DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนต่างๆ .....	39
รูปที่ 4.7	<sup>13</sup> C-NMR สเปกตรัมของ : (a) BC (b) BC1:1 และ (c) BC1:5 .....	40
รูปที่ 4.8	ลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด : (a) Laminate 1 (b) Laminate 2 และ (c) Laminate 3.....	42
รูปที่ 4.9	เทอร์โมแกรม : (a) TGA และ (b) DTG ของแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด.....	44
รูปที่ 4.10	DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด .....	45
รูปที่ 4.11	สมบัติเชิงกลของแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด : (a) ค่าความทนแรงดึง (b) ยั่งสัมมอดุลัส และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด .....	47
รูปที่ 4.12	สมบัติความต้านทานแรงดัดโค้งของพอลิแล็คติกบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด : (a) ความต้านทานแรงดัดโค้งและ (b) ยั่งสัมมอดุลัสดัดโค้ง.....	49
รูปที่ 4.13	แก้วเครื่องที่ม้วนจากแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด/แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	52

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในปัจจุบันพลาสติกเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายและถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เช่น บรรจุภัณฑ์อาหาร ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ อุปกรณ์ทางการเกษตร เป็นต้น เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ราคาไม่แพง มีความแข็งแรงสูง และความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี อย่างไรก็ตามพลาสติกส่วนใหญ่ผลิตมาจากปิโตรเลียม (petroleum-based synthetic polymer) ซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดและนับวันจะมีปริมาณที่น้อยลงไป อีกทั้งภายหลังจากการใช้งานพลาสติกเหล่านี้ส่วนใหญ่ถูกนำไปกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบ ส่งผลให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและการสะสมของขยะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียมไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติหรืออาจต้องใช้เวลาอันมากในการย่อยสลาย นักวิจัยจำนวนมากจึงทำการพัฒนาพลาสติกชีวภาพ (bioplastics) ที่ผลิตได้จากแหล่งวัตถุดิบจากธรรมชาติและสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ (biodegradable) ในสิ่งแวดล้อมมาใช้ทดแทนพลาสติกแบบเดิม เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและลดการพึ่งพาวัสดุจากปิโตรเลียมที่กำลังมีปริมาณที่น้อยลงไป [1] พอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพที่ได้รับความนิยมมากชนิดหนึ่ง ซึ่งผลิตได้จากแหล่งวัตถุดิบที่สามารถสร้างใหม่ทดแทนได้ เช่น อ้อย ข้าวโพด และมันสำปะหลัง สมบัติเด่นของพอลิแลคติกแอซิด คือ มีลักษณะใส ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ง่าย ความเป็นพิษต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตามพอลิแลคติกแอซิดยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน คือ มีลักษณะแข็งและค่อนข้างเปราะ มีอัตราการตกผลึกช้า ทนความร้อนต่ำ อีกทั้งยังใช้เวลาในการย่อยสลายนานในสภาพแวดล้อมทั่วไป เพราะมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงข้อด้อยดังกล่าวโดยการทำแผ่นลามิเนตระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับแบคทีเรียเซลลูโลสที่มีลักษณะพิเศษคือเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีความบริสุทธิ์สูง มีค่า aspect ratio สูง มีความชอบน้ำ (hydrophilicity) สูง สามารถนำไปดัดแปรเพื่อทำให้มีสมบัติเข้ากับพอลิเมอร์ที่มีความ hydrophobic ได้ [2] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะทำการดัดแปรพื้นผิวของแบคทีเรียเซลลูโลสโดยการต่อกิ่งด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต (ตัวประสานระหว่างเซลลูโลสกับพอลิแลคติกแอซิด) [3] ซึ่งคาดว่าเมื่อนำไปทำแผ่นลามิเนตกับพอลิแลคติกแอซิดด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป (compression molding) แล้วจะทำให้แบคทีเรียเซลลูโลส

ยึดเกาะกับเนื้อเมทริกซ์ได้ดีมากขึ้น โดยไม่เกิดการแยกเฟส จากนั้นจะทำการศึกษาสมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อนและการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลามิเนตที่เตรียมได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. สังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตโดยกระบวนการอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน
2. เตรียมแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด/แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต
3. ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด/แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เตรียมได้

## 1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด/แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีสมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อนและการย่อยสลายทางชีวภาพที่ดี

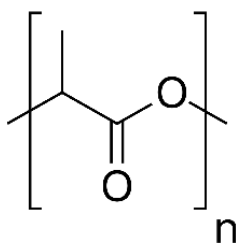
## บทที่ 2

### วารสารปริทรรศน์

#### 2.1 พอลิแล็คติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA)

พอลิแล็คติกแอซิด เป็นพลาสติกทางชีวภาพชนิดพอลิเอสเตอร์ (polyester) ที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบอะลิฟาติกพอลิเอสเตอร์ (aliphatic polyester) ดังรูปที่ 2.1 สังเคราะห์ได้จากแล็คติกแอซิด (lactic acid) ที่ได้จากการหมักแป้งและน้ำตาลจากพืชต่างๆ เช่น อ้อย ข้าวโพด หรือมันสำปะหลัง โดยกระบวนการผลิตเริ่มต้นจากการบดพืชให้ละเอียดเป็นแป้ง จากนั้นทำการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลแล้วนำไปหมัก (fermentation) โดยใช้จุลินทรีย์เปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นแล็คติกแอซิด จากนั้นนำมาแยกให้บริสุทธิ์แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการสังเคราะห์เป็นพอลิแล็คติกแอซิด ซึ่งพอลิแล็คติกแอซิดจัดเป็นเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) ที่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการผลิตทั่วไป เช่น การฉีดขึ้นรูป (injection molding) การอัดรีด (extrusion) การเป่าขึ้นรูป (blow molding) การขึ้นรูปด้วยความร้อน (thermoforming) และการอัดขึ้นรูป (compression molding) นอกจากนี้หลังจากการใช้งานผลิตภัณฑ์จากพอลิแล็คติกแอซิดสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเมื่อนำไปฝังกลบในดินภายใต้ภาวะที่เหมาะสม โดยใช้ระยะเวลาสั้นกว่าพลาสติกจากแหล่งปิโตรเลียม ด้วยเหตุนี้พอลิแล็คติกแอซิดจึงเป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยมมากเพื่อนำมาใช้ทดแทนพลาสติกจากปิโตรเลียมที่ย่อยสลายได้ยาก [4, 5]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

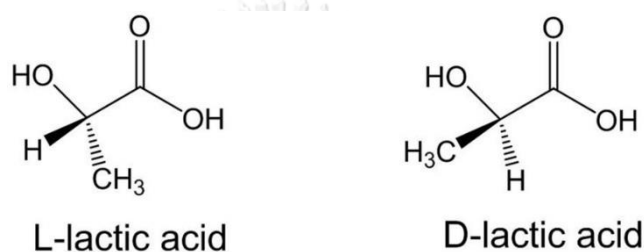


รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิแล็คติกแอซิด

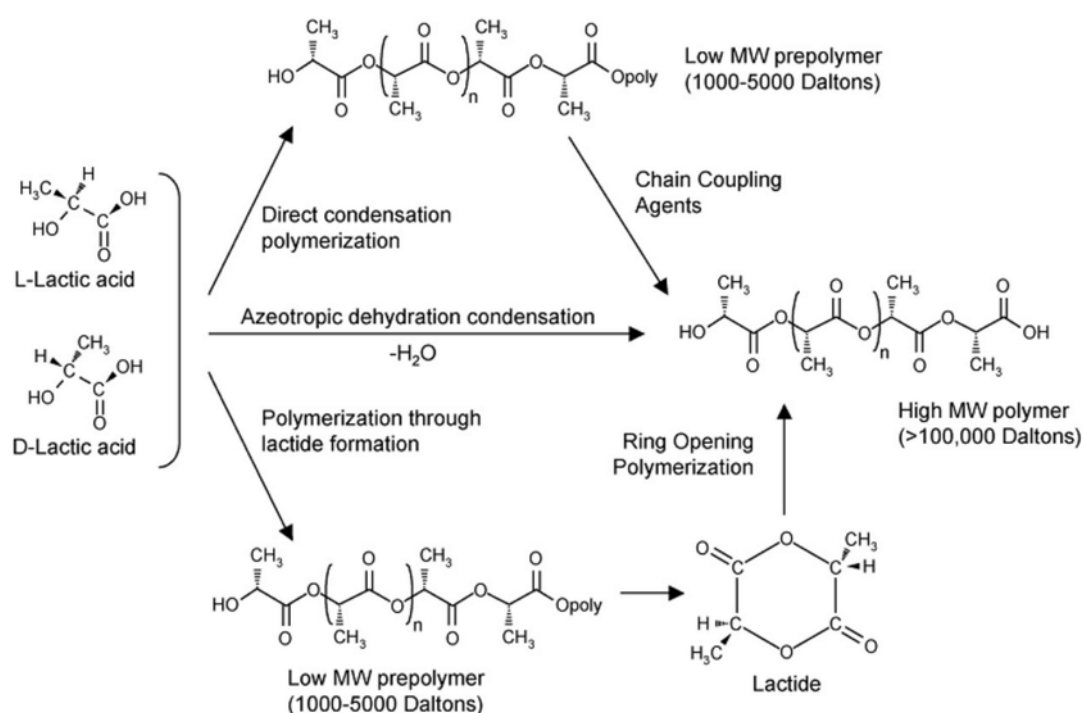


### 2.1.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแล็คติกแอซิด

พอลิแล็คติกแอซิดสังเคราะห์ได้จากแล็คติกแอซิด ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา มีการจัดเรียงตัว 2 รูปแบบ คือ ดี-แล็คติกแอซิด (D-lactic acid) และ แอล-แล็คติกแอซิด (L-lactic acid) ดังรูปที่ 2.2 โดยพอลิแล็คติกแอซิดสามารถสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นโดยตรงของแล็คติกแอซิด (direct condensation polymerization) หรือสังเคราะห์ผ่านการเปิดวงของแล็คไทด์ (ring-opening polymerization) ในเชิงพาณิชย์จะนิยมสังเคราะห์ให้โดยผ่านการเปิดวงของแล็คไทด์ (lactide) เนื่องจากให้พอลิแล็คติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง



รูปที่ 2.2 โครงสร้างและการจัดเรียงตัวของแล็คติกแอซิด



รูปที่ 2.3 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแล็คติกแอซิด

### 2.1.1.1 การสังเคราะห์พอลิแล็คติกแอซิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นโดยตรง (direct condensation polymerization)

การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบควบแน่นโดยตรงนั้น จะใช้แล็คติกแอซิดเป็นสารตั้งต้นและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวลดความดัน ซึ่งในกระบวนการนี้พบว่าการกำจัดน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์ออกให้หมดเป็นเรื่องยาก จึงไม่สามารถควบคุมการจัดเรียงตัวของโครงสร้างทางเคมีได้ ส่งผลให้พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้น้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการนี้เรียกว่า “พอลิแล็คติกแอซิด”

### 2.1.1.2 การสังเคราะห์พอลิแล็คติกแอซิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (ring-opening polymerization)

การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบเปิดวงเป็นวิธีที่สามารถควบคุมโครงสร้างทางเคมีได้โดยการแตกวงออกของแล็คไทด์ด้วยความร้อน และใช้ทินออกโทเอต (tin(II) octoate) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการนี้จะได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีความบริสุทธิ์ ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการนี้เรียกว่า “พอลิแล็คไทด์ (polylactide)”

### 2.1.2 สมบัติของพอลิแล็คติกแอซิด

พอลิแล็คติกแอซิดเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างได้ทั้งพอลิเมอร์อสัณฐาน (amorphous polymer) และพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semicrystalline polymer) ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและอัตราส่วนของมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ ดี-แล็คติกแอซิดและแอล-แล็คติกแอซิด ซึ่งเป็นอีแนนทิโอเมอร์กัน (enantiomer) หากอัตราส่วนของแอล-แล็คติกแอซิดมากกว่าร้อยละ 90 พอลิเมอร์จะมีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีสัดส่วนของดี-แล็คติกแอซิดเพิ่มขึ้นจะมีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน โดยอัตราส่วนของมอนอเมอร์ที่ต่างกันนี้จะส่งผลต่อระดับความเป็นผลึกและส่งผลต่อสมบัติของพอลิแล็คติกแอซิดด้วย ดังนั้นอัตราส่วนของมอนอเมอร์ที่แตกต่างกันในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้พอลิแล็คติกแอซิดที่สังเคราะห์ได้มีสมบัติได้หลากหลาย จึงสามารถปรับกระบวนการสังเคราะห์ของพอลิแล็คติกแอซิดเพื่อรองรับความต้องการใช้งานที่กว้างขึ้นและเหมาะสมต่อลักษณะการใช้งานในด้านต่างๆได้ [6]

พอลิแล็คติกแอซิดมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature,  $T_g$ ) อยู่ในช่วง 55 ถึง 70 องศาเซลเซียส มีอุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ) อยู่ในช่วง

130 ถึง 215 องศาเซลเซียส สมบัติเด่นของพอลิแล็คติกแอซิด คือ มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพที่ดี มีความใส ขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ง่าย ความเป็นพิษต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตามพอลิแล็คติกแอซิดยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน คือ มีลักษณะแข็งและค่อนข้างเปราะ มีอัตราการตกผลึกช้า ทนความร้อนต่ำ อีกทั้งยังใช้เวลาในการย่อยสลายนานในสภาพแวดล้อมทั่วไป เพราะมีสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จึงไม่เหมาะที่จะนำพอลิแล็คติกแอซิดไปใช้งานในบางด้าน เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรงและความเหนียว [7]

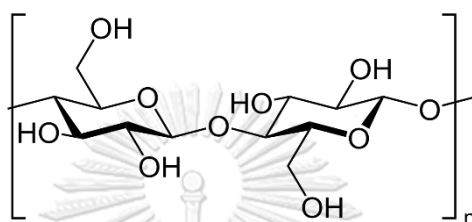
### ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของพอลิแล็คติกแอซิด

สมบัติ	ค่า
น้ำหนักโมเลกุล (kg/mol)	100-300
อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )	55-70
อุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )	130-215
พลังงานความร้อนของการหลอมเหลว (J/m)	8.1-93.1
ดีกรีความเป็นผลึก (%)	10-40
ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )	1.25
ดรรชนีการหลอมไหล (MFI) (g/10 min)	2-20
ความต้านทานแรงดึง (GPa)	1.94-4.1
การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)	100-180
อุณหภูมิการสลายตัว ( $^{\circ}\text{C}$ )	500-600

### 2.2 แบคทีเรียเซลลูโลส (bacterial cellulose, BC)

เซลลูโลส (cellulose) เป็นพอลิเมอร์ที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของผนังเซลล์พืช โดยเซลลูโลสเป็นสารชีวโมเลกุลประเภทคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคส (glucose) มาต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ที่ตำแหน่งปีต้า-1,4 ดังรูปที่ 2.4 นอกจากนี้เซลลูโลสที่ได้จากพืชแล้วเซลลูโลสยังสามารถผลิตได้จาก

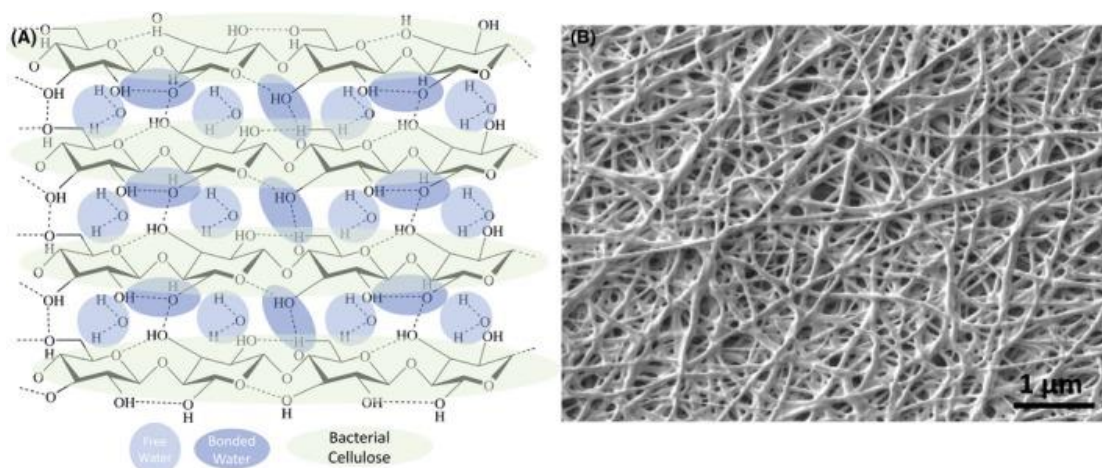
แบคทีเรียบางชนิด เช่น acetobacter rhizobium agrobacterium และ sarcina โดยเซลลูโลสที่ได้จากแบคทีเรียจะถูกเรียกว่า “แบคทีเรียเซลลูโลส (bacterial cellulose)” แม้ว่าโครงสร้างทางเคมีของแบคทีเรียเซลลูโลสจะเหมือนกับเซลลูโลสจากพืช แต่เนื่องจากแบคทีเรียเซลลูโลสไม่มีเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) อยู่ในองค์ประกอบเหมือนกับเซลลูโลสจากพืช จึงมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีแตกต่างกัน โดยแบคทีเรียเซลลูโลสจะมีความบริสุทธิ์สูงกว่า และมีขนาดเล็กกว่าเซลลูโลสจากพืช [8, 9]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

### 2.2.1 สมบัติและการใช้งานของแบคทีเรียเซลลูโลส

แบคทีเรียเซลลูโลส เป็นพอลิเมอร์ที่มีความบริสุทธิ์สูง เส้นใยมีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร โดยมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยจากพืช 100 เท่า มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยอย่างเป็นระเบียบ และมีโครงสร้างแบบร่างแห (network structure) ลักษณะดังรูปที่ 2.5 ส่งผลให้ความเป็นผลึกและความแข็งแรงสูงมาก นอกจากนี้แบคทีเรียเซลลูโลสยังมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูง (high water holding capacity) ความสามารถในการย่อยสลายที่ดี (biodegradability) ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatibility) และยังมีคุณสมบัติชอบน้ำสูงด้วย (hydrophilicity) ในปัจจุบันแบคทีเรียเซลลูโลสจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานที่หลากหลาย เช่น การผลิตกระดาษ สารเพิ่มความหนืดและสารให้ความคงตัวในผลิตภัณฑ์อาหาร วัสดุชีวภาพสำหรับการผลิตเครื่องสำอาง และเป็นสารเสริมแรงให้กับวัสดุเชิงประกอบ [10, 11]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลและสัณฐานวิทยาของแบคทีเรียเซลลูโลส [12]

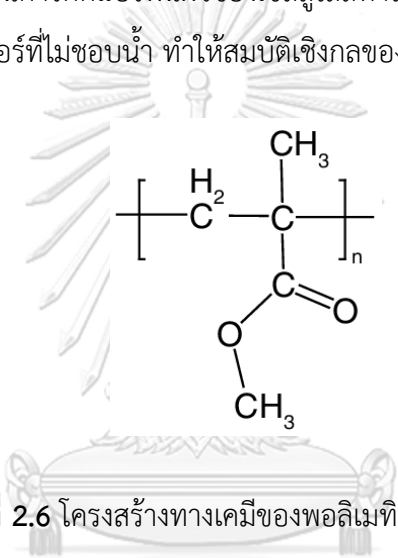
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของแบคทีเรียเซลลูโลส

สมบัติ	ค่า
ค่ายังส์มอดุลัส (GPa)	16.9
ค่าความทนแรงดึง (MPa)	256
Weight average degree of polymerization	14,000
ความเป็นผลึก	60%-80%

แต่อย่างไรก็ตามการใช้เซลลูโลสในวัสดุเชิงประกอบ (composite materials) ยังมีข้อจำกัดของความไม่เข้ากันระหว่างเซลลูโลสและเมทริกซ์พอลิเมอร์ เนื่องจากความชอบน้ำของเซลลูโลส ทำให้การยึดเกาะกันได้ไม่ดีกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงสมบัติและความเข้ากันได้ของเซลลูโลสด้วยวิธีต่างๆ โดยหนึ่งในวิธีการดัดแปลงทางเคมีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือการต่อกิ่งพอลิเมอร์ (graft copolymerization) ลงบนพื้นผิวของเซลลูโลส ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่นำมาต่อกิ่ง เช่น พอลิอะคริลิกแอซิด (polyacrylic acid, PAA) พอลิเมทิลเมทาคริเลต (poly(methylmethacrylate), PMMA) เป็นต้น [13, 14]

### 2.3 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (poly(methyl methacrylate), PMMA)

พอลิเมทิลเมทาคริเลต เป็นเทอร์โมพลาสติกที่สามารถสังเคราะห์ได้จากเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ (methyl methacrylate, MMA) ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของพอลิเมทิลเมทาคริเลตสามารถทำได้หลายแบบ ทั้งวิธีการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (emulsion polymerization) แบบแขวนลอย (suspension polymerization) แบบสารละลาย (solution polymerization) และแบบบัลค์ (bulk polymerization) สมบัติเด่นของพอลิเมทิลเมทาคริเลต คือ มีความแข็งแรง มีลักษณะโปร่งใส และน้ำหนักเบา นอกจากนี้การนำพอลิเมทิลเมทาคริเลตไปใช้ในการตัดแปรรูปผิวของเซลลูโลสทำให้ความชอบน้ำลดลง ช่วยเพิ่มการยึดเกาะกับเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ ทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบดีขึ้น [15, 16]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมทิลเมทาคริเลต

ตารางที่ 2.3 สมบัติทั่วไปของพอลิเมทิลเมทาคริเลต [17]

สมบัติ	ค่า
อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )	50-130
อุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )	190
ความหนาแน่น ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.17-1.20
การส่องผ่านของแสง (%)	92.6
การดูดซับน้ำ (%w)	2

## 2.4 วัสดุเชิงประกอบ (composite materials)

วัสดุเชิงประกอบ หมายถึงวัสดุที่เกิดจากการรวมตัวกันของวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป และไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน โดยแต่ละชนิดมีสมบัติทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างกัน ทำให้สมบัติของวัสดุเชิงประกอบที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ การกำหนดสมบัติของวัสดุเชิงประกอบสามารถออกแบบได้จากวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ สัดส่วนระหว่างวัสดุองค์ประกอบ ความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุองค์ประกอบ การเรียงตัวของสารเสริมแรง และการกระจายตัวของสารเสริมแรงในเมทริกซ์ การควบคุมปัจจัยเหล่านี้ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติตามต้องการและสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย [18]

### 2.4.1 องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบ

องค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก เรียกว่า เมทริกซ์ (matrix) และส่วนที่เป็นเฟสกระจายตัวอยู่ในเนื้อหลักเรียกว่า สารเสริมแรง (reinforcement) [19, 20]

1. เมทริกซ์ (matrix) คือ องค์ประกอบหลักที่เป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่งและการเรียงตัวที่กำหนด โดยจะห่อหุ้มและปกป้องส่วนเสริมแรงจากความเสียหายที่อาจจะเกิดจากสภาพแวดล้อมหรือแรงที่กระทำกับวัสดุ

2. สารเสริมแรง (reinforcement) เป็นส่วนที่เสริมความแข็งแรงให้กับวัสดุเชิงประกอบ มักเป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง (discontinuous phase) หรือเป็นเฟสกระจาย (dispersed phase) ซึ่งอาจเป็นอนุภาคเล็กๆ หรือเป็นเส้นใยก็ได้ เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น โดยสารเสริมแรงจะทำหน้าที่เสริมสมบัติให้เมทริกซ์และทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติตามต้องการ

### 2.4.2 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามชนิดของเมทริกซ์

วัสดุเชิงประกอบสามารถแยกประเภทตามชนิดของเมทริกซ์ออกเป็น 3 ประเภท คือ

#### 4.2.2.1 วัสดุเชิงประกอบโลหะ (metal composites)

วัสดุเชิงประกอบโลหะ คือวัสดุที่มีโลหะเป็นเมทริกซ์ เช่น อะลูมิเนียมและไทเทเนียม เป็นต้น วัสดุที่ใช้เสริมแรงสำหรับโลหะต้องมีความแข็งแรงสูงและทนความร้อนสูงด้วย เนื่องจากโลหะ

ต้องใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปสูงมากและสารเสริมแรงที่ใช้ต้องไม่เกิดการกัดกร่อนเมทริกซ์โลหะ ดังนั้น สารเสริมแรงที่ใช้จึงต้องเป็นสารเสริมแรงเซรามิกหรือสารเสริมแรงโลหะ เช่น อะลูมินา ซิลิกอนคาร์ไบด์ เส้นใยโบรอน เป็นต้น โดยวัสดุเชิงประกอบโลหะส่วนใหญ่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ในกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์

#### 4.2.2.2 วัสดุเชิงประกอบเซรามิก (ceramic composites)

วัสดุเชิงประกอบเซรามิก คือวัสดุเชิงประกอบที่มีเซรามิกเป็นเมทริกซ์ เช่น อะลูมินา ซิลิกอนคาร์ไบด์ และซีเมนต์ เป็นต้น ซึ่งเซรามิกเป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ทนต่อการกัดกร่อน ไม่นำความร้อน อัตราการเปลี่ยนรูปร่างเมื่อได้รับความร้อนต่ำ และมีน้ำหนักเบา กว่าวัสดุเชิงประกอบประเภทโลหะ แต่ข้อจำกัดของเซรามิก คือ มีความเปราะและแตกหักง่าย การเสริมแรงให้กับเมทริกซ์เซรามิกจะเป็นการปรับปรุงสมบัติให้วัสดุเชิงประกอบมีความเหนียวและทนทานมากขึ้น โดยวัสดุที่ใช้เสริมแรงจะอยู่ในรูปของอนุภาคหรือเส้นใย เช่น คาร์บอน ซิลิกา และอะลูมินา เป็นต้น

#### 4.2.2.3 วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ (polymer composites)

วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ คือวัสดุเชิงประกอบที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ โดยพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่น การเสริมแรงให้พอลิเมอร์ทำได้โดยการเติมเส้นใยเสริมแรงลงในพอลิเมอร์ให้เกิดวัสดุที่มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยทั่วไปเส้นใยเสริมแรงสำหรับวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์มักเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูงเพื่อทำหน้าที่ในการรับและกระจายแรง ทำให้พอลิเมอร์เมทริกซ์สามารถรับแรงกระทำที่สูงขึ้นโดยไม่เปลี่ยนรูปร่าง

### 2.4.3 การจำแนกประเภทของวัสดุเชิงประกอบตามลักษณะของสารเสริมแรง

วัสดุเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบสามารถแบ่งออกตามลักษณะรูปร่างได้ 3 แบบ คือ แบบเส้นใย แบบอนุภาค และแบบลามิเนต



### 2.4.3.1 วัสดุเชิงประกอบแบบอนุภาค (particulate composites)

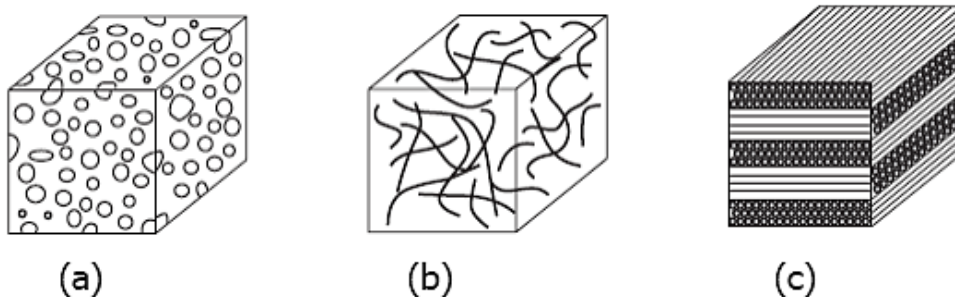
วัสดุเชิงประกอบแบบอนุภาค คือ วัสดุเชิงประกอบที่นำอนุภาคมาเป็นส่วนเสริมแรง ซึ่งอนุภาคเสริมแรงจะมีลักษณะเป็นเม็ด (beads) หรือผง (powder) โดยจะมีขนาดอนุภาคตั้งแต่ระดับนาโนขึ้นไป เช่น ผงถ่านดำ อะลูมินา ซิลิกอนคาร์ไบด์ ซิลิกอนไนไตรด์ เป็นต้น

### 2.4.3.2 วัสดุเชิงประกอบแบบเส้นใย (fiber composites)

วัสดุเชิงประกอบแบบเส้นใย คือวัสดุเชิงประกอบที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย ซึ่งอาจเป็นเส้นใยาว (long fiber) ถ้ามีอัตราส่วนมากกว่า 1,000 ขึ้นไป และเส้นใยสั้น (short fiber) ถ้ามีอัตราส่วนน้อยกว่า 1,000 โดยมักจะเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง

### 2.4.3.3 วัสดุเชิงประกอบแบบแผ่นหรือลามิเนต (laminar composites)

วัสดุเชิงประกอบแบบแผ่นหรือลามิเนต คือ วัสดุเชิงประกอบที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดเกาะแบบประกบเป็นชั้นคล้ายแซนด์วิช (sandwich) หรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (honeycomb)



รูปที่ 2.7 ลักษณะต่างๆของสารเสริมแรง : (a) วัสดุเชิงประกอบแบบอนุภาค (b) วัสดุเชิงประกอบแบบเส้นใย และ (c) วัสดุเชิงประกอบแบบแผ่นหรือลามิเนต [21]

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jonoobi และคณะ [22] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่มีการเติมเส้นใยนาโนเซลลูโลส (cellulose nanofiber, CNF) จากปอแก้วเป็นสารเสริมแรงให้กับพอลิแล็คติกแอซิด โดยเตรียมวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยมวล ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ พบว่าค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) และค่ามอดุลัส (tensile modulus) ของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มมากขึ้น ดังตารางที่ 2.4 โดยที่ปริมาณเส้นใยนาโนเซลลูโลสที่ร้อยละ 5 โดยมวล ความทนแรงดึงเพิ่มจาก 58 MPa ไปเป็น 71 MPa และค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นจาก 2.9 GPa ไปเป็น 3.6 GPa เมื่อเทียบกับพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์

ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของพอลิแล็คติกแอซิดและวัสดุเชิงประกอบพอลิแล็คติกแอซิด

Materials	Tensile modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Max strain (%)
PLA	2.9 ± 0.6	58.9 ± 0.5	3.4 ± 0.4
PLA-CNF1	3.3 ± 0.4	63.1 ± 0.9	2.8 ± 0.3
PLA-CNF3	3.4 ± 0.1	65.1 ± 0.6	2.7 ± 0.2
PLA-CNF5	3.6 ± 0.7	71.2 ± 0.6	2.7 ± 0.1

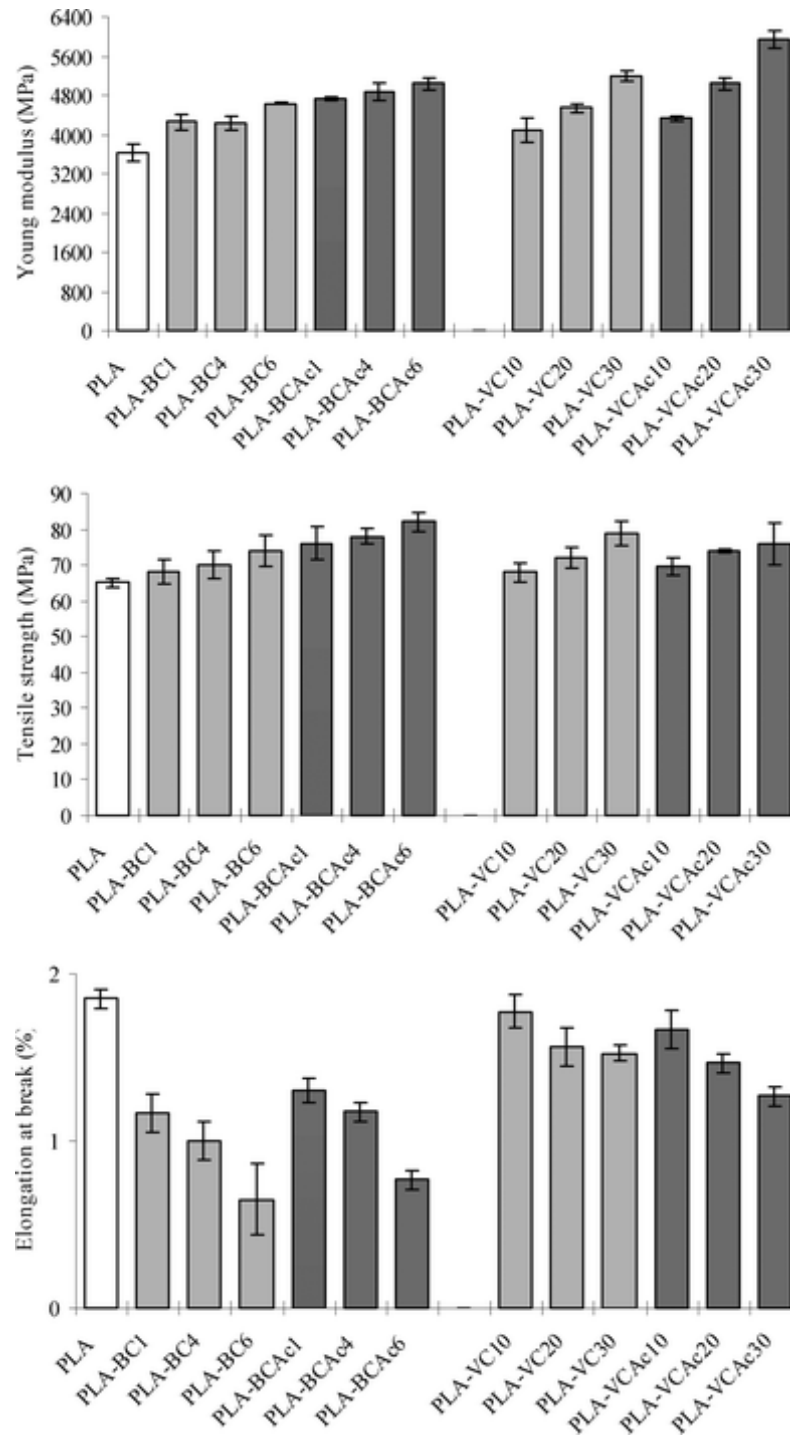
Lv และคณะ [23] ทำการศึกษาร้อยสลายของพอลิแล็คติกแอซิดที่มีการผสมกับแป้งและผงไม้ด้วยวิธีฝังดิน (soil burial) จากผลการศึกษาพบว่าภายหลังการฝังดิน 60 วัน พื้นผิวของพอลิแล็คติกแอซิดเบลนด์มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพอย่างเห็นได้ชัดกว่าพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์ และการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหลังการย่อยสลายของพอลิแล็คติกแอซิดเบลนด์เพิ่มขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนของแป้งและผงไม้ที่เพิ่มขึ้น บ่งชี้ว่าแป้งและผงไม้สามารถเร่งอัตราการย่อยสลายของพอลิแล็คติกแอซิดเบลนด์ได้ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolytic degradation)

Threepopnatkul และคณะ [24] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพอลิแล็คติกแอซิด โดยใช้แบคทีเรียเซลลูโลสเป็นตัวเสริมแรง โดยเตรียมแบคทีเรียเซลลูโลสที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน 3 ชนิด คือ 3-aminopropyltrimethoxysilane (APS),

N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane (DMS) และ N-(3-trimethoxysilyl propyl) diethylenetriamine (TMS) ที่ปริมาณร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยมวล นำไปผสมกับ พอลิแล็คติกแอซิดที่กราฟต์ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride, MA) จากการศึกษาพบว่า สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ แבקที่เรียเซลลูโลสเพิ่มขึ้น รวมถึงความเป็นผลึกของพอลิแล็คติกแอซิดยังเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ แבקที่เรียเซลลูโลสเพิ่มขึ้นอีกด้วย นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบว่าวัสดุเชิงประกอบของแบกที่เรียเซลลูโลสที่ ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนทั้ง 3 ชนิดมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดีกว่าวัสดุ เชิงประกอบของแบกที่เรียเซลลูโลสที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้กับเมทริกซ์ ของพอลิแล็คติกแอซิด โดยแบกที่เรียเซลลูโลสที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย TMS แสดงความเข้ากันได้ กับเมทริกซ์ของพอลิแล็คติกแอซิดมากกว่าที่ผ่านการปรับปรุงด้วย DMS และ APS

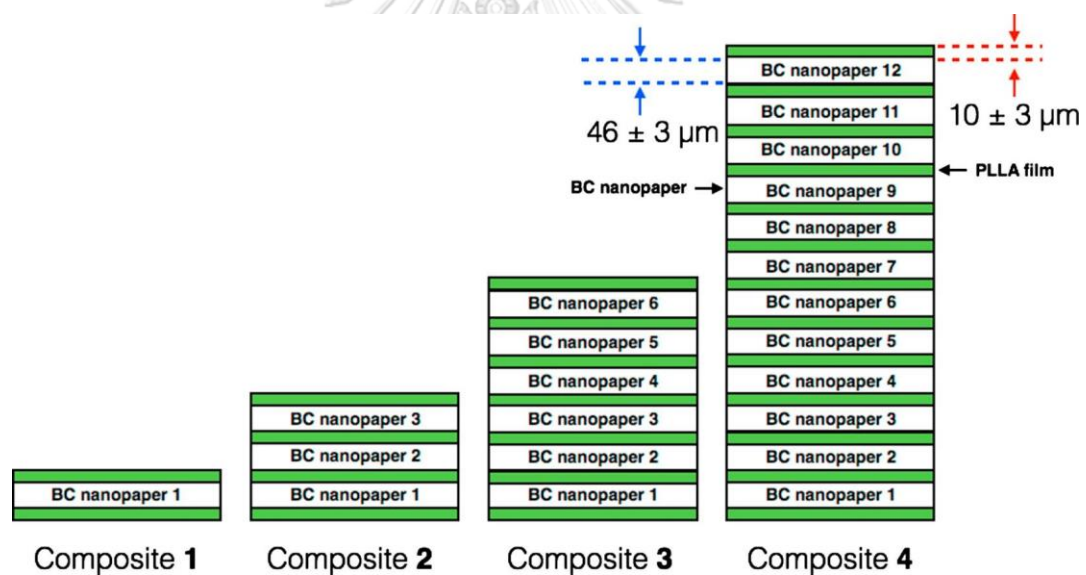
Tome และคณะ [25] ทำการเตรียมวัสดุเชิงประกอบชีวภาพของพอลิแล็คติกแอซิด โดยเสริมแรงด้วยแบกที่เรียเซลลูโลส (BC) และเส้นใยเซลลูโลสจากพืช (VC) ที่ไม่ผ่านการดัดแปร (unmodified) และถูกดัดแปรด้วยกระบวนการอะซิไทเลชัน (acetylation) ซึ่งมีปริมาณแบกที่เรีย เซลลูโลสตั้งแต่ร้อยละ 1, 4 และ 6 โดยน้ำหนักและปริมาณเส้นใยเซลลูโลสจากพืชร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วย เส้นใยเซลลูโลสจากพืช (unmodified VC) ปริมาณร้อยละ 10 ไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของวัสดุเชิง ประกอบ ในขณะที่เซลลูโลสจากพืชที่ปริมาณร้อยละ 20 และ 30 มีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้นและ สูงสุดลดลงประมาณ 10 องศาเซลเซียส ส่วนการเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสจากพืชที่ถูกอะซิไทเลต (acetylated VC) มีอุณหภูมิการสลายตัวสูงกว่าเมทริกซ์พอลิแล็คติกแอซิดเล็กน้อยประมาณ 5 องศา เซลเซียส ในส่วนของการเสริมแรงด้วยแบกที่เรียเซลลูโลสในเมทริกซ์พอลิแล็คติกแอซิด เมื่อปริมาณ แบกที่เรียเซลลูโลสทั้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร (unmodified BC) และถูกอะซิไทเลต (acetylated BC) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการเติมแบกที่เรีย เซลลูโลสที่ถูกดัดแปรด้วยกระบวนการอะซิไทเลชันที่ปริมาณร้อยละ 6 มีอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น และสูงสุดเพิ่มขึ้น 15 และ 14 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งการมีเสถียรภาพที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจาก ความเข้ากันได้ดีระหว่างเมทริกซ์พอลิแล็คติกแอซิดและแบกที่เรียเซลลูโลสที่ถูกอะซิไทเลต และจาก การศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าความทนต่อแรงดึงและยังสม่ำเสมอเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแบกที่เรียเซลลูโลส และเส้นใยเซลลูโลสจากพืชเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณแบกที่เรียเซลลูโลสและ

เส้นใยเซลลูโลสจากพืชทำให้การยึดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพอลิแล็คติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยแบคทีเรียเซลลูโลสและเส้นใยเซลลูโลสจากพืชที่ไม่ถูกดัดแปรและที่ถูกดัดแปรด้วยกระบวนการอะซิทธิเลชัน

Hervy และคณะ [26] ศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยกระดาษนาโนแบคทีเรียเซลลูโลส โดยศึกษาผลของจำนวนกระดาษนาโนแบคทีเรียเซลลูโลสที่ 1, 3, 6 และ 12 แผ่น ดังรูปที่ 2.9 พบว่าการเพิ่มจำนวนของแผ่นกระดาษนาโนแบคทีเรียเซลลูโลสจาก 1 ถึง 12 แผ่น ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีรูพรุนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 17 ถึงประมาณร้อยละ 30 นอกจากนี้ยังพบว่าจำนวนแผ่นของกระดาษนาโนแบคทีเรียเซลลูโลสไม่มีผลต่อค่ามอดุลัสมากนัก โดยจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 12.4 ถึง 13.6 GPa แต่อย่างไรก็ตามค่าความทนต่อแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบลามิเนตที่เสริมแรงด้วยกระดาษนาโนแบคทีเรียเซลลูโลสลดลงร้อยละ 21 จาก 121 MPa เป็น 95 MPa และจากการวิเคราะห์การแตกหักของตัวอย่างทดสอบพบว่าวัสดุเชิงประกอบลามิเนตที่เสริมแรงด้วยกระดาษนาโนแบคทีเรียเซลลูโลสจำนวนมากกว่า 3 แผ่น ขึ้นไปมีการแตกหักของตัวอย่างทดสอบที่กว้าง ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยกระดาษนาโนแบคทีเรียเซลลูโลสจำนวน 1 แผ่นนั้นมีการแตกหักเฉพาะที่

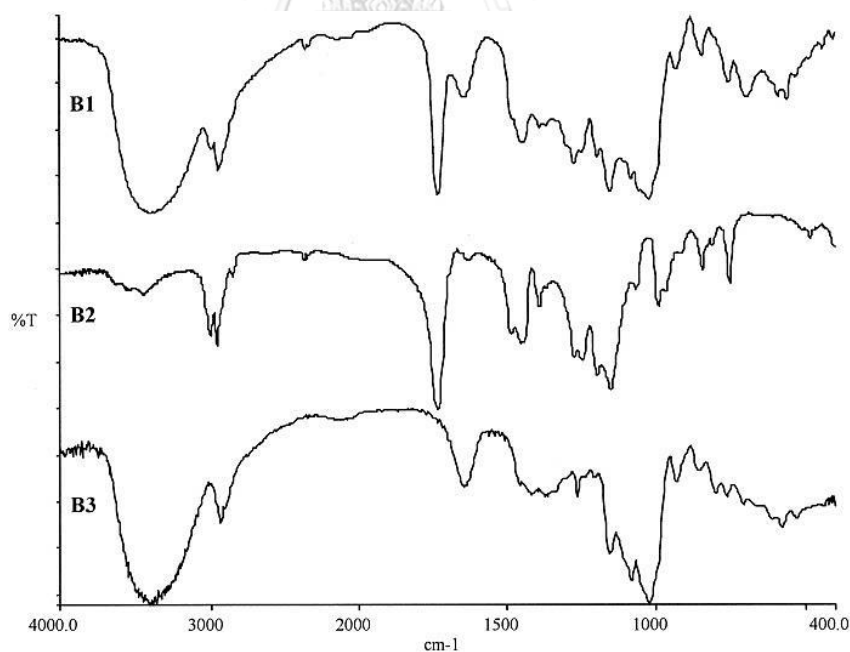


รูปที่ 2.9 วัสดุเชิงประกอบลามิเนตที่เสริมแรงด้วยกระดาษนาโนแบคทีเรียเซลลูโลสที่จำนวน 1, 3, 6 และ 12 แผ่น ตามลำดับ

Rosli และคณะ [27] ได้ทำการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตบนเซลลูโลสที่ได้มาจาก *Agave angustifolia* โดยใช้เซริกแอมโมเนียมไนเตรต (ceric ammonium nitrate, CAN) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากการทดสอบด้วยเทคนิคฟูเรียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี ยืนยันการกราฟต์ของเซลลูโลสเนื่องจากพบพีคที่ตำแหน่ง 2995, 1738,

1440 และ  $845\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพอลิเมทิลเมทาคริเลต การกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตบนเซลลูโลสทำให้ทนความร้อนได้สูงขึ้น และจากการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำพบว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลตช่วยลดความชอบน้ำของเซลลูโลส ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีที่สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงการยึดเกาะกับเมทริกซ์พอลิแล็คติกแอซิดที่ไม่ชอบน้ำ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบได้

Qudsieh และคณะ [28] ทำการสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์บนแป้งสาคุ โดยใช้ โพลีเมทิลเมทาคริเลต (PPS) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าเมื่อใช้ PPS เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาให้ปริมาณการต่อกิ่งสูงสุดถึงร้อยละ 90 เมื่อใช้แป้งสาคุ 1 กรัม MMA 47 มิลลิโมล และ PPS 1.82 มิลลิโมล ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที และจากตรวจสอบด้วยเทคนิคฟูเรียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโคปี ดังรูปที่ 2.10 พบพีกที่ตำแหน่ง  $1733\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพันธะเอสเทอร์ (C=O) ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต และที่ตำแหน่ง  $3407\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพันธะ OH ของเซลลูโลส นอกจากนี้ยังพบพีกที่ตำแหน่ง  $2994\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่เมทิล (C-H stretching) แสดงว่าการกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตลงบนแป้งสาคุได้สำเร็จ



รูปที่ 2.10 FT-IR สเปกตรัมของพอลิเมทิลเมทาคริเลต-กราฟต์-แป้งสาคุ (B1) พอลิเมทิลเมทาคริเลต (B2) และแป้งสาคุ (B3) [30]

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) ชื่อทางการค้า INGENEO เกรด 2003D จากบริษัท Nature Work (ประเทศสหรัฐอเมริกา)

ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด เกรด 2003D [29]

สมบัติ	2003D	มาตรฐานการทดสอบ
ความถ่วงจำเพาะ ( $\text{g/cm}^3$ )	1.24	D792
อัตราการไหลของมวลขณะหลอมเหลว ( $\text{g/10min}$ )	6	D1238
ความทนแรงดึง (MPa)	60	D882
ยังส์มอดุลัส (GPa)	3.5	D882
การยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (%)	6.0	D882
อุณหภูมิการคงรูปทางความร้อน ( $^{\circ}\text{C}$ )	55	E2092

2. แบคทีเรียเซลลูโลส (SCOBY bacterial cellulose) เพราะเลี้ยงโดยใช้ kombucha SCOBY starter

3. เมทิลเมทาคริเลต (methyl methacrylate, MMA) จากบริษัท Thai MMA (ประเทศไทย)

4. โพแทสเซียมเปอร์ออกไซด์โซเดียมเพต (potassium peroxodisulfate,  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Quality Reagent Chemical (ประเทศนิวซีแลนด์)

5. กลีเซอรอล (Glycerol) ร้อยละ 99.5 จากบริษัท Quality Reagent Chemical (ประเทศนิวซีแลนด์)

6. อะซิโตน (Acetone) จากบริษัท RCI Labscan (ประเทศไทย)

7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) เกรดวิเคราะห์ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 จากบริษัท Loba Chemie (ประเทศไทย)

8. โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (sodium hypochlorite, NaClO) เกรดห้องปฏิบัติการ ความเข้มข้นร้อยละของคลอรีน 4 ถึง 6 จากบริษัท Loba Chemie (ประเทศไทย)

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมแบคทีเรียเซลลูโลสและการสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

1. ปีกเกอร์ (beaker) ขนาด 50 100 250 600 และ 1000 มิลลิลิตร
2. กระจกตวงสาร ขนาด 10 50 และ 100 มิลลิลิตร
3. หลอดหยดสาร (dropper)
4. ถาดพลาสติก
5. ถาดเทฟลอน ขนาด 8x8 นิ้ว
6. ผ้าขาวบาง
7. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic bar)
8. เครื่องปั่นน้ำผลไม้ ความเร็วรอบสูงสุด 40,000 รอบต่อนาที ของบริษัท STORM
9. เครื่องกวนสารแบบใช้ความร้อน (hotplate stirrer) ของบริษัท MTOPS รุ่น MS300HS
10. เครื่องชั่งดิจิตอลทศนิยมสี่ตำแหน่ง ของบริษัท OHAUS รุ่น pioneer PA214
11. ตู้อบสาร (hot air oven) ของบริษัท MEMMERT รุ่น UNB 400
12. เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) ของบริษัท Hettich zentrifugen (ประเทศเยอรมัน) รุ่น universal 320



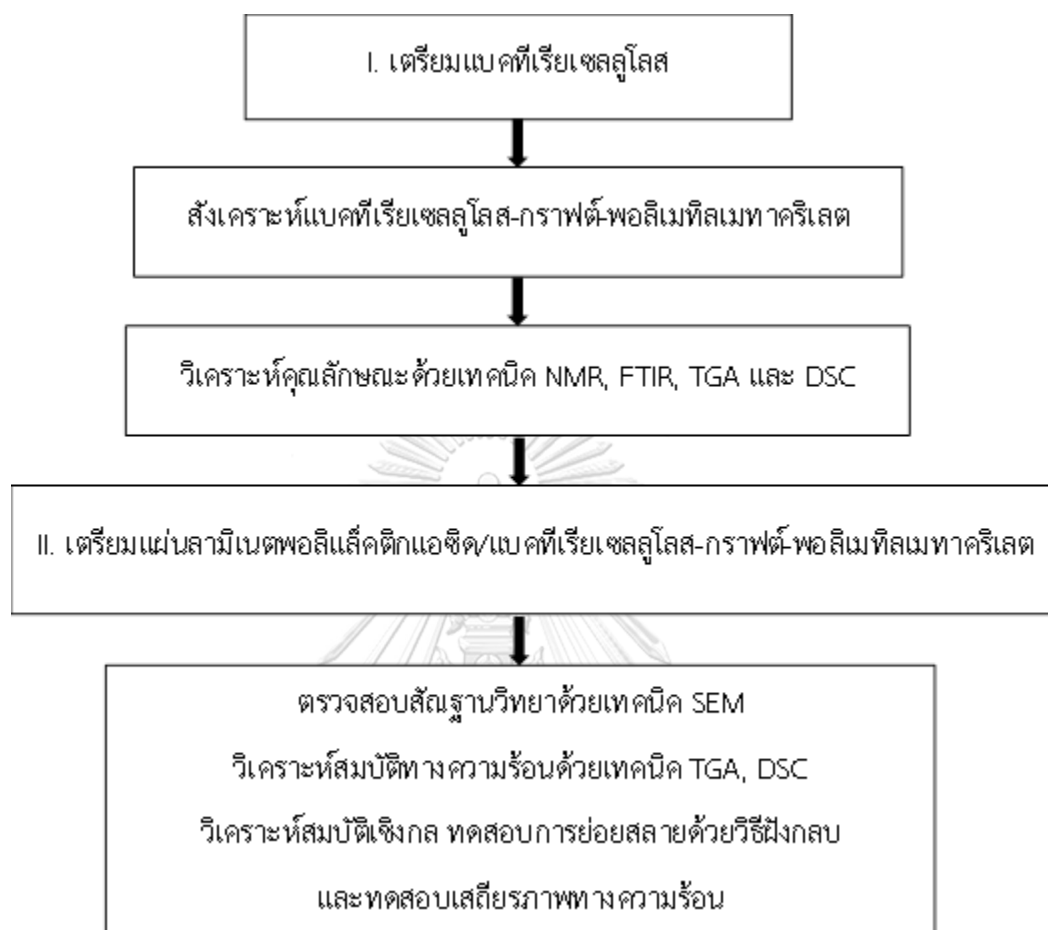
### 3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด/แบคทีเรีย เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

1. แผ่นใสถ่ายเอกสาร (แผ่นพอลิเอสเตอร์)
2. เครื่องซังดิจิทัลทศนิยมสองตำแหน่ง ของบริษัท AND (ประเทศญี่ปุ่น) รุ่น FZ-3000i
3. เครื่องอัดแบบ (compression molding machine) ของบริษัท Labtech Engineering (ประเทศไทย) รุ่น V508-18-CX

### 3.2.3 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

1. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) ของบริษัท Thermo Fisher Scientific (ประเทศสหรัฐอเมริกา) รุ่น Nicolet 6700-FT-IR
2. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analyzer, TGA) ของบริษัท Mettler Toledo (ประเทศสวิตเซอร์แลนด์) รุ่น TGA/SDTA 851e
3. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) ของบริษัท Mettler Toledo (ประเทศสวิตเซอร์แลนด์) รุ่น TGA/DSC 3+
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ของบริษัท JOEL (ประเทศญี่ปุ่น) รุ่น JSM-6480LV
6. เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (nuclear magnetic resonance Spectrometer, <sup>13</sup>C-NMR) ของบริษัท Bruker (ประเทศสหรัฐอเมริกา) รุ่น BRUKER AVANCE III HD/Ascend 400 WB
7. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine) ของบริษัท Tinius Olsen (ประเทศสหรัฐอเมริกา) รุ่น M250
8. กล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคป (optical microscope, OM) ของบริษัท Olympus (ประเทศญี่ปุ่น) รุ่น CX31

### 3.3 แผนผังขั้นตอนการทดลอง และการวิเคราะห์ทดสอบ



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์ทดสอบ

### 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.4.1 การเตรียมแบคทีเรียเซลลูโลส

นำแบคทีเรียเซลลูโลส (SCOBY bacterial cellulose) ที่เพาะเลี้ยงโดยใช้ kombucha SCOBY starter มาต้มล้างทำความสะอาดในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) และฟอกขาวโดยใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (sodium hypochlorite) เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนรวมถึงแบคทีเรียด้วย จากนั้นนำแบคทีเรียไฮโดรเจลที่ได้ไปอบให้แห้งก่อนนำไปสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยกระบวนการอิมัลชันพอลิเมอไรเซชันต่อไป

### 3.4.2 การสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยกระบวนการอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน

นำแบคทีเรียเซลลูโลส (BC) 2 กรัมผสมน้ำปริมาตร 600 มิลลิลิตร แล้วปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นที่ความเร็วรอบ 40,000 รอบต่อนาที จากนั้นนำไปให้ความร้อนจนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เติมสารละลายโพแทสเซียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต (potassium peroxodisulfate) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) พร้อมทั้งทำการกวนด้วยเครื่อง hotplate stirrer ตลอดเวลาเป็นเวลา 30 นาที แล้วค่อยๆ หยดเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ (MMA) ลงไป โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง BC:MMA ดังตารางที่ 3. ทำการกวนต่อเป็นเวลา 2 ชั่วโมงจนได้แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต (BC-g-PMMA) ในรูปอิมัลชัน จากนั้นทำการล้างด้วยอะซิโตนเพื่อกำจัดเมทิลเมทาคริเลตส่วนเกินออก กรองด้วยผ้าขาวบางแล้วนำสารที่ได้ไปปั่นเหวี่ยงเพื่อนำฟองออก นำตะกอนที่ได้ประมาณ 150 มิลลิลิตร ผสมน้ำ 100 มิลลิลิตร และกลีเซอรอลร้อยละ 20 เเทลงในภาดเทพลอนขนาด 8x8 นิ้ว แล้วอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อให้ได้แผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีความหนาประมาณ 0.10 ถึง 0.2 มิลลิเมตร ลักษณะดังรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนการกราฟต์ระหว่างแบคทีเรียเซลลูโลสและเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์

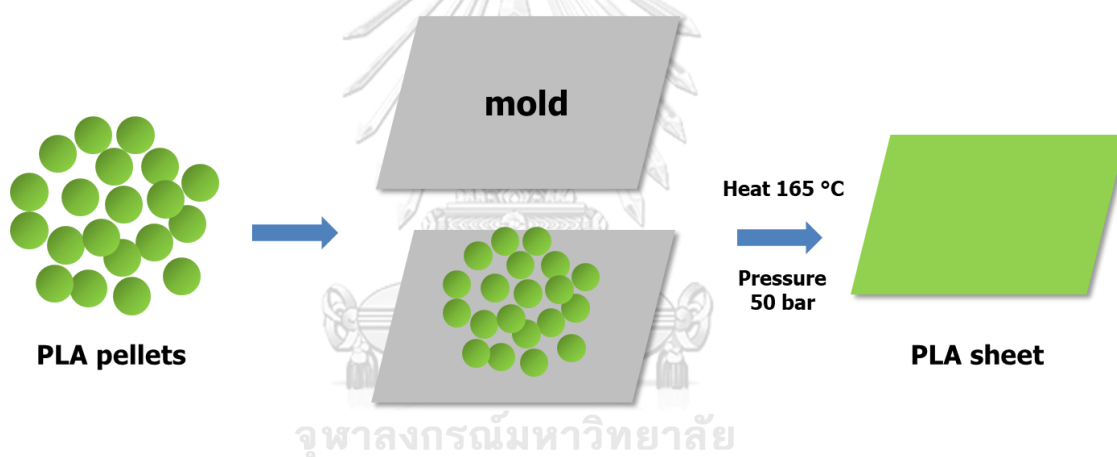
ตัวอย่าง	อัตราส่วนระหว่าง BC:MMA
BC1:1	1:1
BC1:5	1:5



รูปที่ 3.2 แผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

### 3.4.3 การเตรียมแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดกับแบคทีเรียเซลลูโลส

เตรียมแผ่นพอลิแล็คติกแอซิด โดยนำเม็ดพอลิแล็คติกแอซิดมาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักประมาณ 15 กรัม เทลงบนแผ่นแม่แบบ (mold) ดังรูปที่ 3.3 แล้วนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ (compression molding machine) ดังรูปที่ 3.4 หลังจากนั้นนำแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์ และแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส อัตราส่วนต่างๆ ที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.4.2 มาวางเรียงซ้อนกัน โดยชั้นแรก คือ แผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์ ชั้นที่สอง คือ แผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส และชั้นที่สาม คือ แผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์ จากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นลามิเนตด้วยเครื่องอัดแบบ โดยแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดสูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.3 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการอัดแบบ แสดงดังตารางที่ 3.4 หลังจากนั้นนำแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดที่ได้ไปตัดเป็นชิ้นงานทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นพอลิแล็คติกแอซิด

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดสูตรต่างๆ

ตัวอย่าง	องค์ประกอบ
Laminate 1	PLA/BC/PLA
Laminate 2	PLA/BC1:1/PLA
Laminate 3	PLA/BC1:5/PLA



รูปที่ 3.4 เครื่องอัดแบบ

ตารางที่ 3.4 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการอัดแบบ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (bar)	เวลาที่ใช้ในการอัดแบบ (วินาที)			
			Pre-Heating	Pressing	Venting	Cooling
PLA	165	50	90	60	8	120
Laminate 1	95	50	50	50	-	60
Laminate 2	95	50	50	50	-	60
Laminate 3	95	50	50	50	-	60

### 3.5 การวิเคราะห์ทดสอบ

#### 3.5.1 การสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

##### 3.5.1.1 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

ตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวาง (cross section) ของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ดังรูปที่ 3.5 โดยนำตัวอย่างที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วมาแช่ในไตรเจนเหลวและทำการหักเพื่อส่องดูลักษณะพื้นผิวที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

##### 3.5.1.2 การหาปริมาณการกราฟต์ (grafting yield)

หาปริมาณร้อยละการกราฟต์ของแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต โดยนำแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตในรูปอิมัลชันที่ได้จากการสังเคราะห์ มาล้างด้วยอะซิโตนเพื่อกำจัดเมทิลเมทาคริเลตส่วนเกินออก จากนั้นกรองเพื่อแยกส่วนแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตออก แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณหาปริมาณร้อยละการกราฟต์ (% grafting yield, %G) และประสิทธิภาพการกราฟต์ (% grafting efficiency, %GE) ตามสมการ 3.1 และ สมการ 3.2

$$\%G = \frac{\text{final BC weight} - \text{initial BC weight}}{\text{initial BC weight}} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\%GE = \frac{\text{final BC weight} - \text{initial BC weight}}{\text{total weight after reaction} - \text{initial BC weight}} \times 100 \quad (3.2)$$

### 3.5.1.3 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) ดังรูปที่ 3.6 โดยนำตัวอย่างไปอบให้แห้งก่อนนำมาทดสอบด้วยโหมด ATR (attenuated total reflection) ในช่วงความยาวคลื่น  $400-4000 \text{ cm}^{-1}$  และจำนวนสแกนเท่ากับ 64 รอบ



รูปที่ 3.6 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

### 3.5.1.4 การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

วิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analyzer, TGA) ดังรูปที่ 3.7 เพื่อทดสอบหาอุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature,  $T_d$ ) และปริมาณเถ้าที่เหลืออยู่ (%residual) ของสารตัวอย่าง โดยนำตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 3 ถึง 9 มิลลิกรัม ใส่ลงในภาชนะที่ทำจากอะลูมินา และทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50 ถึง 600 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน (heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล (gas flow rate) 40 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน

### 3.5.1.5 การวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชันด้วยเทคนิค DSC

วิเคราะห์หาอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature,  $T_g$ ) ของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) ดังรูปที่ 3.8 โดยเตรียมตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 3 ถึง 9 มิลลิกรัม นำไปทดสอบให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 5 ถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน (heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ทดสอบภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน



รูปที่ 3.8 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์



### 3.5.1.6 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค $^{13}\text{C}$ -NMR

ศึกษาโครงสร้างทางเคมีของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโคปี โดยสารตัวอย่างจะถูกตัดเป็นชิ้นขนาดเล็กและนำไปทดสอบด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (nuclear magnetic resonance spectrometer, NMR) ดังรูปที่ 3.9 ในสถานะของแข็ง ที่ความถี่ 400 MHz



รูปที่ 3.9 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์

### 3.5.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด

ตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวาง (cross section) ของชิ้นงานทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ดังรูปที่ 3.5 โดยนำชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วมาแช่ไนโตรเจนเหลวและทำการหักเพื่อส่องดูลักษณะพื้นผิวที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

### 3.5.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด

#### 3.5.3.1 เสถียรภาพทางความร้อน

วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด/แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analyzer, TGA) ดังรูปที่ 3.7 โดยวิเคราะห์จากอุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นงานตัวอย่าง ภาวะที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังข้อที่ 3.5.1.4

#### 3.5.3.2 พฤติกรรมทางความร้อน

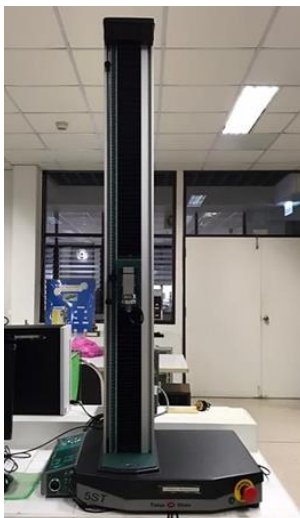
วิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนจากการหาอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature,  $T_g$ ) อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization temperature,  $T_{cc}$ ) และอุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature,  $T_m$ ) ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) ดังรูปที่ 3.8 ทำการทดสอบชิ้นงานตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 7 ถึง 9 มิลลิกรัม โดยแบ่งการทดสอบเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นที่ 1 ให้ความร้อนเริ่มต้นจาก 5 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส ขั้นที่ 2 ลดอุณหภูมิจาก 200 องศาเซลเซียส จนถึง 5 องศาเซลเซียส และขั้นที่ 3 ให้ความร้อนจาก 5 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนและอัตราการเย็นตัวที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

### 3.5.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด

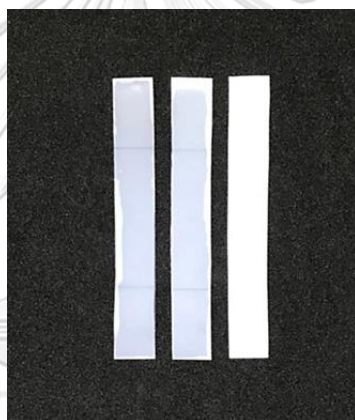
#### 3.5.4.1 ความทนแรงดึง

ทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine) ดังรูปที่ 3.10 โดยทำการทดสอบชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D882 เพื่อหาค่าความทนแรงดึง (tensile strength) การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) และยังส์มอดุลัส (young's modulus) ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.11 โดยมีเงื่อนไขในการทดสอบ ดังนี้

ขนาดโหลดเซลล์ (load cell)	5 กิโลนิวตัน
อัตราความเร็วในการดึงคองที่ (test speed)	10 มิลลิเมตรต่อนาที
ระยะดึง (gauge length)	50 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล



รูปที่ 3.11 ชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกล

#### 3.5.4.2 ความต้านทานแรงดัดโค้ง

ทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งของชิ้นงานด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine) ดังรูปที่ 3.10 โดยเตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 ลักษณะดังรูปที่ 3.11 เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดัดโค้ง (flexural strength) และค่ามอดุลัสแรงดัดโค้ง (flexural modulus) โดยเงื่อนไขในการทดสอบ ดังนี้

ขนาดโหลดเซลล์ (load cell)	5 กิโลนิวตัน
ระยะห่างของแท่นรองรับ (support span length)	60 มิลลิเมตร
ความเร็วในการทดสอบ (crosshead speed)	5 มิลลิเมตรต่อนาที

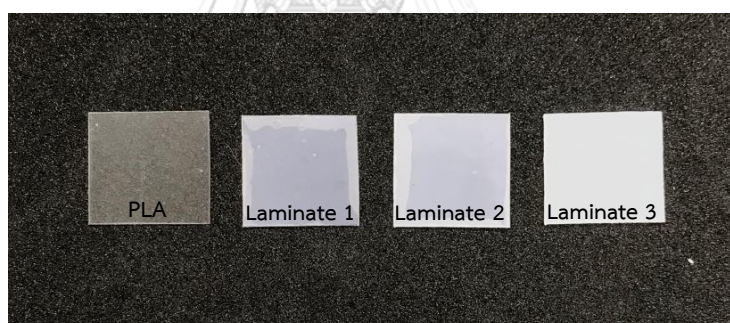
### 3.5.5 การทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีฝึงกลบของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด

นำแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดที่เตรียมได้จากการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน ตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 1.5 x 1.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.12 ทำการทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีการฝึงกลบ โดยควบคุมภาวะในการทดลอง ดังนี้ ฝึงดินลึกจากผิวดินประมาณ 10 เซนติเมตร ค่าความเป็นกรด-เบสของดินจะอยู่ที่ประมาณ 5 ถึง 6 รดน้ำสัปดาห์ละ 1 ครั้ง จากนั้นชิ้นงานทดสอบจะถูกนำขึ้นมาวิเคราะห์เมื่อครบ 30 60 และ 90 วัน ตามลำดับ หลังผ่านการฝึงกลบ เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของชิ้นงานและคำนวณหาร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (weight loss percentage) ดังสมการ 3.3

$$\%weight\ loss = \frac{W_0 - W_n}{W_0} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ  $W_n$  คือ น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ในหน่วยกรัม

$W_0$  คือ น้ำหนักเริ่มต้น ในหน่วยกรัม



รูปที่ 3.12 ชิ้นงานทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีฝึงกลบ

### 3.5.6 ทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด

นำแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดที่เตรียมได้จากการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน ตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 1.5 x 1.5 เซนติเมตร ทำการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนโดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 130 องศา เป็นเวลา 20 นาที เพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อได้รับความร้อนของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด

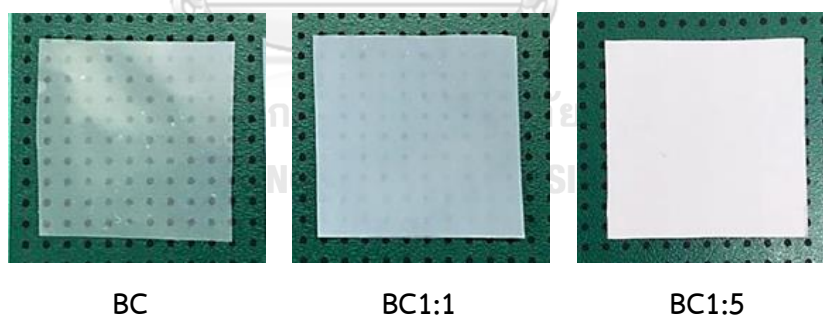
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การสังเคราะห์แบบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยกระบวนการอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน

##### 4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นแบบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

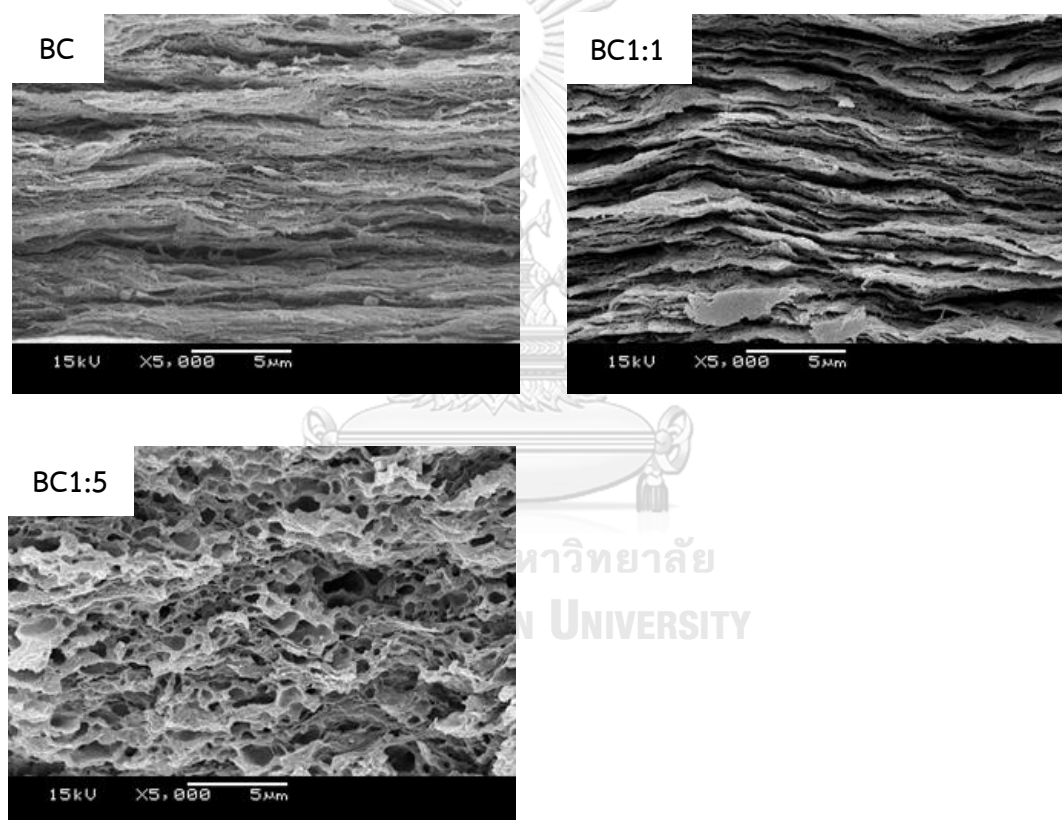
จากการสังเคราะห์แบบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยกระบวนการอิมัลชันพอลิเมอไรเซชันจนได้แบบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตในรูปอิมัลชัน จากนั้นทำการล้างด้วยอะซิโตนเพื่อกำจัดเมทิลเมทาคริเลตส่วนเกินออก นำไปผสมน้ำและกลีเซอรอลแล้วหล่อแบบในถาด อบให้แห้งจะได้แผ่นแบบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต (BC-g-PMMA) ที่มีลักษณะดังรูปที่ 4.1 ซึ่งพบว่าลักษณะของแผ่นแบบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์ (BC) จะมีสีขาวโปร่งใสและเหนียว ในขณะที่ BC1:1 มีลักษณะเป็นสีขาวที่มีความขุ่นมากขึ้นเมื่อเทียบกับ BC และมีความเหนียวลดลงเล็กน้อย ส่วน BC1:5 จะมีสีขาวขุ่นลักษณะคล้ายกระดาษที่มีความทึบแสงมากกว่า BC และ BC1:1 ทั้งนี้การเพิ่มอัตราส่วนของ BC : MMA มากขึ้นมีผลต่อความโปร่งแสงที่ลดลง



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นแบบคทีเรียเซลลูโลสและแบบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนต่างๆ

#### 4.1.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

จากการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวาง (cross section) ของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสและแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตอัตราส่วนต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์มีลักษณะการเรียงตัวเป็นชั้นเรียงชิดกัน ในขณะที่ BC1:1 การเรียงตัวเป็นชั้นลดลง มีพื้นที่ระหว่างชั้นเพิ่มมากขึ้น และ BC1:5 มีลักษณะเป็นรูพรุนกระจายอยู่โดยทั่ว ดังนั้นการเพิ่มอัตราส่วนระหว่าง BC : MMA มากขึ้นส่งผลให้สารตัวอย่างมีลักษณะเป็นรูพรุนมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตในรูปที่ 4.1



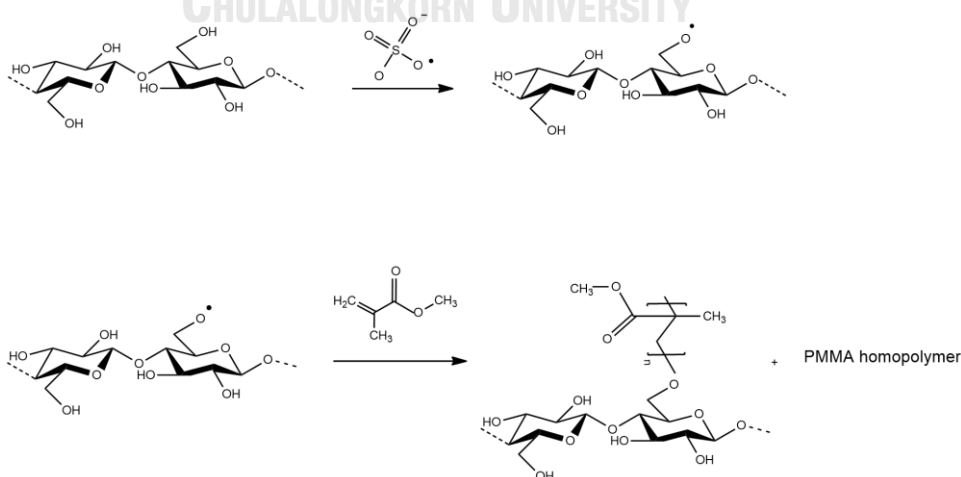
รูปที่ 4.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสและแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

### 4.1.3 การหาปริมาณการกราฟต์ (grafting yield)

คำนวณหาปริมาณการกราฟต์ของแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง BC:MMA ที่ 1:1 และ 1:5 ต่อการกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลต ลงบนแบคทีเรียเซลลูโลส โดยจากการคำนวณปริมาณการกราฟต์ (grafting yield) ของแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน โดยมีโพแทสเซียมเปอร์ออกไซด์ไฮดรอกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) พบว่า BC1:1 มีปริมาณแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ร้อยละ 10.5 และ BC1:5 มีปริมาณแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ร้อยละ 274.5 นอกจากนี้จากการคำนวณหาประสิทธิภาพการกราฟต์ (grafting efficiency) พบว่า BC1:1 มีประสิทธิภาพการกราฟต์อยู่ที่ร้อยละ 9.1 ในขณะที่ BC1:5 มีประสิทธิภาพการกราฟต์อยู่ที่ร้อยละ 47.3 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนการกราฟต์ระหว่าง BC:MMA มากขึ้นมีผลทำให้ปริมาณแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่สังเคราะห์ได้เพิ่มมากขึ้น

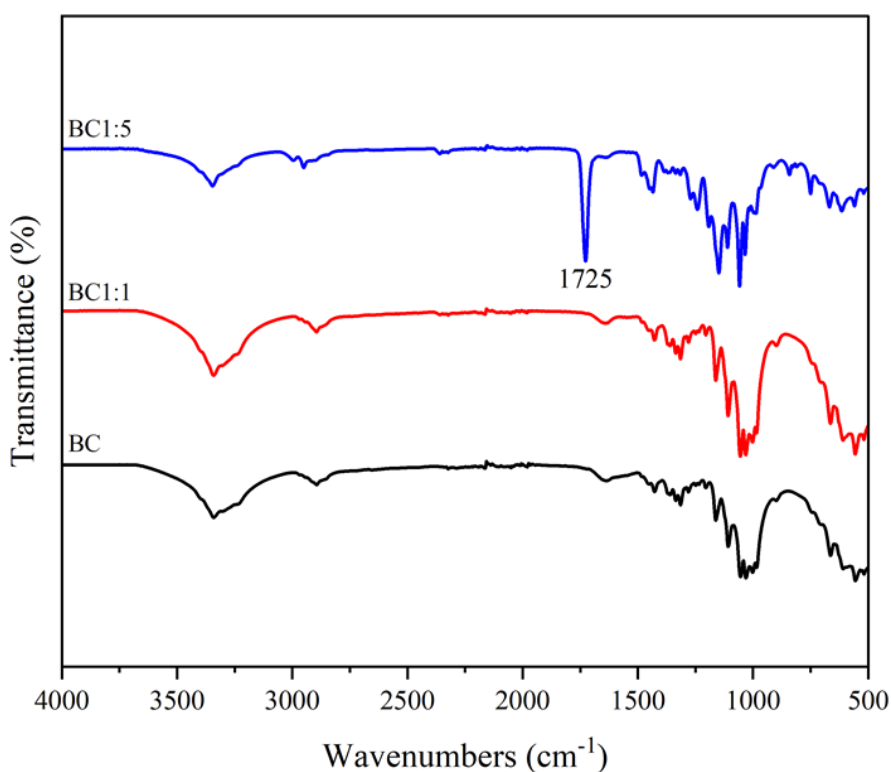
### 4.1.4 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

นำแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน โดยมีโพแทสเซียมเปอร์ออกไซด์ไฮดรอกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา มาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ซึ่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตแสดงไว้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

หมู่ฟังก์ชันของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์ (BC) และแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนระหว่าง BC:MMA ที่ 1:1 (BC1:1) และ 1:5 (BC1:5) จะถูกวิเคราะห์ ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 400 ถึง 4000  $\text{cm}^{-1}$  เพื่อศึกษาผลของการกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตลงบนแบคทีเรียเซลลูโลส โดย FTIR สเปกตรัมของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตอัตราส่วนต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 FTIR สเปกตรัมของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

จาก FTIR สเปกตรัมในรูปที่ 4.4 พบว่าสเปกตรัมของ BC ปรากฏพีกเอกลักษณ์ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3400 และ 2900  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ในการสั่นแบบยืดหดของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH stretching) และของหมู่เมทิล (C-H stretching) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 1100  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการยืดหดแบบไม่สมมาตรของพันธะไกลโคไซด์ (asymmetrical C-O-C) และที่ตำแหน่ง 1620  $\text{cm}^{-1}$  แสดงพีกเอกลักษณ์ของการดูดซึมน้ำหรือความชื้นในโครงสร้างของเซลลูโลส (-OH of absorbed water) [30] โดยจากสเปกตรัมของ BC1:5

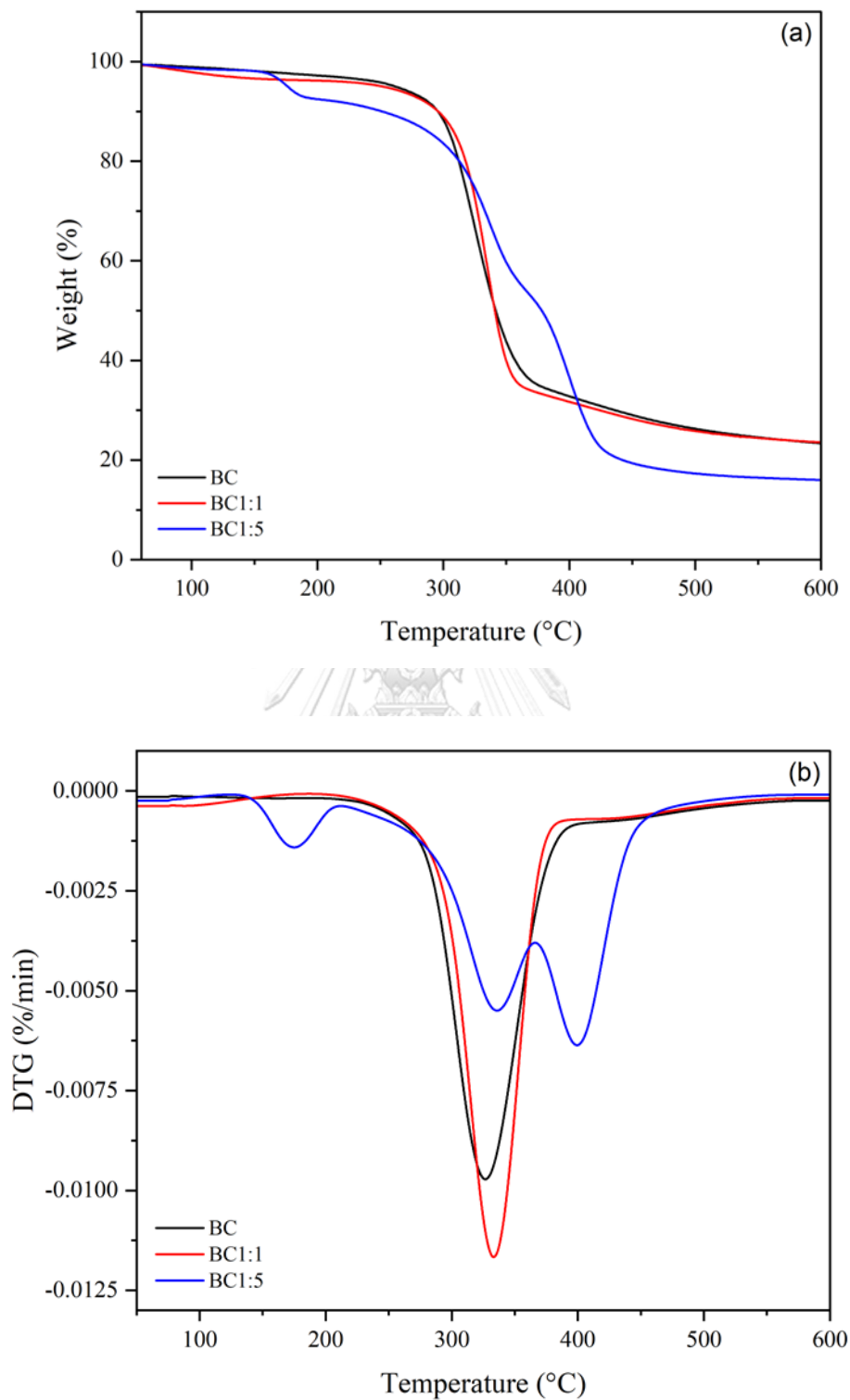


พบว่าในช่วง  $3300$  ถึง  $3600\text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงการสั่นแบบยืดหดของหมู่ไฮดรอกซิลมีปริมาณสัดส่วนที่ลดลงเมื่อเทียบกับสัดส่วนของพิก C-O-C และยังพบพิกใหม่ปรากฏขึ้นที่ตำแหน่ง  $1725\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่คาร์บอนิล (C=O) ซึ่งคาดว่าเป็นส่วนของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ถูกกราฟต์ลงบนแบคทีเรียเซลลูโลส [31] ในขณะที่สเปกตรัมของ BC1:1 ไม่ปรากฏพิกในช่วงการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่คาร์บอนิล ทั้งนี้เนื่องจากอัตราส่วนของการกราฟต์อาจมีปริมาณที่น้อยเกินไป เมื่อเทียบกับ BC1:5

#### 4.1.5 การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

วิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเทคนิค TGA โดยวิเคราะห์หาอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น ( $T_{\text{onset}}$ ) และอุณหภูมิการสลายตัวสุดท้าย ( $T_{\text{endset}}$ ) ของแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตเปรียบเทียบกับแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์ จากนั้นทำกราฟอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (derivative thermogram analysis, DTG) หาอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด ( $T_{\text{max}}$ ) เพื่อวิเคราะห์ร้อยละการกราฟต์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตลงบนแบคทีเรียเซลลูโลส

จาก TGA เทอร์โมแกรมดังรูปที่ 4.5 ซึ่งสรุปรายละเอียดไว้ในตารางที่ 4.1 พบว่า BC และ BC1:1 มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนเป็นแบบขั้นตอนเดียว โดยมีการสลายตัวทางความร้อนอยู่ในช่วง 282 ถึง 397 และ 294 ถึง 372 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีการสูญเสียน้ำหนักประมาณร้อยละ 74 ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองทำภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนจึงไม่เกิดการสลายตัวของแบคทีเรียเซลลูโลสที่สมบูรณ์ ในขณะที่ BC1:5 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวแบบสามขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกการสลายตัวของ BC1:5 จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 145 ถึง 204 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจเกิดจากการสลายตัวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตส่วนปลายสายโซ่ที่ไม่แข็งแรงหรืออาจเกิดจากการสลายตัวของไฮโปพอลิเมอร์ที่หลงเหลืออยู่ ขั้นตอนการสลายตัวขั้นที่สองเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 298 ถึง 365 เกิดจากการสลายตัวของแบคทีเรียเซลลูโลส และขั้นตอนการสลายตัวขั้นที่สามอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 373 ถึง 438 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่กราฟต์กับแบคทีเรียเซลลูโลส ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า BC1:5 มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการสลายตัวเมื่อเทียบกับ BC และ BC1:1 อีกทั้งยังมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่สูงขึ้นอาจเป็นผลมาจากการกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตลงบนแบคทีเรียเซลลูโลสได้สำเร็จ [32, 33]



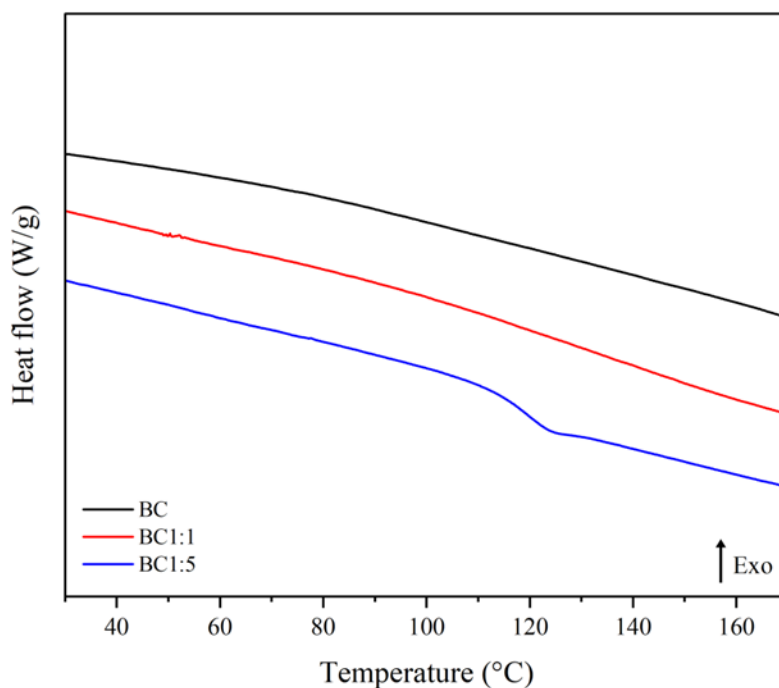
รูปที่ 4.5 เทอร์โมแกรม : (a) TGA และ (b) DTG ของแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธีและแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนต่างๆ

**ตารางที่ 4.1** อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนต่างๆ

sample	The first			The second			The third		
	degradation step (°C)			degradation step (°C)			degradation step (°C)		
	T <sub>onset</sub>	T <sub>max</sub>	T <sub>endset</sub>	T <sub>onset</sub>	T <sub>max</sub>	T <sub>endset</sub>	T <sub>onset</sub>	T <sub>max</sub>	T <sub>endset</sub>
BC	282	329	397	-	-	-	-	-	-
BC1:1	294	335	372	-	-	-	-	-	-
BC1:5	145	175	204	298	335	365	373	404	438

#### 4.1.6 การวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชันด้วยเทคนิค DSC

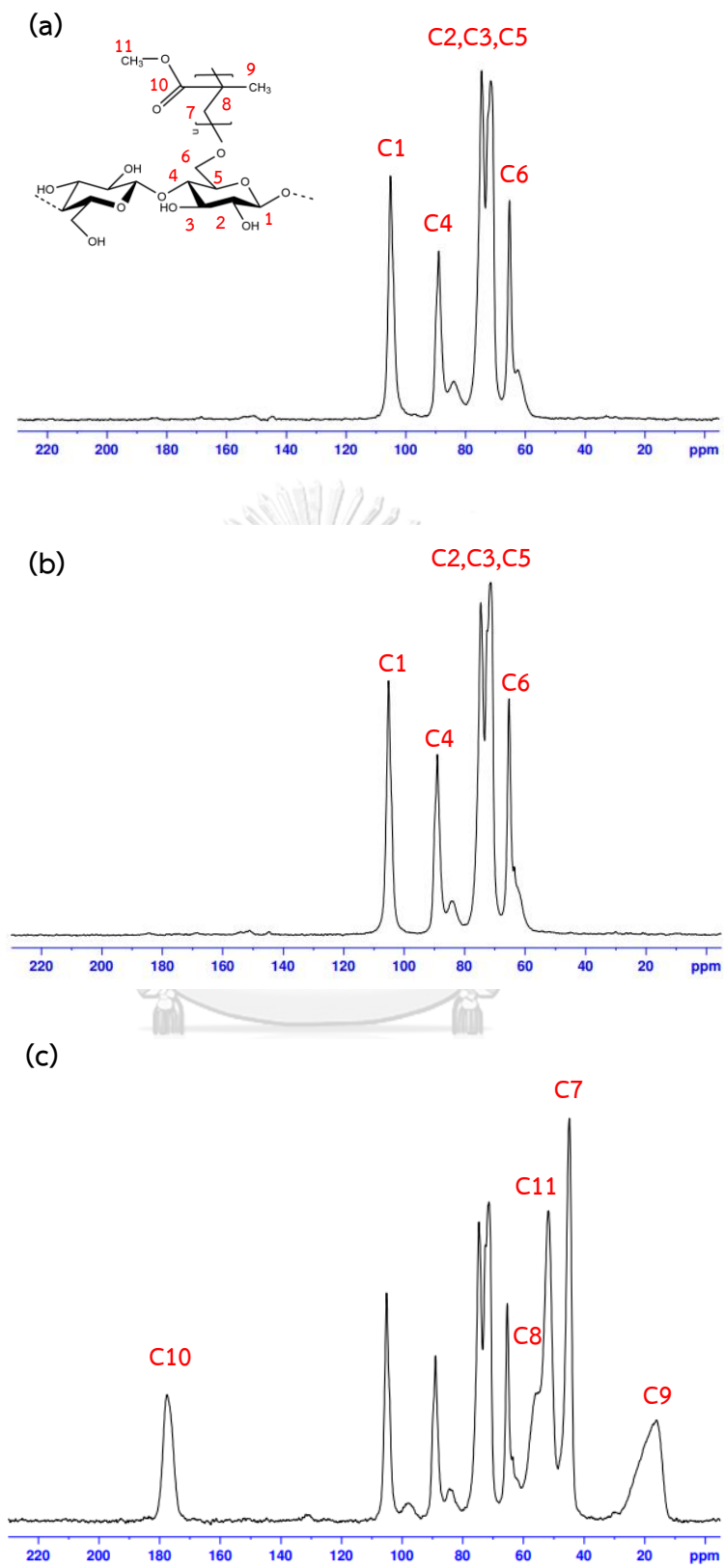
วิเคราะห์หาอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature,  $T_g$ ) ด้วยเทคนิค DSC เพื่อศึกษาผลของการกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตลงบนแบคทีเรียเซลลูโลส โดยจาก DSC เทอร์โมแกรมในรูปที่ 4.6 พบว่า BC และ BC1:1 ไม่พบอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของ BC มีพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลและมีความเป็นผลึกสูง ทำให้ตรวจไม่พบอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน [34] ในขณะที่ BC1:5 ตรวจพบอุณหภูมิกลาสทรานซิชันอยู่ที่ประมาณ 117 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิเมทิลเมทาคริเลต [35] โดยผลการทดสอบนี้ยืนยันได้ว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลตถูกกราฟต์ลงบนแบคทีเรียเซลลูโลส ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ของเทคนิค TGA



รูปที่ 4.6 DSC เทอร์โมแกรมของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์และแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่อัตราส่วนต่างๆ

#### 4.1.7 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค $^{13}\text{C}$ -NMR

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโคปี ( $^{13}\text{C}$ -NMR) โดยวิเคราะห์สารตัวอย่างในสถานะของแข็งที่ความถี่ 400 MHz พบว่า  $^{13}\text{C}$ -NMR สเปกตรัม ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ของแบคทีเรียเซลลูโลสปริสุทธิ์ จะพบสัญญาณที่ตำแหน่ง 105.1, 74.5, 71.6, 88.9 และ 65.3 ppm ตามลำดับ ซึ่งเป็นสัญญาณของคาร์บอนอะตอมในวงแหวนกลูโคสของแบคทีเรียเซลลูโลสที่ C1, C2, C3, C4, C5 และ C6 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า  $^{13}\text{C}$ -NMR สเปกตรัมของ BC1:1 แสดงสัญญาณในลักษณะเดียวกับแบคทีเรียเซลลูโลสปริสุทธิ์ ในขณะที่ BC1:5 มีสัญญาณของคาร์บอนอะตอมปรากฏในตำแหน่งใหม่ที่ 177.5, 15.9 และในช่วง 44.7-55.7 ppm ซึ่งเป็นช่วงค่าเคมีคัลชิฟท์ของคาร์บอนิลและคาร์บอนอะตอมอื่นๆ ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต [36] ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าการกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตลงบนแบคทีเรียเซลลูโลสในอัตราส่วน BC:MMA ที่ 1:5 ซึ่งสอดคล้องกับผล FTIR TGA และ DSC



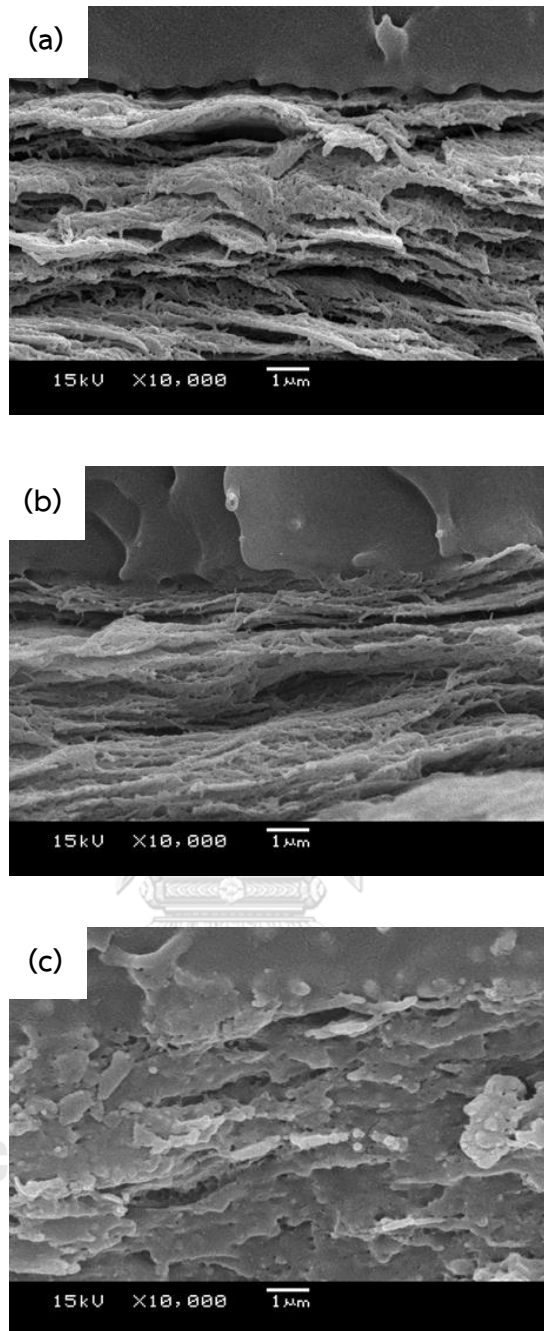
รูปที่ 4.7  $^{13}\text{C}$ -NMR สเปกตรัมของ : (a) BC (b) BC1:1 และ (c) BC1:5

**ตารางที่ 4.2** ตำแหน่งคาร์บอนอะตอมและค่าเคมีคัลชิฟท์ของแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลสและ  
แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

Carbon atom	Chemical shift (ppm)
C1	105.1
C2, C3, C5	71.6 - 74.5
C4	88.9
C6	65.3
C7	44.8
C8	55.7
C9	15.9
C10 (C=O)	177.5
C11	51.7

#### 4.2 ลักษณะพื้นฐานวิทยาของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด

จากการนำแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตมาทำการลามิเนตกับแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์แล้วอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ (compression molding machine) แผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดสูตรต่างๆ ที่เตรียมได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า เพื่อศึกษาการยึดเกาะกันระหว่างเฟสของพอลิแล็คติกแอซิดและแบคทีเรียเซลลูโลส จากลักษณะพื้นฐานวิทยาดังรูปที่ 4.8 พบว่าเฟสพอลิแล็คติกแอซิดและแบคทีเรียเซลลูโลสของ Laminate 3 มีความใกล้ชิดกันและไม่มีช่องว่างหรือรูระหว่างสองเฟส เมื่อเทียบกับ Laminate 1 และ Laminate 2 จะมีช่องว่างระหว่างเฟสของพอลิแล็คติกแอซิดและแบคทีเรียเซลลูโลสที่มากกว่า ซึ่งบ่งชี้ว่าแผ่นลามิเนตระหว่างพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตสูตร BC1:5 มีการยึดเกาะที่ดีกว่า ทั้งนี้การยึดเกาะระหว่างเฟสที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากการกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตลงบนแบคทีเรียเซลลูโลส



รูปที่ 4.8 ลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นลามิเนตพอลิเอทิลีนทเรท  
: (a) Laminate 1 (b) Laminate 2 และ (c) Laminate 3

### 4.3 สมบัติทางความร้อนของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด

#### 4.3.1 เสถียรภาพทางความร้อน

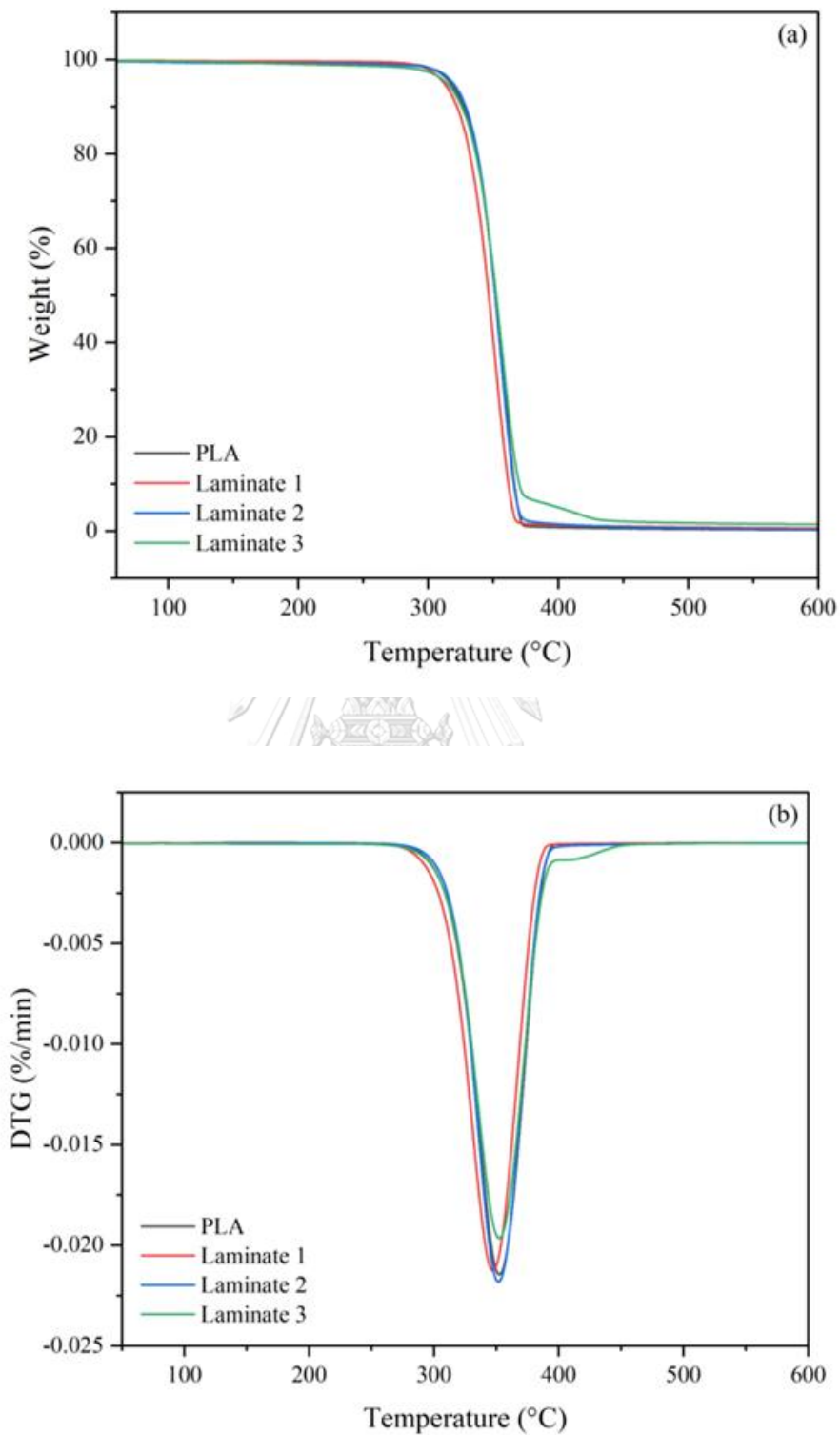
ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดด้วยเทคนิค TGA โดยวิเคราะห์หาอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น ( $T_{\text{onset}}$ ) และอุณหภูมิการสลายตัวสุดท้าย ( $T_{\text{endset}}$ ) จากนั้นทำการกราฟอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (derivative thermogram analysis, DTG) เพื่อหาอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด ( $T_{\text{max}}$ ) ของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดเทียบกับแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์

จากรูปที่ 4.9 อุณหภูมิการสลายตัวเริ่มต้น อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด และอุณหภูมิการสลายตัวสุดท้ายสรุปไว้ในตารางที่ 4.3 พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของ Laminate 1 อยู่ในช่วง 310 ถึง 384 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์ที่มีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 314 ถึง 387 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการยึดเกาะกันที่ไม่ดีระหว่างเฟสพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์ที่มีความไม่ชอบน้ำ และแบคทีเรียเซลลูโลสที่มีสมบัติชอบน้ำ ในขณะที่ Laminate 2 และ Laminate 3 มีอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ในช่วง 317 ถึง 388 องศาเซลเซียส และ 316 ถึง 390 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าพอลิแล็คติกแอซิดเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามเสถียรภาพทางความร้อนที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเป็นผลมาจากการยึดเกาะที่ดีขึ้นระหว่างเฟสของพอลิแล็คติกแอซิดและแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดสูตรต่างๆ

Sample	$T_{\text{onset}}$ (°C)	$T_{\text{max}}$ (°C)	$T_{\text{endset}}$ (°C)
PLA	314	353	387
Laminate 1	310	349	384
Laminate 2	317	354	388
Laminate 3	316	354	390

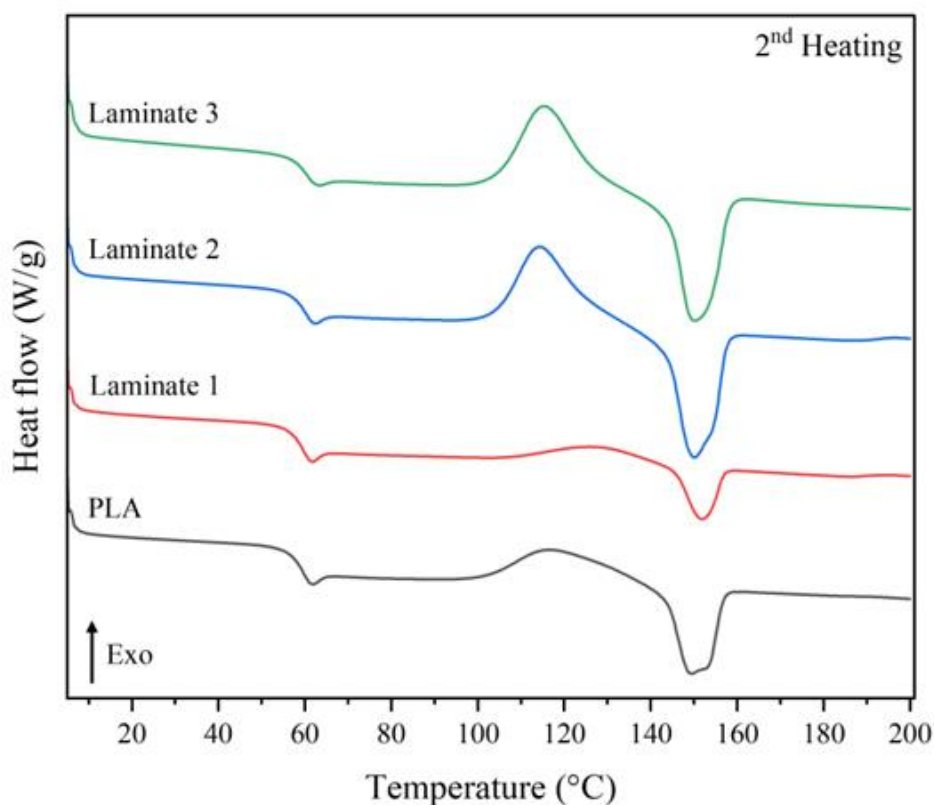




รูปที่ 4.9 เทอร์โมแกรม : (a) TGA และ (b) DTG ของแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด

### 4.3.2 พฤติกรรมทางความร้อน

ศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดด้วยเทคนิค DSC โดยวิเคราะห์หาอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น ( $T_{cc}$ ) และอุณหภูมิการหลอมเหลว ( $T_m$ ) ของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดเทียบกับแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์ ซึ่งจาก DSC เทอร์โมแกรมดังรูปที่ 4.10 พบว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดทั้งหมดมีค่าที่ใกล้เคียงกันที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส บ่งชี้ว่าพอลิแล็คติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยแบคทีเรียเซลลูโลส ไม่ส่งผลต่อค่า  $T_g$  ของเมทริกซ์พอลิแล็คติกแอซิด นอกจากนี้ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดทั้งหมดไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น และอุณหภูมิการหลอมเหลวเมื่อเทียบกับพอลิแล็คติกแอซิดอย่างมีนัยสำคัญโดยจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 116 และ 154 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของแผ่นพอลิแล็คแอซิดบริสุทธิ์ และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด

#### 4.4 สมบัติเชิงกลของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด

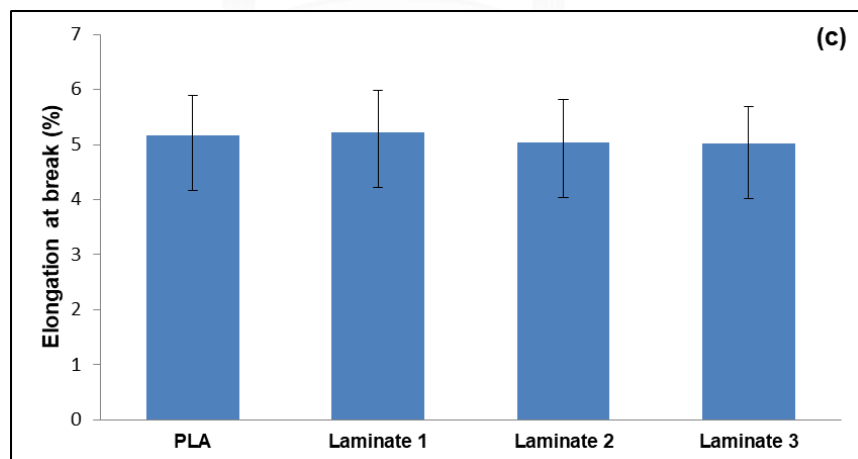
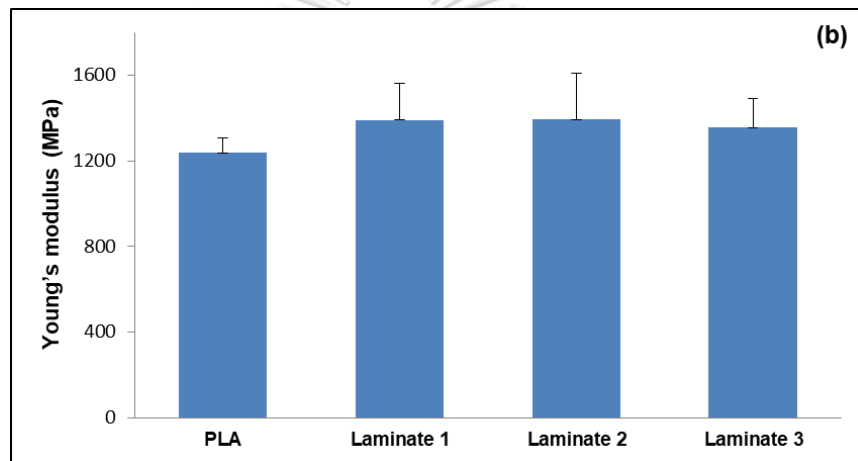
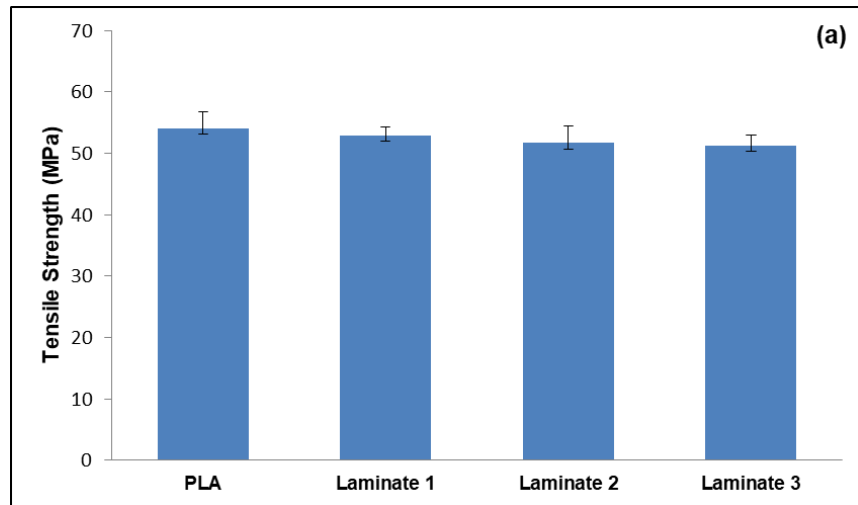
##### 4.4.1 ความทนแรงดึง

การทดสอบสมบัติความทนแรงดึงเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของพอลิเมอร์ รวมถึงความสามารถในการรับแรงดึง ความเปราะ ความเหนียว และอาจบอกถึงความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ ซึ่งสามารถนำไปทำนายการนำไปใช้งานได้

จากการทดสอบความทนแรงดึงของแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด เพื่อหาค่าความทนแรงดึง ยังสัมมอดูลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.4 พบว่าค่ายังสัมมอดูลัสของ Laminate 1 Laminate 2 และ Laminate 3 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์ โดยเพิ่มขึ้นจาก 1238 เป็น 1397, 1395 และ 1356 MPa ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของค่ายังสัมมอดูลัสนี้เป็นผลมาจากการเสริมแรงด้วยแบคทีเรียเซลลูโลสที่มีค่ายังสัมมอดูลัสสูงทำให้มีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น [40] อย่างไรก็ตามไม่พบการปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยแบคทีเรียเซลลูโลส โดยแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดที่เสริมแรงด้วยแบคทีเรียเซลลูโลสทั้งหมดมีค่าความทนแรงดึงใกล้เคียงกันที่ประมาณ 52 MPa และมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดอยู่ที่ประมาณร้อยละ 5 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณของแบคทีเรียเซลลูโลสที่ใช้ลามิเนตกับพอลิแล็คติกแอซิดมีปริมาณที่ค่อนข้างน้อยจึงส่งผลให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติความทนแรงดึงมากนัก

ตารางที่ 4.4 ความทนแรงดึง ยังสัมมอดูลัส และการยืดตัว ณ จุดขาดของแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด

Sample	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)
PLA	54.10 ± 2.64	1237.92 ± 70.77	5.16 ± 0.73
Laminate 1	52.93 ± 1.35	1391.80 ± 169.43	5.22 ± 0.76
Laminate 2	51.67 ± 2.84	1394.66 ± 212.48	5.03 ± 0.78
Laminate 3	51.25 ± 1.66	1356.66 ± 135.42	5.01 ± 0.68



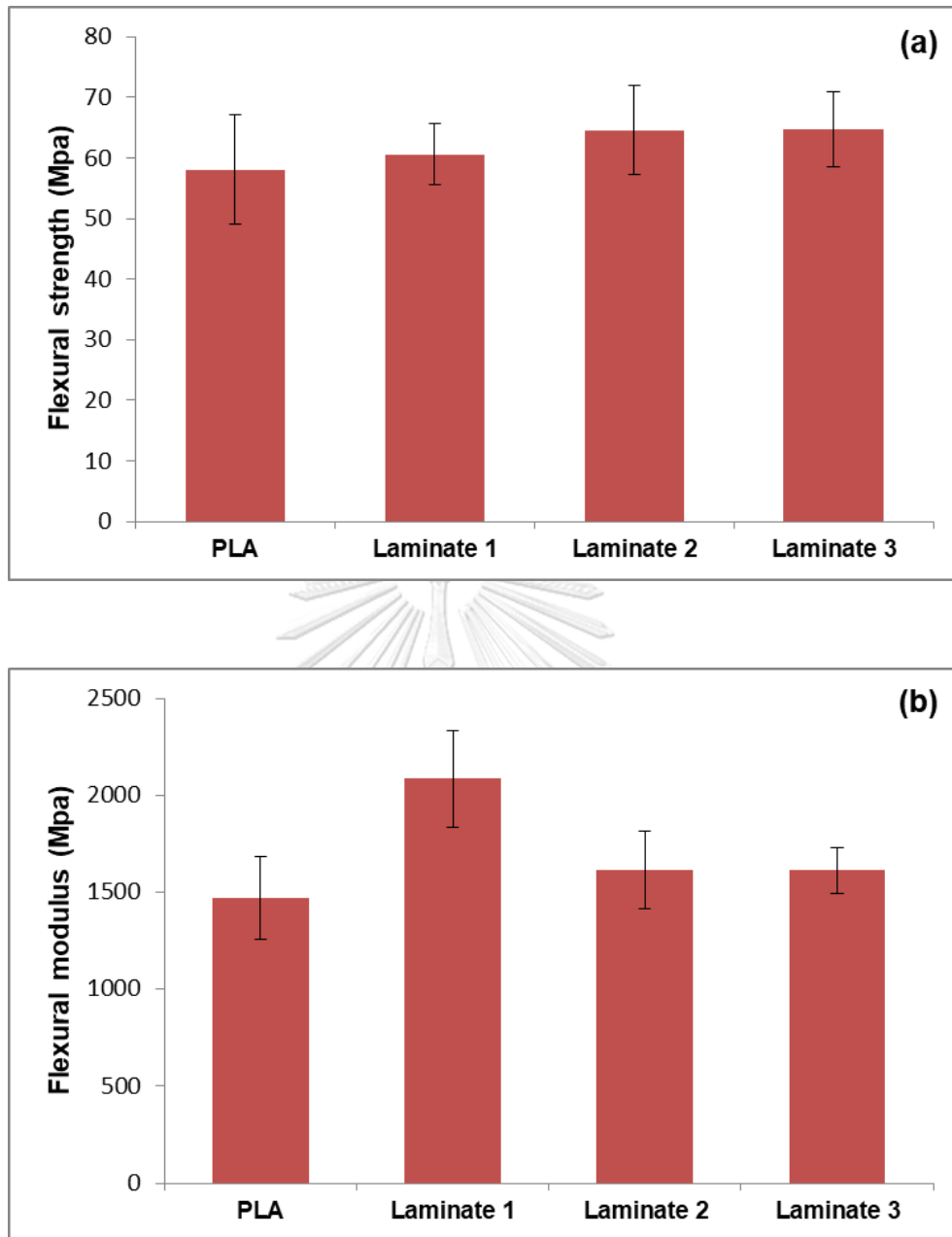
รูปที่ 4.11 สมบัติเชิงกลของแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด : (a) ค่าความทนแรงดึง (b) ยั่งส์มอดุลัส และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด

#### 4.4.2 ความต้านทานแรงดัดโค้ง

การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดัดโค้ง เพื่อศึกษาความสามารถในการดัดขึ้นรูปของวัสดุ โดยจากการทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้งของแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด ค่าความต้านทานแรงดัดโค้ง และค่ายังส์มอดุลัสดัดโค้งที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.12 พบว่า Laminate 1 Laminate 2 และ Laminate 3 มีค่าความต้านทานแรงดัดโค้งมากกว่าพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์ และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของการกราฟต์เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ค่ายังส์มอดุลัสดัดโค้งของ Laminate 1 Laminate 2 และ Laminate 3 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์ แต่อย่างไรก็ตามค่ายังส์มอดุลัสดัดโค้งมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของการกราฟต์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเสริมแรงด้วยแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตทำให้ชิ้นงานมีการยึดเกาะที่ดีขึ้นจึงมีค่ามอดุลัสดัดโค้งลดลง

**ตารางที่ 4.5** ความต้านทานแรงดัดโค้งและยังส์มอดุลัสดัดโค้งของพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด

Sample	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)
PLA	58.0 ± 9.0	1,470.2 ± 211.9
Laminate 1	60.0 ± 5.8	2,085.1 ± 247.4
Laminate 2	64.5 ± 7.4	1,615.1 ± 197.0
Laminate 3	64.8 ± 6.2	1,612.0 ± 119.1



รูปที่ 4.12 สมบัติความต้านทานแรงดัดโค้งของพอลิแล็คติกบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด : (a) ความต้านทานแรงดัดโค้งและ (b) ยังสัมมอดุลัสดัดโค้ง

#### 4.5 สมบัติการย่อยสลายด้วยวิธีฝังกลบของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด


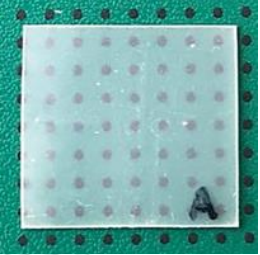
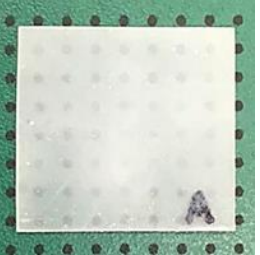

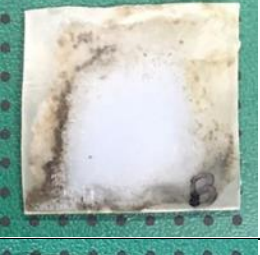
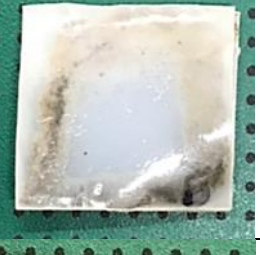






จากการทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบของชิ้นงานตัวอย่างพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดเป็นระยะเวลา 30 60 และ 90 วัน ตามลำดับ พบว่าเมื่อระยะเวลาการฝังกลบเพิ่มมากขึ้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น ดังตารางที่ 4.7 โดยที่พอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์จะมีลักษณะขุ่นขึ้นแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวมากนัก ในขณะที่ Laminate 1 จะเริ่มเกิดรอยแตกเล็กๆ บนพื้นผิวที่ระยะเวลาประมาณ 30 วันและจะมีรอยเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการฝังกลบมากขึ้น ส่วน Laminate 2 จะเริ่มมีรูขนาดเล็กเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ระยะเวลาประมาณ 30 และมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อระยะเวลาการฝังกลบมากขึ้น ในส่วนของ Laminate 3 นั้นจะไม่ค่อยสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับผลของร้อยละน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าที่ระยะเวลา 90 วันชิ้นงานตัวอย่าง Laminate 1 Laminate 2 และ Laminate 3 มีร้อยละน้ำหนักที่หายไปอยู่ที่ร้อยละ 6.39, 4.51 และ 1.95 ตามลำดับ ในขณะที่พอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์จะมีการเปลี่ยนแปลงของร้อยละน้ำหนักที่หายไปอยู่ที่ประมาณร้อยละ 0.98

ผลการทดสอบดังกล่าวบ่งชี้ว่าการลามิเนตระหว่างพอลิแล็คติกแอซิดกับแบคทีเรียเซลลูโลสส่งผลต่อการย่อยสลายที่เร็วขึ้น แต่อย่างไรก็ตามร้อยละน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานตัวอย่างจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของการกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตลงบนแบคทีเรียเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ยากลงบนแบคทีเรียเซลลูโลสหรืออาจเกิดจากความเข้ากันได้ระหว่างชั้นของแผ่นลามิเนตส่งผลให้เกิดการย่อยสลายได้ยากขึ้น

**ตารางที่ 4.6** ร้อยละน้ำหนักที่หายไปของแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดหลังการย่อยสลายด้วยวิธีฝังกลบเป็นระยะเวลา 30, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

ตัวอย่าง	ร้อยละน้ำหนักที่หายไป		
	30 วัน	60 วัน	90 วัน
PLA	0.25	0.63	0.98
Laminate 1	3.26	5.53	6.39
Laminate 2	1.88	3.87	4.51
Laminate 3	0.50	1.56	1.95

ตารางที่ 4.7 ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์และแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด หลังการย่อยสลายด้วยวิธีฝังกลบเป็นระยะเวลา 30, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

Sample	30 Day	60 Day	90 Day
PLA			
Laminate 1			
Laminate 2			
Laminate 3			



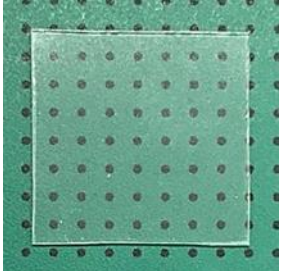
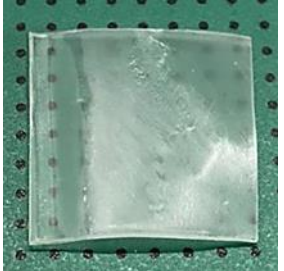
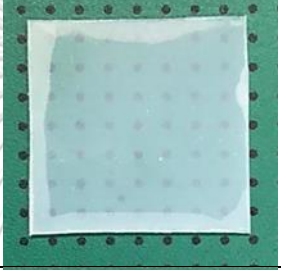
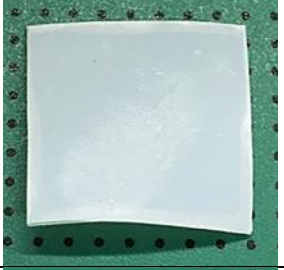
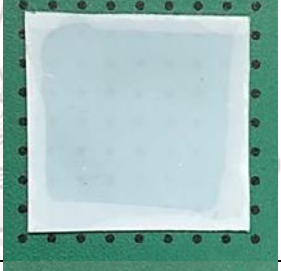


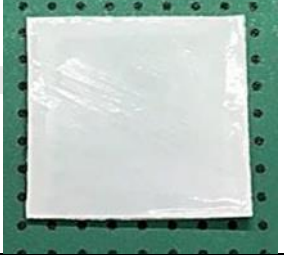
#### 4.6 ทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด

ในงานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะนำแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด/แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เตรียมได้ไปขึ้นรูปเป็นแก้วพลาสติกสำหรับเครื่องต้มร้อน ลักษณะดังรูปที่ 4.13 ซึ่งจากการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนโดยนำแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกและแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์ไปอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 20 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าหลังการอบแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์มีการเสียรูปร่างอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่า Laminate 1 และ Laminate 2 มีการโค้งงอและมีการแยกชั้นขึ้น ในขณะที่ Laminate 3 ยังคงรูปเดิมแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ดังนั้น Laminate 3 จึงมีเสถียรภาพทางความร้อนมากกว่า Laminate 1 และ Laminate 2 รวมไปถึงแผ่นพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์ด้วย ทั้งนี้การมีเสถียรภาพทางความร้อนที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการยึดเกาะกันได้ดีของเฟสพอลิแล็คติกแอซิดและแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต



รูปที่ 4.13 แก้วเครื่องต้มร้อนจากแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด/แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

ตารางที่ 4.8 การทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด โดยทำการอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20 นาที

ตัวอย่าง	ก่อนอบ	หลังอบ
PLA		
Laminate 1		
Laminate 2		
Laminate 3		

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเตรียมแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต ด้วยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง BC:MMA ที่ 1:1 และ 1:5 เพื่อปรับปรุงพื้นผิวของแบคทีเรียเซลลูโลสและลดความชอบน้ำของแบคทีเรียเซลลูโลส จากนั้นนำแผ่นแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เตรียมได้ไปلامิเนตกับแผ่นพอลิแล็คติกแอซิด ศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติการย่อยสลายด้วยวิธีฝังกลบของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิด/แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เตรียมได้ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สามารถเตรียมแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ซึ่งปฏิกิริยาดำเนินที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค NMR รวมไปถึงการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR การวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA และ DSC บ่งชี้ว่ามีการกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตลงบนแบคทีเรียเซลลูโลสในสูตร BC1:5

2. จากการเตรียมแผ่นลามิเนตระหว่างพอลิแล็คติกแอซิดกับแบคทีเรียเซลลูโลสพบว่า ลักษณะสันฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวางของแผ่นลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดและแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตสูตร BC1:5 มีการยึดเกาะที่ดีกว่า BC และ BC1:1

3. จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าแผ่นลามิเนตระหว่างพอลิแล็คติกแอซิดกับแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต มีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยการลามิเนตพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์กับแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตสูตร BC1:5 จะมีเสถียรภาพทางความร้อนมากที่สุด

4. จากผลการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของแผ่นลามิเนตพอลิเอทิลีนไดออกไซด์ พบว่าแผ่นลามิเนตระหว่างพอลิเอทิลีนไดออกไซด์บริสุทธิ์กับแบคทีเรียเซลลูโลสทั้ง 3 สูตร ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น และอุณหภูมิการหลอมเหลว

5. จากผลการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงและความต้านทานแรงดัดโค้ง พบว่าแผ่นลามิเนตพอลิเอทิลีนไดออกไซด์ทั้ง 3 สูตรมียังส์มอดุลัส (young's modulus) และยังส์มอดุลัสดัดโค้ง (flexural modulus) เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นพอลิเอทิลีนไดออกไซด์บริสุทธิ์ ซึ่งเป็นผลมาจากการเสริมแรงด้วยแบคทีเรียเซลลูโลส

6. จากผลการทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ พบว่าแผ่นลามิเนตพอลิเอทิลีนไดออกไซด์ที่เสริมแรงด้วยแบคทีเรียเซลลูโลสส่งผลต่อการย่อยสลายที่เร็วขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนไดออกไซด์บริสุทธิ์ แต่อย่างไรก็ตามร้อยละน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานตัวอย่างจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของการกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตลงบนแบคทีเรียเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ยากลงบนแบคทีเรียเซลลูโลสหรืออาจเกิดจากความเข้ากันได้ระหว่างชั้นของแผ่นลามิเนตส่งผลให้เกิดการย่อยสลายได้ยากขึ้น

7. จากการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนโดยนำแผ่นลามิเนตพอลิเอทิลีนไดออกไซด์และแผ่นพอลิเอทิลีนไดออกไซด์บริสุทธิ์ไปอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 20 นาที พบว่า Laminate 3 มีเสถียรภาพทางความร้อนมากที่สุด ซึ่งการมีเสถียรภาพทางความร้อนที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการยึดเกาะกันได้ดีของเฟสพอลิเอทิลีนไดออกไซด์และแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลต

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาผลของการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเอทิลีนไดออกไซด์

2. ศึกษาวิธีเตรียมวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนไดออกไซด์/แบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบอื่น

## บรรณานุกรม

- [1] Murariu, M. and Dubois, P. PLA composites: From production to properties. Advanced Drug Delivery Reviews 107 (2016): 17-46.
- [2] Yu, L., Dean, K., and Li, L. Polymer blends and composites from renewable resources. Progress in Polymer Science 31(6) (2006): 576-602.
- [3] Vatansever, E., Arslan, D., and Nofar, M. Polylactide cellulose-based nanocomposites. International Journal of Biological Macromolecules 137 (2019): 912-938.
- [4] วิมาลา กรินทร์ไตรทิพย์. สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดเติมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2562.
- [5] ชมลวรรณ อุตมกิจปัญญา. สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยยางธรรมชาติ-กราฟต์-พอลิอะคริลิกแอซิด. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2562.
- [6] Sengupta, S., Manna, S., Roy, U., and Das, P. Manufacturing of Biodegradable Poly Lactic Acid (PLA): Green Alternatives to Petroleum Derived Plastics. in Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials, pp. 561-569, 2020.
- [7] นพรุจ เคียงกิติวรรณ. พอลิเมอร์คอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/น้ำมันถั่วเหลืองมาลีเอตกราฟต์แป้งมันสำปะหลัง. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [8] Park, J.K., Jung, J.Y., and Khan, T. Bacterial cellulose. in Handbook of Hydrocolloids, pp. 724-739, 2009.
- [9] Campano, C., Balea, A., Blanco, A., and Negro, C. Enhancement of the fermentation process and properties of bacterial cellulose: a review. Cellulose 23(1) (2015): 57-91.
- [10] Manoukian, O.S., et al. Biomaterials for Tissue Engineering and Regenerative Medicine. in Encyclopedia of Biomedical Engineering, pp. 462-482, 2019.
- [11] de Amorim, J.D.P., et al. Plant and bacterial nanocellulose: production, properties and applications in medicine, food, cosmetics, electronics and engineering. A review. Environmental Chemistry Letters 18(3) (2020): 851-869.
- [12] Portela, R., Leal, C.R., Almeida, P.L., and Sobral, R.G. Bacterial cellulose: a versatile biopolymer for wound dressing applications. Microbial Biotechnology

- 12(4) (2019): 586-610.
- [13] Raghavendran, V., Asare, E., and Roy, I. Bacterial cellulose: Biosynthesis, production, and applications. Advances in Microbial Physiology 77 (2020): 89-138.
- [14] Kumar, R., Sharma, R.K., and Singh, A.P. Grafted cellulose: a bio-based polymer for durable applications. Polymer Bulletin 75(5) (2017): 2213-2242.
- [15] Wan, Z., et al. Graft copolymerization of methyl methacrylate onto bamboo cellulose under microwave irradiation. Carbohydrate Polymers 83(1) (2011): 264-269.
- [16] Ali, U., Karim, K.J.B.A., and Buang, N.A. A Review of the Properties and Applications of Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA). Polymer Reviews 55(4) (2015): 678-705.
- [17] Kobayashi, S. and Müllen, K. Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials. 2015.
- [18] Kelly, A. and Mortensen, A. Composite Materials: Overview. in Buschow, K.H.J., et al. (eds.), Encyclopedia of Materials: Science and Technology, pp. 1361-1371. Oxford: Elsevier, 2001.
- [19] Staab, G.H. 1 - Introduction to composite materials. in Staab, G.H. (ed.) Laminar Composites (Second Edition), pp. 1-16: Butterworth-Heinemann, 2015.
- [20] หลุทกัก กิรติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล, and อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี. ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ. วิศวกรรมสาร มท. 22(70) (2552): 18-32.
- [21] Kim, Y.K. Natural fibre composites (NFCs) for construction and automotive industries. in Handbook of Natural Fibres, pp. 254-279, 2012.
- [22] Jonoobi, M., Harun, J., Mathew, A.P., and Oksman, K. Mechanical properties of cellulose nanofiber (CNF) reinforced polylactic acid (PLA) prepared by twin screw extrusion. Composites Science and Technology 70(12) (2010): 1742-1747.
- [23] Lv, S., Zhang, Y., Gu, J., and Tan, H. Biodegradation behavior and modelling of soil burial effect on degradation rate of PLA blended with starch and wood flour. Colloids Surf B Biointerfaces 159 (2017): 800-808.
- [24] Threepopnatkul, P., Sittattrakul, A., Supawititpattana, K., Jittiarpon, P., Raksawat, P., and Kulsetthanchalee, C. Effect of bacterial cellulose on properties of poly(lactic acid). Materials Today: Proceedings 4(5) (2017): 6605-6614.

- [25] Tomé, L.C., et al. Transparent bionanocomposites with improved properties prepared from acetylated bacterial cellulose and poly(lactic acid) through a simple approach. Green Chemistry 13(2) (2011).
- [26] Hervy, M., Blaker, J.J., Braz, A.L., and Lee, K.-Y. Mechanical response of multi-layer bacterial cellulose nanopaper reinforced polylactide laminated composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 107 (2018): 155-163.
- [27] Rosli, N.A., Ahmad, I., Abdullah, I., Anuar, F.H., and Mohamed, F. Hydrophobic modification of cellulose isolated from *Agave angustifolia* fibre by graft copolymerisation using methyl methacrylate. Carbohydrate Polymers 125 (2015): 69-75.
- [28] Qudsieh, I.Y.M., Fakhru'l-Razi, A., Muyibi, S.A., Ahmad, M.B., Rahman, M.Z.A., and Zin Wan Yunus, W.M. Preparation and characterization of poly(methyl methacrylate) grafted sago starch using potassium persulfate as redox initiator. Journal of Applied Polymer Science 94(5) (2004): 1891-1897.
- [29] Natureworks. Ingeo™ biopolymer 2003D [Online]. 2563. แหล่งที่มา : [www.natureworksllc.com/~media/Technical\\_Resources/Technical\\_Data\\_Sheets/TechnicalDataSheet\\_2003D\\_FFP-FSW\\_pdf.pdf](http://www.natureworksllc.com/~media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_2003D_FFP-FSW_pdf.pdf) [4 กรกฎาคม 2565]
- [30] Auta, R., Adamus, G., Kwiecien, M., Radecka, I., and Hooley, P. Production and characterization of bacterial cellulose before and after enzymatic hydrolysis. African Journal of Biotechnology 16 (2017): 470-482.
- [31] Suresh, K., Islam, M.A., Rastgar, M., Mohammadnezhad, A., Fleck, B.A., and Sadrzadeh, M. Poly (methyl methacrylate) grafted wheat straw for economical and eco-friendly treatment of oily wastewater. Cellulose 29(6) (2022): 3351-3374.
- [32] He, F., Yang, H., Zeng, L., Hu, H., and Hu, C. Production and characterization of bacterial cellulose obtained by *Gluconacetobacter xylinus* utilizing the by-products from Baijiu production. Bioprocess and Biosystems Engineering 43(5) (2020): 927-936.
- [33] Mohammadkazemi, F., Azin, M., and Ashori, A. Production of bacterial cellulose using different carbon sources and culture media. Carbohydrate Polymers 117

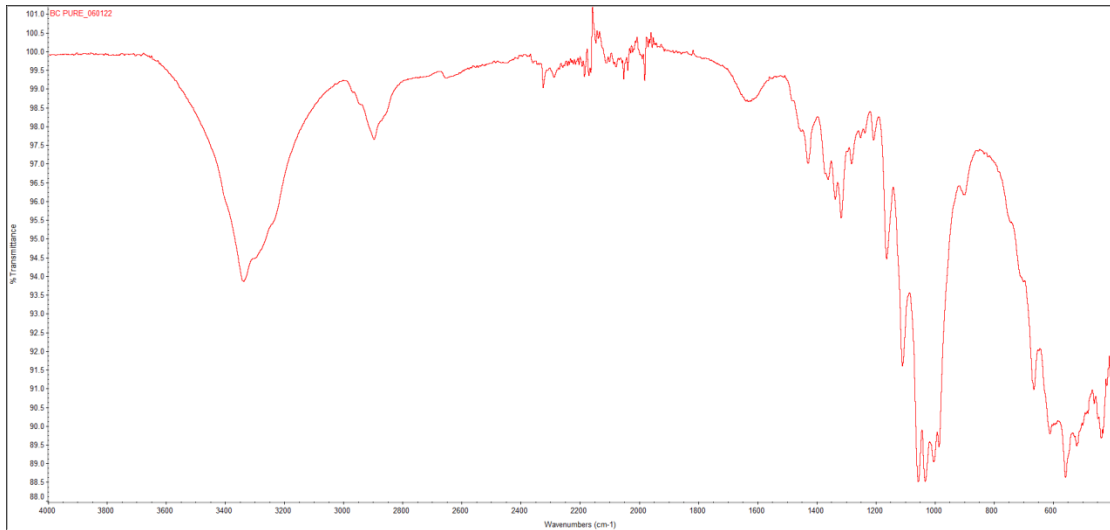
- (2015): 518-523.
- [34] Potivara, K. and Phisalaphong, M. Development and Characterization of Bacterial Cellulose Reinforced with Natural Rubber. Materials (Basel, Switzerland) 12(2019), E2323 DOI: 10.3390/ma12142323.
- [35] Zhang, J., et al. Surface modified cellulose nanocrystals for tailoring interfacial miscibility and microphase separation of polymer nanocomposites. Cellulose 26 (2019).
- [36] Spinella, S., Samuel, C., Raquez, J.-M., McCallum, S.A., Gross, R., and Dubois, P. Green and Efficient Synthesis of Dispersible Cellulose Nanocrystals in Biobased Polyesters for Engineering Applications. ACS Sustainable Chemistry & Engineering 4(5) (2016): 2517-2527.



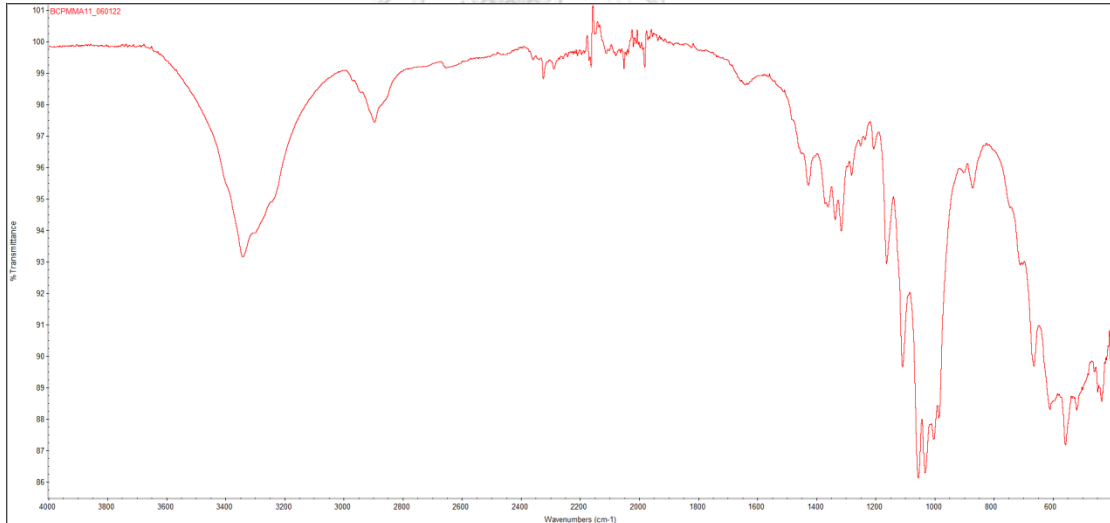




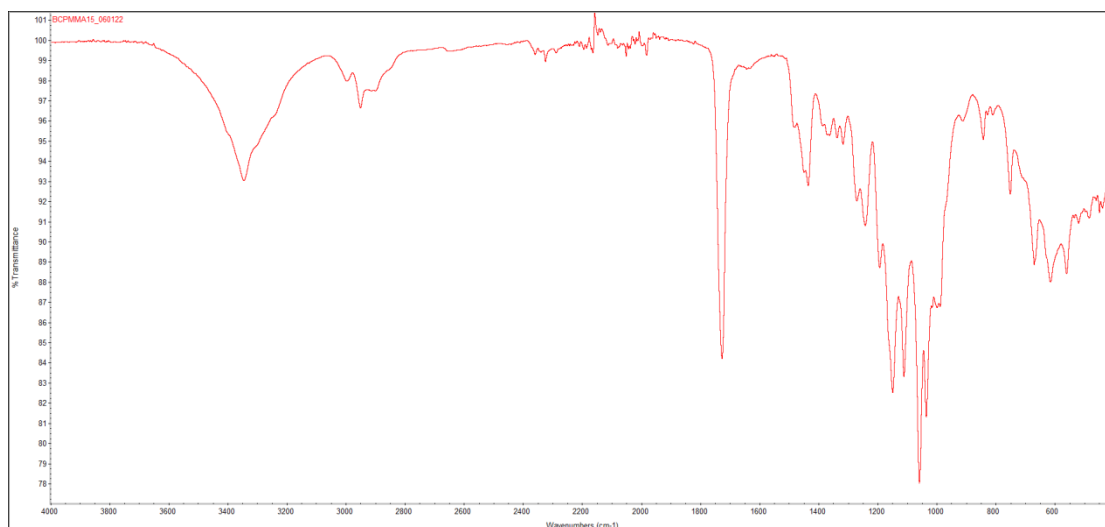
ภาคผนวก ก  
การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน



รูปที่ ก.1 FTIR สเปกตรัมของแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธี



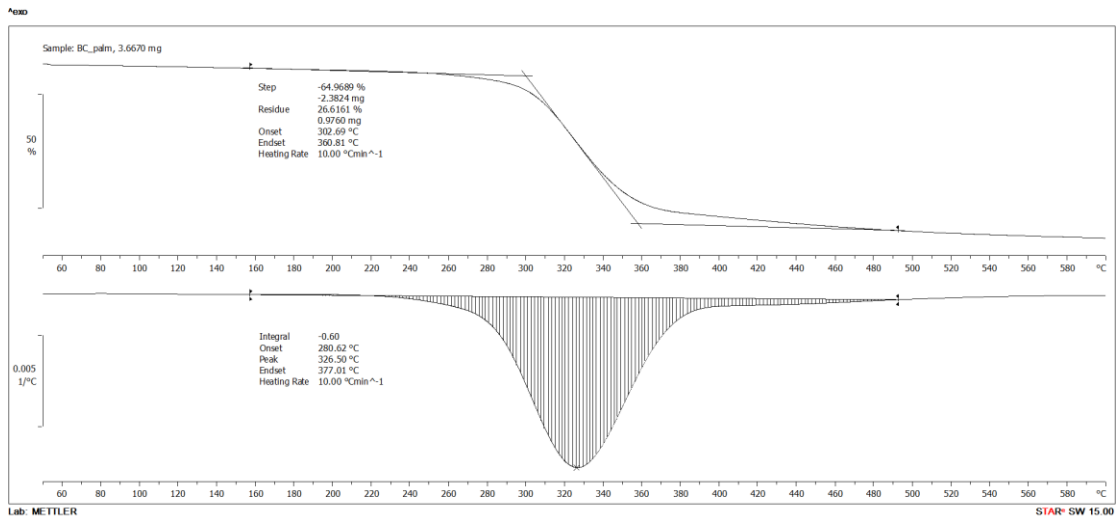
รูปที่ ก.2 FTIR สเปกตรัมของแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตสูตร BC1:1



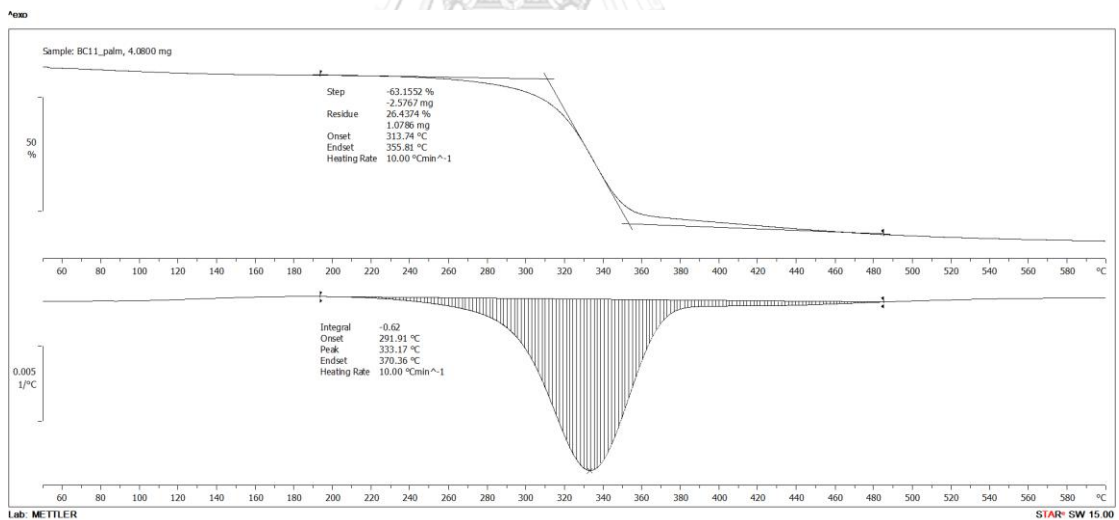
รูปที่ ก.3 FTIR สเปกตรัมของแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาครีเลตสูตร BC1:5



ภาคผนวก ข  
สมบัติทางความร้อน

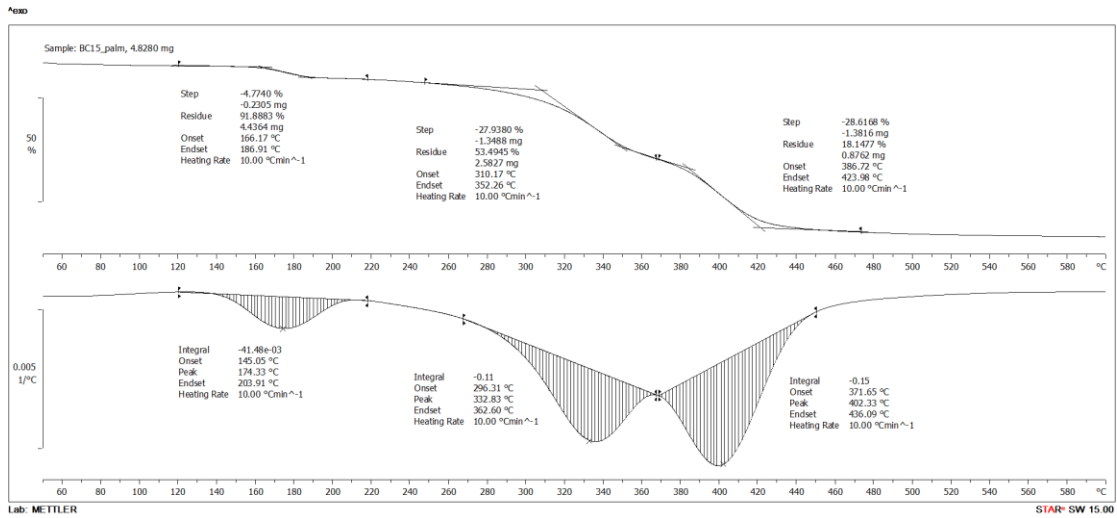


รูปที่ ข.1 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของแบคทีเรียเซลลูโลสบริสุทธิ์

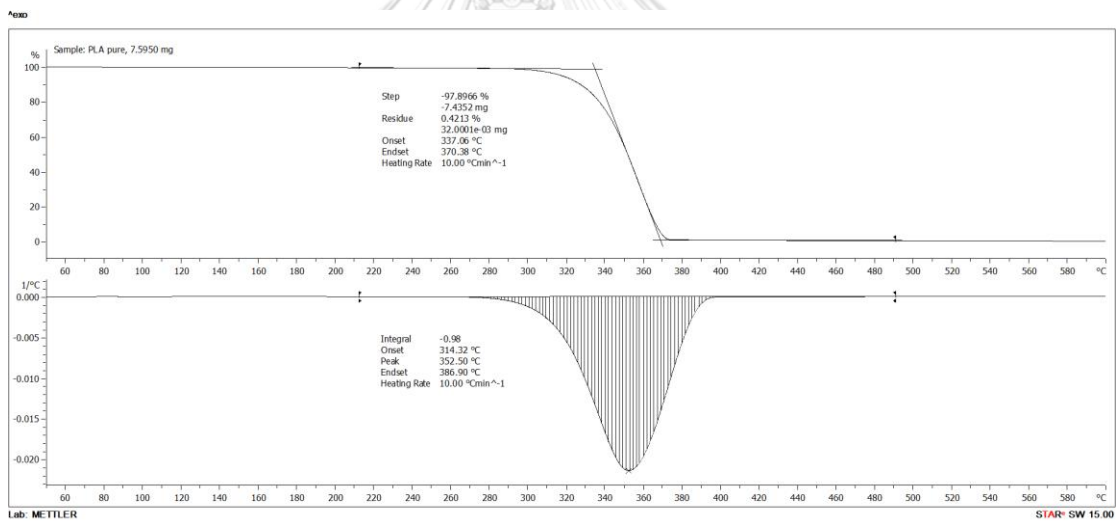


รูปที่ ข.2 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตสูตร

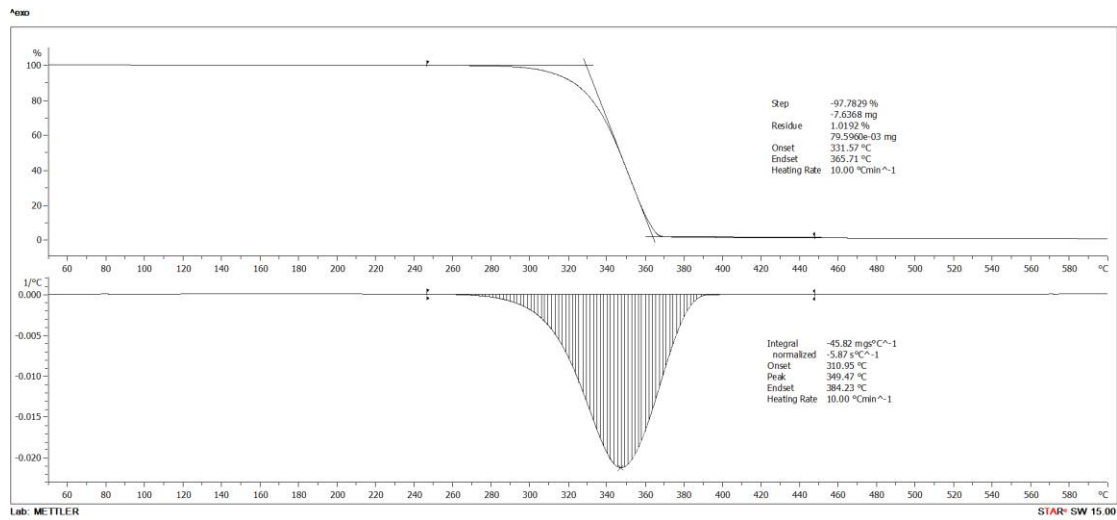
BC1:1



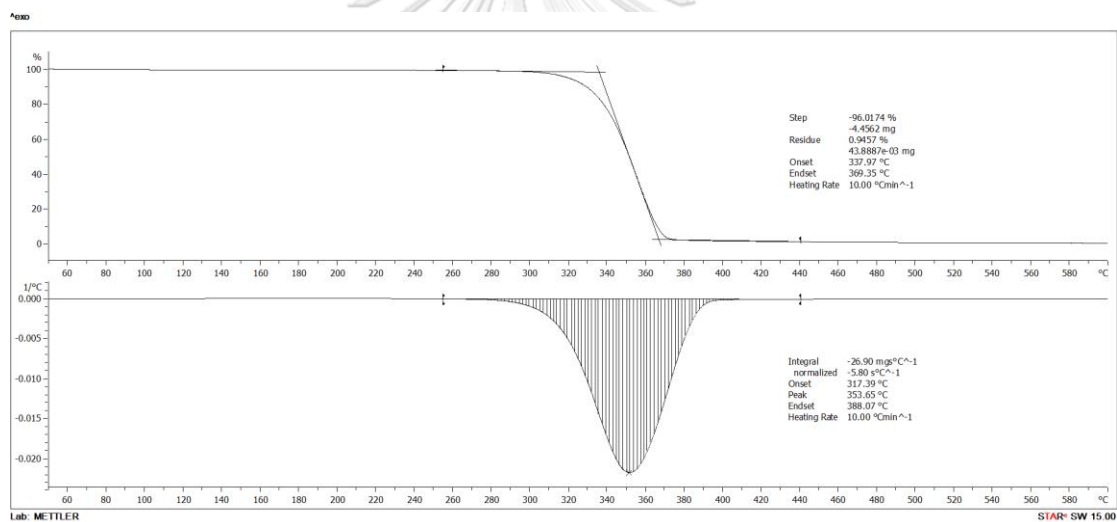
รูปที่ ข.3 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของแบคทีเรียเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิเมทิลเมทาคริเลตสูตร BC1:5



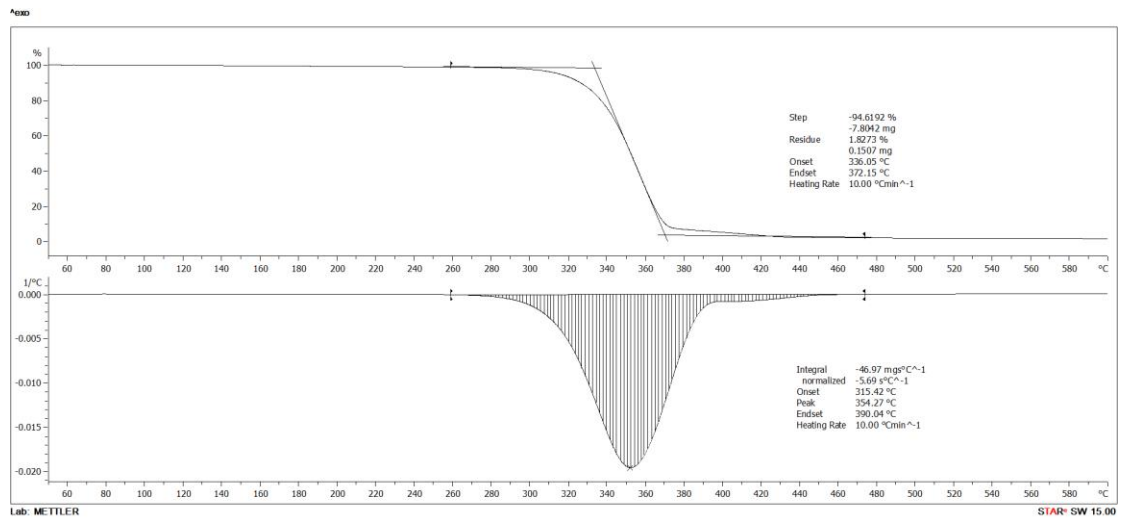
รูปที่ ข.4 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของพอลิแล็คติกแอซิดบริสุทธิ์



รูปที่ ข.5 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ Laminate 1 (PLA/BC/PLA)



รูปที่ ข.6 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ Laminate 2 (PLA/BC1:1/PLA)



รูปที่ ข.7 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมของ Laminate 3 (PLA/BC1:5/PLA)



## ภาคผนวก ค

## สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ค.1 สมบัติเชิงกลของพอลิแล็คติกแอซิด

Sample	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)
1	50.70	1262.93	4.11	1400.71	58.79
2	53.37	1246.22	5.17	1194.56	46.17
3	54.38	1254.43	4.92	1407.15	54.60
4	53.97	1118.59	6.07	1750.25	71.16
5	58.07	1307.40	5.52	1598.33	59.45
ค่าเฉลี่ย	54.10	1237.92	5.16	1470.20	58.03
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.64	70.77	0.73	211.91	9.05

ตารางที่ ค.2 สมบัติเชิงกลของ Laminate 1

Sample	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)
1	52.64	1478.15	5.17	2376.09	66.18
2	54.16	1206.46	5.37	1705.67	60.04
3	54.16	1230.41	6.08	2172.34	53.29
4	50.89	1602.83	4.01	2151.43	55.22
5	52.78	1441.18	5.46	2020.09	65.24
ค่าเฉลี่ย	52.93	1391.80	5.22	2085.12	59.99
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.35	169.43	0.76	247.43	5.78



ตารางที่ ค.3 สมบัติเชิงกลของ Laminate 2

Sample	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)
1	52.58	1317.91	5.74	58.99	1311.88
2	48.83	1687.84	4.38	55.62	1858.77
3	48.51	1535.82	4.27	73.80	1611.58
4	53.65	1265.25	4.79	65.12	1616.15
5	54.76	1166.48	5.96	69.13	1676.99
ค่าเฉลี่ย	51.67	1394.66	5.03	64.53	1615.07
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.84	212.48	0.78	7.38	196.95

ตารางที่ ค.4 สมบัติเชิงกลของ Laminate 3

Sample	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)
1	51.99	1297.37	4.99	71.33	1719.15
2	50.65	1535.36	4.69	55.63	1665.34
3	53.66	1169.45	5.28	65.85	1648.21
4	50.67	1373.81	5.95	69.15	1647.93
5	49.26	1407.30	4.12	61.91	1379.60
ค่าเฉลี่ย	51.25	1356.66	5.01	64.77	1612.05
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.66	135.42	0.68	6.22	119.11

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ฐาปนี เพ็ชระ
วัน เดือน ปี เกิด	29 เมษายน 2535
สถานที่เกิด	นครนายก
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ที่อยู่ปัจจุบัน	9 หมู่ 2 ตำบลชุมพล อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120
ผลงานตีพิมพ์	Pure and Applied Chemistry International Conference 2022 (PACCON 2022) ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร ในหัวข้อ Poly(lactic acid)/bacterial cellulose-g-poly(methyl methacrylate) laminate sheet