



อิทธิพลของความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBAT ต่อสมบัติของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT



โดย

นายณัฐนันท์ วิริยะมนตรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร



อิทธิพลของความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBAT ต่อสมบัติของคอมพอสิต
PLA/PBAT/CNT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

EFFECT OF COMPATIBILITY BETWEEN PLA AND PBAT ON THE PROPERTIES OF
PLA/PBAT/CNT COMPOSITES



By

MR. Nattanan WIRIYAMONTREE

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

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Silpakorn University

Academic Year 2022

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	อิทธิพลของความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBAT ต่อสมบัติของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT
โดย	นายณัฐนนท์ วิริยะมนตรี
สาขาวิชา	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศรินทร์ เหมชะปะบุตร รองศาสตราจารย์ มาณพ ปานะโปย

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุณศรี ลิขิจรจำเนียร) เทคโนโลยีอุตสาหกรรม

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร) อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์) อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศรินทร์ เหมชะปะบุตร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ มาณพ ปานะโปย)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)

630920006 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต
คำสำคัญ : พอลิแลคติกแอซิด, พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท, การปรับปรุงความเข้ากันได้,
คาร์บอนนาโนทิวบ์

นาย ญัฐนันท์ วิริยะมนตรี: อิทธิพลของความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBAT ต่อสมบัติ
ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ญัฐ
วุฒิ ชัยยุตต์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBAT ต่อสมบัติของ
คอมพอสิต PLA/PBAT/CNT โดยใช้ PLA-g-GMA ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ในส่วนที่ 1
สังเคราะห์ PLA-g-GMA และศึกษาผลของปริมาณ PLA-g-GMA ที่มีต่อความเข้ากันได้และสมบัติของ
พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT พบว่าสามารถทำการสังเคราะห์ PLA-g-GMA ที่มีเปอร์เซ็นต์การกราฟต์
ประมาณ 1.03% และการเติม PLA-g-GMA สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ
PBAT ส่งผลให้สมบัติการดึงยึดของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่
อีพอกไซด์ของ GMA กับหมู่คาร์บอกซิลิกของ PBAT และ PLA อย่างไรก็ตามการเติม PLA-g-GMA
จะส่งผลให้ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมลดลง ซึ่งในส่วนที่ 1 พบว่าการเติม PLA-g-GMA ที่ปริมาณ
9% โดยน้ำหนัก สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBAT ได้ดีที่สุด ในส่วนที่ 2
ศึกษาผลของปริมาณ CNT ที่มีต่อสมบัติของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม
PLA-g-GMA ที่ปริมาณ 9% โดยน้ำหนัก พบว่าการผสม PLA-g-GMA และ CNT มีอิทธิพลต่อการ
กระจายตัวของเฟส PBAT ในเมทริกซ์ PLA ซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติการดึงยึดของคอมพอสิต อย่างไรก็ตาม
ตามการเติม PLA-g-GMA และ CNT ส่งผลให้ปริมาณผลึกของคอมพอสิตที่ได้จากการทดสอบ XRD มี
ค่าลดลง และจากผลการทดสอบด้วย Raman พบว่ามีข้อบกพร่องบนโครงสร้างของ CNT มากขึ้น
นอกจากนี้เนื่องจาก CNT มีสมบัติการนำความร้อนที่ดีจึงส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของคอม
พอสิตลดลง แต่ไม่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน และการเติม CNT ที่ปริมาณ 10 ส่วนในร้อยส่วน
(phr) ทำให้คอมพอสิตมีค่าความต้านทานไฟฟ้าในช่วงวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า โดย PLA-g-GMA จะ
ส่งเสริมการเกิด Percolation threshold อย่างไรก็ตามคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ทั้งที่มีการเติม
และไม่เติม PLA-g-GMA ไม่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการป้องกันการรบกวนทาง
แม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากมีค่า EMI SE_{Total} ต่ำกว่า 20 dB

630920006 : Major POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

Keyword : Polylactic acid (PLA) Polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT)

Compatibility Carbon nanotube (CNT)

MR. Nattanan WIRIAMONTREE : Effect of compatibility between PLA and PBAT on the properties of PLA/PBAT/CNT composites Thesis advisor : Assistant Professor Dr. Nattawut Chaiyut

This research studied the compatibility between PLA and PBAT on the properties of the PLA/PBAT/CNT composite by using PLA-g-GMA as a compatibilizer. In part 1, the synthesis of PLA-g-GMA and the effect of the amount of PLA-g-GMA on the compatibility and properties of the PLA/PBAT blend were investigated. It was found that the grafting percentage of PLA-g-GMA was approximately 1.03%, and the addition of PLA-g-GMA improved the compatibility between PLA and PBAT, resulting in an increase in the tensile properties of the blend due to the interaction between the epoxy group of GMA and the carboxyl group of PBAT and PLA. However, the crystallinity of the blend decreased with the addition of PLA-g-GMA. The optimum amount of PLA-g-GMA was found to be 9% by weight which provides the best improvement in compatibility between PLA and PBAT. In part 2, the effect of the quantity of CNT on the properties of the PLA/PBAT/CNT composite, both with and without PLA-g-GMA, was studied. It was found that adding CNT and PLA-g-GMA had an impact on the dispersion of PBAT phase in the PLA matrix, which improved the tensile properties of the composite. However, adding CNT and PLA-g-GMA also resulted in a decrease in the crystallinity of the composite as measured by XRD, and an increase in defects in the CNT structure as measured by Raman spectroscopy. Additionally, because CNT has good thermal conductivity, adding CNT to the composite caused a decrease in the thermal stability of the composite. Moreover, adding 10 phr of CNT to the composite increased the electrical conductivity of the composite in the range of semiconducting materials. PLA-g-GMA promoted the formation of the percolation threshold. However, the PLA/PBAT/CNT composite, with and without the addition of PLA-g-GMA, was not suitable for use in electromagnetic interference shielding due to the low EMI SE_{Total} value, which was less than 20 dB.



กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยและปริญญาบัตรฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐฉิ ชัยยุตต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศรินทร์ เขษะปะบุตร และรองศาสตราจารย์ มาณพ ปานะโปย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้คอยให้ คำปรึกษาและเสียสละเวลาในการชี้แนะแนวทางการวิจัย การวิเคราะห์ผลการวิจัย ตลอดจนตรวจสอบ แก้ไขข้อบกพร่องอย่างถี่ถ้วน อีกทั้งยังช่วยแก้ไขปัญหาด่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานวิจัยอีกด้วย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร ประธานกรรมการ และรอง ศาสตราจารย์ ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ กรรมการจากภายนอก ที่ให้ข้อเสนอแนะ ตรวจสอบ แก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ และสละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านของภาควิชาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่คอยอบรมสั่งสอน ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งปวง และขอขอบคุณภาควิชาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้โอกาสในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ ทั้งการสนับสนุนด้านสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณคุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชา สำหรับการอำนวยความสะดวกทางด้านการจัดหาวัสดุอุปกรณ์และสารเคมี ขอขอบคุณคุณไพโรจน์ ตั้งศุภวัช วิศวกรประจำภาควิชา สำหรับความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือและเครื่องจักร และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชา สำหรับการอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานทุก ๆ ด้าน จนกระทั่งงานวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอบคุณเพื่อน พี่ และน้อง นักศึกษาภาควิชาการและวิศวกรรมวัสดุทุกคน สำหรับความ ห่วงใย ความมีน้ำใจ และความช่วยเหลือตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดาและมารดาที่คอยสนับสนุนด้านการเรียน คอยให้กำลังใจเสมอมาและ สำหรับทุกสิ่งทุกอย่างที่มีให้อย่างไม่สิ้นสุด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นาย ณัฐนันท์ วิริยะมนตรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid; PLA).....	4
2.1.1 กระบวนการผลิต PLA.....	5
2.1.2 สมบัติของ PLA.....	6
2.1.2.1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล	6
2.1.2.2 สมบัติทางความร้อน.....	6
2.2 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลต (polybutylene adipate-co-terephthalate; PBAT)	7
2.2.1 กระบวนการสังเคราะห์ PBAT	8
2.3 การปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม [18].....	9

2.3.1 การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (addition of block or graft copolymer).	10
2.3.2 การเติมพอลิเมอร์ที่หมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (addition of functional/reactive polymers).....	10
2.3.3 การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไรเซชันในระหว่างการผสม (in-situ grafting polymerization).....	10
2.4 การนำไฟฟ้าของวัสดุ [20].....	11
2.4.1 การนำไฟฟ้า (conductivity) [21]	11
2.4.2 ทฤษฎีแถบพลังงาน (band theory) [23]	14
2.5 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า [24].....	16
2.6 คาร์บอนนาโนทิวบ์ (carbon nanotube; CNT) [25].....	17
2.6.1 สมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์	19
2.6.2 การปรับปรุงพื้นผิวคาร์บอนนาโนทิวบ์ (surface modification of carbon nanotube).....	20
2.6.2.1 การปรับปรุงด้วยโคเวเลนต์ (covalent modification)	20
2.6.2.2 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน.....	21
2.6.2.3 การเกิดปฏิกิริยาฟลูออรีเนชัน (fluorination).....	22
2.6.2.4 Aryl diazonium chemistry	22
2.6.2.5 คาร์บีนและไนเตริน (carbenes and nitrenes)	23
2.7 การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interference; EMI).....	23
2.7.1 หลักการของการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [30].....	24
2.7.1.1 การเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างระบบ.....	25
2.7.1.2 การเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบ	25
2.7.2 กลไกการป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า.....	26
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	55

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	55
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	56
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	61
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	66
4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่มีการเติม PLA-g-GMA ใน สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้เทคนิค Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR).....	67
4.2 สัณฐานวิทยาของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่มีการเติม PLA-g-GMA ในสัดส่วนต่าง ๆ	70
4.3 สมบัติทางความร้อนของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่ปริมาณการเติม PLA-g-GMA ในสัดส่วน ต่าง ๆ	73
4.4 สมบัติการดึงยึดของ PLA/PBAT PLA-g-GMA ที่มีการเติม PLA-g-GMA ในสัดส่วนต่าง ๆ...	75
4.5 สัณฐานวิทยาของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA	78
4.6 โครงสร้างของ CNT ในคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ที่มีการเติมและ ไม่เติม PLA-g-GMA ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy	82
4.7 สมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติม และไม่เติม PLA-g-GMA.....	84
4.8 โครงสร้างและปริมาณผลึกของ CNT และคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ใน สัดส่วนต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA.....	86
4.9 เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการ เติมและไม่เติม PLA-g-GMA.....	88
4.10 สมบัติการดึงยึดของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ที่มีการเติมและไม่ เติม PLA-g-GMA.....	90
4.11 สมบัติความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA.....	93
4.12 สมบัติการป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT	97
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	99

5.1 สรุปผลการวิจัย..... 99

5.2 ข้อเสนอแนะ 101

รายการอ้างอิง 102

ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดลองต่าง ๆ..... 111

ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณต่าง ๆ..... 142

ภาคผนวก ค การนำเสนอผลงานวิจัย 149

ประวัติผู้เขียน..... 159



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติทางความร้อนของ PLA [16].....	7
ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของคาร์บอนนาโนทิวบ์เทียบกับวัสดุอื่น ๆ [26].....	19
ตารางที่ 2.3 เปอร์เซ็นต์การลดทอน EMI เมื่อเทียบกับค่า SE [32].....	27
ตารางที่ 2.4 อุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) และปริมาณผลึก (X_c) ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT [19]	31
ตารางที่ 2.5 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT [19].....	31
ตารางที่ 2.6 สมบัติทางความร้อนของ PLA/PBAT และ PLA/PBAT ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ [34]...	42
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA	62
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของคอมพอสิต PLA/PBAT/PLA-g-GMA/CNT	64
ตารางที่ 4.1 สมบัติทางความร้อนของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่ปริมาณการเติม PLA-g-GMA ...	74
ตารางที่ 4.2 สมบัติการดึงยึดของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่ปริมาณการเติม PLA-g-GMA ใน สัดส่วนต่าง ๆ	77
ตารางที่ 4.3 สมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ที่มีการ เติมและไม่เติม PLA-g-GMA	86
ตารางที่ 4.4 สมบัติการดึงยึดของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติม และไม่เติม	93
ตารางที่ 4.5 ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA	96
ตารางที่ ก.1 เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ	139
ตารางที่ ก.2 ความหนาเฉลี่ย ความต้านทานไฟฟ้า และสภาพความต้านทานไฟฟ้าของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ	140

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ในปริมาณ PLA-g-GMA ตั้งแต่ 0-10 %wt [8]	2
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของกรดแลคติก [12].....	4
รูปที่ 2.2 ภาพรวมกลไกการสังเคราะห์ PLA [12].....	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของ PBAT [17].....	8
รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PBAT [17].....	8
รูปที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในโลหะ (a) เมื่อไม่มีการให้ความต่างศักย์ และ (b) เมื่อมีความต่างศักย์เกิดขึ้นระหว่างปลายทั้งสองของโลหะ [21].....	11
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ [21].....	12
รูปที่ 2.7 การนำไฟฟ้าในหลอดบรรจุแก๊สนีออน [21].....	13
รูปที่ 2.8 การนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ [21].....	14
รูปที่ 2.9 แถบพลังงานของออร์บิทัลในกลุ่มอะตอมของลิเทียม [23].....	14
รูปที่ 2.10 แถบพลังงานของอิเล็กตรอน [23].....	15
รูปที่ 2.11 แถบพลังงานอิเล็กตรอนของวัสดุชนิดต่าง ๆ [23]	15
รูปที่ 2.12 Energy band gap ของ (a) โลหะ (b) ฉนวน และ (c) สารกึ่งตัวนำ [24].....	17
รูปที่ 2.13 การจัดเรียงตัวของคาร์บอนนาโนทิวบ์ [25].....	18
รูปที่ 2.14 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียวและผนังหลายชั้น [26].....	18
รูปที่ 2.15 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบ Diffusive และ Ballistic ในเส้นลวด 1 มิติ.....	20
รูปที่ 2.16 แผนภาพของกระบวนการออกซิเดชันในคาร์บอนนาโนทิวบ์และความเป็นไปได้ที่จะเกิดหมู่ฟังก์ชันสองวงจร [28]	21
รูปที่ 2.17 แผนภาพการเกิดหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเกลือ Diazonium [28].....	22
รูปที่ 2.18 แผนภาพการปรับปรุงพื้นผิวของคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย (a) Cycloaddition ของไนตรีน และ (b) Nucleophilic carbene functionalization [28].....	23

รูปที่ 2.19 ตัวอย่างการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างระบบ [30].....	25
รูปที่ 2.20 ตัวอย่างการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบในเครื่องรับวิทยุ [30] ...	26
รูปที่ 2.21 (a) ทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อกระทบกับวัสดุทั่วไป และ (b) การลดทอนการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวัสดุป้องกัน [32].....	28
รูปที่ 2.22 ภาพ SEM (ซ้าย) ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT (a) 80/20/0 (b) 60/40/0 (c) 80/20/4 และ (d) 60/40/3 และภาพ TEM (ขวา) ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT (a) 80/20/0 (b) 60/40/0 (c) 80/20/2.4 และ (d) 60/40/1.8 [19]	30
รูปที่ 2.23 ค่าการนำไฟฟ้าโดยปริมาตรของคอมพอสิต (●) 80/20/CNT และ (▲) 60/40/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ [19].....	32
รูปที่ 2.24 สมบัติทางความร้อนของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่ปริมาณการเติม PLA-g-GMA ต่าง ๆ (a) กราฟ DSC ณ การให้ความร้อนครั้งที่สอง ที่อัตรา 10 K/min (b) กราฟ TGA และ (c) กราฟ DTG [8]	34
รูปที่ 2.25 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่ปริมาณ PLA-g-GMA ต่าง ๆ [8].....	35
รูปที่ 2.26 (a) ภาพการละลายของพอลิเมอร์ผสมที่สัดส่วนต่าง ๆ ในคลอโรฟอร์ม และภาพ AFM ของพอลิเมอร์ผสมที่สัดส่วนต่าง ๆ (b) PBAT/10%wt PLA-g-GMA (c) PLA/PBAT (d) PLA/PBAT/10%wt PLA-g-GMA [8].....	36
รูปที่ 2.27 สมบัติเชิงกลของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิค (a) Injection molding (b) 3D-printing ในทิศทาง Transverse และ (c) 3D-Printing ในทิศทาง Longitudinal [8].....	37
รูปที่ 2.28 ขั้นตอนการผสมและกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA [8]	38
รูปที่ 2.29 กราฟ Stress-strain ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA-g-GMA ที่ระยะเวลาผสมแตกต่างกัน [34].....	39
รูปที่ 2.30 สเปกตรัม ^1H NMR ของ PLA GMA และ PLA-g-GMA ที่ระยะเวลาผสม 10 นาที [34] 40	
รูปที่ 2.31 โครงสร้างที่เป็นไปได้ของ PLA-g-GMA [34]	40
รูปที่ 2.32 XRD patterns ของ PLA PBAT และ PLA/PBAT ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ [35].....	41
รูปที่ 2.33 DSC thermogram ของ PLA PBAT และ PLA/PBAT ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ [35]	42

รูปที่ 2.34 ภาพ SEM ในทิศทางการขึ้นรูปฟิล์มตามแนวตั้ง (MD) และตามขวาง (TD) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม 40PLA ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ (a) 40PLA, (b) 40PLA/0.3JC และ (c) 40PLA/0.6JC [35]..... 44

รูปที่ 2.35 ภาพ SEM ในทิศทางการขึ้นรูปฟิล์มตามแนวตั้ง (MD) และตามขวาง (TD) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม 60PLA ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ (a) 60PLA, (b) 60PLA/0.3JC และ (c) 60PLA/0.6JC [35]..... 46

รูปที่ 2.36 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมและไม่เติม Chain extender [35] 47

รูปที่ 2.37 ภาพ SEM ของคอมพอสิต PLA/CNT ก่อนและหลังการขึ้นรูป 3D printing (a) PLA บริสุทธิ์ (b-c) คอมพอสิต PLA/CNT-1 ที่มีปริมาณ CNT 1%wt หลังผ่านกระบวนการอัดรีด (d-e) คอมพอสิต PLA/CNT-1 ที่มีปริมาณ CNT 1%wt หลังผ่านกระบวนการ 3D printing (f) คอมพอสิต PLA/CNT-3 ที่ผ่านกระบวนการ 3D printing และ (g-i) คอมพอสิต PLA/CNT-1 ที่มีปริมาณ CNT 3%wt หลังผ่านกระบวนการ 3D printing [36]..... 49

รูปที่ 2.38 สเปกตรัม Raman ของ PLA บริสุทธิ์ และคอมพอสิต PLA/CNT ก่อนและหลังผ่านกระบวนการ 3D printing [36]..... 50

รูปที่ 2.39 ค่าการนำไฟฟ้าของ PLA/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ [11]..... 51

รูปที่ 2.40 ค่า LOI ของ PLA บริสุทธิ์ และคอมพอสิต PLA/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ [11]..... 52

รูปที่ 2.41 ภาพ SEM พื้นผิวแตกหักของคอมพอสิต PLA/CNC/CNT ที่ปริมาณ CNC 0.2%wt และมีการเติม CNT ในปริมาณต่าง ๆ (a) 0%wt (b) 0.9%wt และ (c) 4.3%wt [2]..... 53

รูปที่ 2.42 ค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิต PLA/CNC/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ [2]..... 53

รูปที่ 2.43 ประสิทธิภาพการป้องกัน EMI (EMI SE) ของคอมพอสิต PLA/CNC/CNT (a) ค่า EMI SE ในช่วงความถี่ 8-13 GHz และ (b) SE_{Total} , SE_R และ SE_A ของคอมพอสิต PLA/CNC/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ [2] 54

รูปที่ 3.1 เครื่องหลอมผสมภายใน (internal mixer) 56

รูปที่ 3.2 เครื่องขึ้นรูปด้วยการกดอัด (compression molding machine) 56

รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)..... 57

รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-ray diffractometer (XRD) 58

รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์เชิงโมเลกุลหรือหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโกปี (raman spectrometer).....	58
รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนเชิงพลังงาน (DSC).....	59
รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิ (TGA)	59
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบแรงดึงหรือแรงกด (universal testing machine).....	60
รูปที่ 4.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่อาจเป็นไปได้ของ PLA-g-GMA [37]	67
รูปที่ 4.2 สเปกตรัม ¹ H-NMR ของ PLA GMA และ PLA-g-GMA.....	69
รูปที่ 4.3 สเปกตรัม ¹ H-NMR ของ PBAT, PLA-g-GMA และ PLA/PBAT/PLA-g-GMA	70
รูปที่ 4.4 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ (a) PLA/PBAT/PG0 (b) PLA/PBAT/PG3 (c) PLA/PBAT/PG6 และ (d) PLA/PBAT/PG9	72
รูปที่ 4.5 แผนภาพกลไกการทำหน้าที่เป็น Compatibilizer ของ PLA-g-GMA [8].....	72
รูปที่ 4.6 DSC thermogram ของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่ปริมาณการเติม PLA-g-GMA ต่าง ๆ	74
รูปที่ 4.7 สมบัติการดึงยึดของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่ปริมาณการเติม PLA-g-GMA ในสัดส่วนต่าง ๆ (a) Young's modulus (b) Tensile strength และ (c) Elongation at break	76
รูปที่ 4.8 สันฐานวิทยาของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ (a-e) ที่ไม่มีการเติม และ (a'-e') ที่มีการเติม PLA-g-GMA ด้วยกำลังขยาย 3000 เท่า.....	80
รูปที่ 4.9 กลไกการเกิด Nano-bridge effect ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT [58].....	81
รูปที่ 4.10 Raman spectrum ของผง CNT และคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA.....	83
รูปที่ 4.11 DSC thermogram ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA.....	85
รูปที่ 4.12 XRD pattern ของผง CNT และคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA.....	87
รูปที่ 4.13 ปริมาณผลึกของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA.....	88

รูปที่ 4.14 TGA และ DTG thermogram ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ (a,a') ไม่มีการเติม PLA-g-GMA และ (b,b') มีการเติม PLA-g-GMA.....	89
รูปที่ 4.15 สมบัติการดึงยึดของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA (a) Young's modulus (b) Tensile strength และ (c) Elongation at break.....	92
รูปที่ 4.16 สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA	95
รูปที่ 4.17 ค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิต PLA/GNP และ PBAT/GNP ที่ปริมาณการเติม GNP ต่าง ๆ [73].....	96
รูปที่ 4.18 EMI SE ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณการเติม CNT 10 phr ในช่วงความถี่ 700-2600 MHz.....	98
รูปที่ ก.1 สเปกตรัม NMR ของ PLA บริสุทธิ์ในช่วง 0-10 ppm.....	112
รูปที่ ก.2 สเปกตรัม NMR ของ PLA บริสุทธิ์ในช่วง 1-6 ppm.....	112
รูปที่ ก.3 สเปกตรัม NMR ของ GMA บริสุทธิ์ในช่วง 0-10 ppm.....	113
รูปที่ ก.4 สเปกตรัม NMR ของ GMA บริสุทธิ์ในช่วง 1.8-3.4 ppm.....	113
รูปที่ ก.5 สเปกตรัม NMR ของ GMA บริสุทธิ์ในช่วง 3.8-6.4 ppm.....	114
รูปที่ ก.6 สเปกตรัม NMR ของ PLA-g-GMA ในช่วง 0-10 ppm.....	114
รูปที่ ก.7 สเปกตรัม NMR ของ PLA-g-GMA ในช่วง 1-6 ppm.....	115
รูปที่ ก.8 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT	115
รูปที่ ก.9 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม PLA-g-GMA 3 %wt..	116
รูปที่ ก.10 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม PLA-g-GMA 6 %wt	116
รูปที่ ก.11 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม PLA-g-GMA 9 %wt	117
รูปที่ ก.12 สเปกตรัม Raman ของ CNT-COOH บริสุทธิ์.....	118
รูปที่ ก.13 สเปกตรัม Raman ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT.....	119
รูปที่ ก.14 สเปกตรัม Raman ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA.....	119

รูปที่ ก.15 สเปกตรัม Raman ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT 1 phr.....	120
รูปที่ ก.16 สเปกตรัม Raman ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT 3 phr.....	120
รูปที่ ก.17 สเปกตรัม Raman ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT 5 phr.....	121
รูปที่ ก.18 สเปกตรัม Raman ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT 10 phr	121
รูปที่ ก.19 สเปกตรัม Raman ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่มีการเติม PLA-g-GMA และ ปริมาณ CNT 1 phr.....	122
รูปที่ ก.20 สเปกตรัม Raman ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่มีการเติม PLA-g-GMA และ ปริมาณ CNT 3 phr.....	122
รูปที่ ก.21 สเปกตรัม Raman ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่มีการเติม PLA-g-GMA และ ปริมาณ CNT 5 phr.....	123
รูปที่ ก.22 สเปกตรัม Raman ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่มีการเติม PLA-g-GMA และ ปริมาณ CNT 10 phr.....	123
รูปที่ ก.23 XRD pattern ของ CNT บริสุทธิ์.....	124
รูปที่ ก.24 XRD pattern ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/C0.....	124
รูปที่ ก.25 XRD pattern ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA.....	125
รูปที่ ก.26 XRD pattern ของคอมพอสิต PLA/PBAT/C1	125
รูปที่ ก.27 XRD pattern ของคอมพอสิต PLA/PBAT/C3	126
รูปที่ ก.28 XRD pattern ของคอมพอสิต PLA/PBAT/C5	126
รูปที่ ก.29 XRD pattern ของคอมพอสิต PLA/PBAT/C10.....	127
รูปที่ ก.30 XRD pattern ของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C1	127
รูปที่ ก.31 XRD pattern ของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C3	128
รูปที่ ก.32 XRD pattern ของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C5	128
รูปที่ ก.33 XRD pattern ของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C10	129
รูปที่ ก.34 DSC thermogram ของคอมพอสิต PLA/PBAT/C1	130
รูปที่ ก.35 DSC thermogram ของคอมพอสิต PLA/PBAT/C3	130

รูปที่ ก.36 DSC thermogram ของคอมพอสิต PLA/PBAT/C5	131
รูปที่ ก.37 DSC thermogram ของคอมพอสิต PLA/PBAT/C10	131
รูปที่ ก.38 DSC thermogram ของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C1.....	132
รูปที่ ก.39 DSC thermogram ของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C3.....	132
รูปที่ ก.40 DSC thermogram ของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C5.....	133
รูปที่ ก.41 DSC thermogram ของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C10	133
รูปที่ ก.42 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT	134
รูปที่ ก.43 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA.....	134
รูปที่ ก.44 เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/C1	135
รูปที่ ก.45 เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/C3	135
รูปที่ ก.46 เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/C5	136
รูปที่ ก.47 เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/C10	136
รูปที่ ก.48 เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C1.....	137
รูปที่ ก.49 เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C3.....	137
รูปที่ ก.50 เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C5.....	138
รูปที่ ก.51 เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C10	138

บทที่ 1

บทนำ

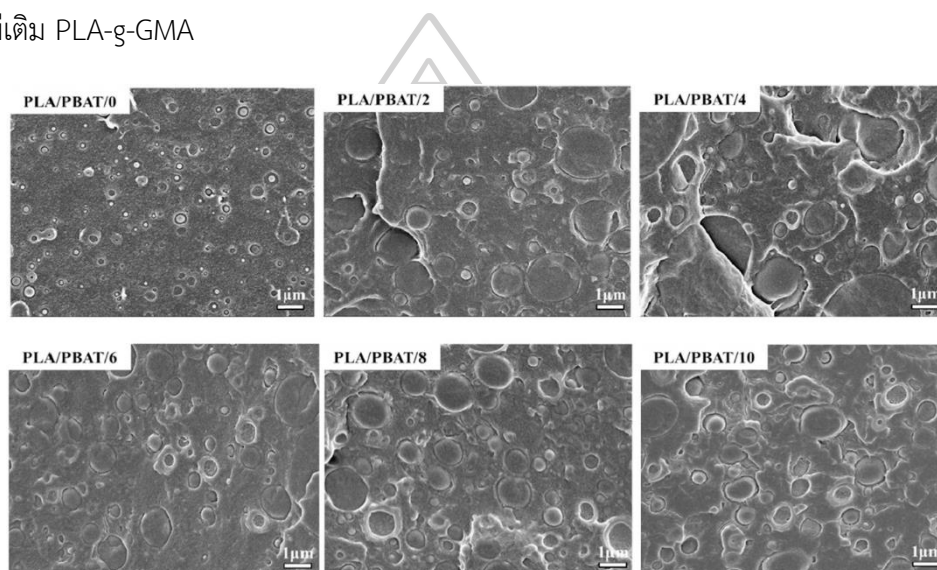
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กันอย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านการสื่อสาร การคมนาคม ด้านการแพทย์ และอื่น ๆ อีกมากมาย อย่างไรก็ตามการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นจะมีการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหล่านี้สามารถรบกวนการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นได้ เช่น ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำงานผิดพลาด เป็นต้น ดังนั้นในการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จึงจำเป็นต้องมีการป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interference; EMI) หรือทำให้อุปกรณ์มีความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic compatibility; EMC) ซึ่งวัสดุที่มีค่า EMC สูงจะมีความสามารถทำงานได้เหมาะสมโดยไม่ก่อให้เกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้ามากเกินไป [1] ดังนั้นสมบัติที่เหมาะสมที่ใช้ในการป้องกัน EMI หรือทำให้วัสดุมี EMC ที่ดี คือ สมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุ โดยวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าจะมีความสามารถในการป้องกัน EMI ได้ดีกว่าวัสดุที่เป็นฉนวน [2-4]

พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid; PLA) เป็นไบโอพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ทั้งในด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร อุปกรณ์ทางการแพทย์ หรือด้านการเกษตร เนื่องจาก PLA มีสมบัติเชิงกลที่โดดเด่นและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ อย่างไรก็ตาม PLA นั้นมีความเปราะ ซึ่งวิธีที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหานี้ คือ การเติมเทอร์โมพลาสติกที่มีความเหนียวสูงมาผสม เช่น พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate; PBS) พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลต (polybutylene adipate-co-terephthalate; PBAT) [5, 6] เป็นต้น

PBAT เป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งมีสมบัติคล้ายพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene; LDPE) เช่น มีความแข็งแรงสูง เหนียว มีความยืดหยุ่นสูง และขึ้นรูปได้ง่าย นิยมนำมาใช้ในการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร และนำมาปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งนิยมนำมาปรับปรุงสมบัติของ PLA แต่ในการปรับปรุงสมบัติของ PLA โดยการผสมกับ PBAT นั้นพบว่าพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีการแยกเฟสกันแบบเกาะในทะเล (sea-island morphology) [7, 8] ซึ่งปัญหานี้จะส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมเป็นอย่างมาก โดยการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด สามารถทำได้โดยการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันในงานวิจัยต่าง ๆ เช่น ในงานวิจัยของ Lyu และคณะ [8] ได้ปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBAT ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ 3D-printing โดยใช้พอลิแลคติกแอซิด-กราฟต์-ไกลซิซิลเมทาคริเลต (PLA-g-GMA) เป็นสารเพิ่มความ

เข้ากันได้ ซึ่งพบว่าการเติม PLA-g-GMA ในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้เฟสของ PBAT ที่กระจายตัวใน PLA มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น และที่บริเวณพื้นผิวของทั้งสองเฟส (interface) มีความเข้ากันได้มากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของ PLA-g-GMA มีหมู่อีพอกซีของ GMA ซึ่งจะไปเกิดปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลิกของ PBAT ในขณะที่สายโซ่ของ PLA บน PLA-g-GMA ก็จะเกิดการเกี่ยวพันกันกับสายโซ่ของ PLA ที่เป็นเมทริกซ์ ทำให้ระหว่างทั้งสองเฟสมีการยึดติดที่ดีขึ้น ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าที่บริเวณระหว่างรอยต่อของสองเฟสจะมีช่องว่างเล็กกลอง นอกจากนี้ยังเป็นการปรับปรุงค่า Tensile strength ให้มีค่าสูงขึ้น 86% เมื่อทำการเติม PLA-g-GMA ปริมาณ 10%wt เทียบกับกรณีไม่เติม PLA-g-GMA



รูปที่ 1.1 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ในปริมาณ PLA-g-GMA ตั้งแต่ 0-10 %wt [8]

คาร์บอนนาโนทิวบ์ (carbon nanotube; CNTs) เป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในการเสริมแรงและเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าให้กับวัสดุคอมพอสิต ซึ่งคอมพอสิต PLA/CNT ได้ถูกนำมาศึกษาวิจัยอย่างกว้างขวาง เนื่องจากแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการนำไฟฟ้า [2, 8-10] โดยในงานวิจัยของ Hassan และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณ CNT ที่มีต่อสมบัติการนำไฟฟ้าและสมบัติการติดไฟของ PLA/CNT พบว่าการเติม CNT ที่ปริมาณ 5 phr ทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 2.19×10^{-11} S/m ไปเป็น 2.00×10^{-4} S/m

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาผลของการเติม PLA-g-GMA ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ให้กับ PLA และ PBAT และศึกษาอิทธิพลของปริมาณ CNT ที่ส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของ

คอมพอสิต PLA/PBAT/CNT เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปวัสดุที่สามารถป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้จะต้องมีค่า EMI shielding effectiveness (EMI SE) มากกว่า 20 dB ซึ่งเป็นค่าทั่วไปของวัสดุป้องกันที่มีการจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 ศึกษาความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBAT โดยมี PLA-g-GMA ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้

1.2.2 ศึกษาผลของความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBAT และปริมาณ CNT ต่อสมบัติต่าง ๆ ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ทำการสังเคราะห์ PLA-g-GMA เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ โดยใช้วิธี Melt blending ด้วยเครื่อง Internal mixer ที่มีไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator)

1.3.2 สัดส่วนการผสมของ PLA/PBAT ในงานวิจัยนี้ คือ 60/40 โดยน้ำหนัก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ทราบถึงผลของปริมาณ PLA-g-GMA ที่ส่งผลต่อความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBAT

1.4.2 ทราบถึงผลของความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBAT และปริมาณ CNT ต่อสมบัติต่าง ๆ ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT

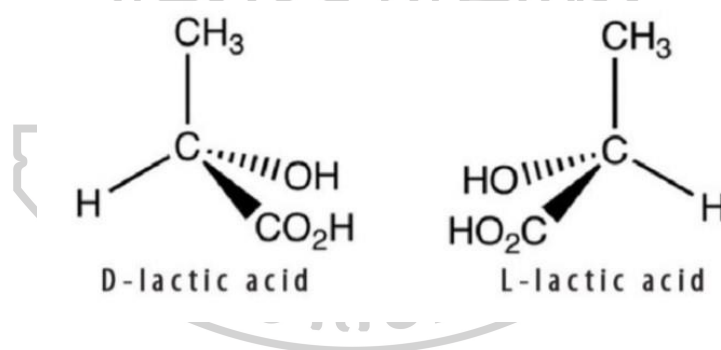
1.4.3 ทราบถึงความน่าจะเป็นในการนำคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ไปประยุกต์ใช้ในการป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid; PLA)

พอลิแลคติกแอซิดเป็นพลาสติกชีวภาพที่สลายตัวได้ (compostable polymer) โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตสามารถหาได้จากทรัพยากรที่ทดแทนได้ เช่น แป้งที่ได้จากพืช เป็นต้น โดยในปัจจุบันนักวิจัยได้ค้นพบเทคนิคการผลิต PLA ที่ทำให้ได้น้ำหนักโมเลกุลสูงและมีต้นทุนการผลิตที่เหมาะสม จึงส่งผลให้ PLA ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายมากขึ้น โดย PLA มีสมบัติที่โดดเด่น ได้แก่ สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ ผลิตจากวัตถุดิบยั่งยืน (sustainable sources) มีความเป็นพิษต่ำ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แปรรูปได้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ เมื่อเทียบกับโลหะหรือแก้ว นอกจากนี้ยังมีสมบัติการป้องกันการซึมผ่าน (barrier properties) น้ำและอากาศ สามารถพิมพ์ลวดลายต่าง ๆ บนพื้นผิววัสดุได้ จึงทำให้ PLA จัดเป็นวัสดุที่มีศักยภาพและสามารถแก้ไขปัญหาคำจำกัดขยะ อีกทั้งภาคอุตสาหกรรมยังนำ PLA มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารและผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคอื่น ๆ โดยรูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างทางเคมีของกรดแลคติกซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ PLA [12, 13]



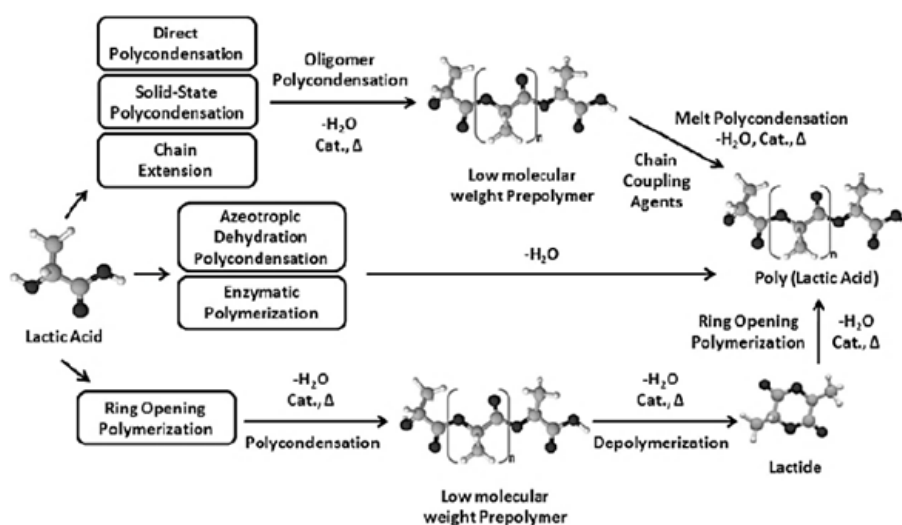
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของกรดแลคติก [12]

เนื่องจากกรดแลคติกมีสองไอโซเมอร์ สายโซ่หลักของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่อาจประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ชนิดแอล-ไอโซเมอร์เกือบทั้งหมด จะได้เป็นพอลิแอล-แลคติกแอซิด (poly(L-lactic acid); PLLA) หรือประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ที่เป็นของผสมราซิมิก (racemic) ทำให้ได้พอลิดี,แอล-แลคติกแอซิด (poly(D,L-lactic acid); PDLLA) ปัจจุบันการผลิตดี-ไอโซเมอร์ของกรดแลคติก บริสุทธิ์ทำได้ยาก การผลิตพอลิเมอร์ที่สายโซ่หลักประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดดี-ไอโซเมอร์หรือ PDLA จึงยังไม่มีในเชิงพาณิชย์ โดยไอโซเมอร์ที่แตกต่างกันส่งผลต่อความเป็นผลึกของ

พอลิเมอร์ กล่าวคือ PLLA จะมีความเป็นผลึกสูง ในขณะที่ PDLA จะมีความเป็นอสัณฐาน (amorphous) ที่สูง

2.1.1 กระบวนการผลิต PLA

กระบวนการในการผลิต PLA สามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายวิธี เช่น ปฏิกิริยาควบแน่นโดยตรง (direct polycondensation) ปฏิกิริยาการควบแน่นในสถานะของแข็ง (solid-state polycondensation) ปฏิกิริยาการต่อสายโซ่ (chain extension) ปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอะซิโตรีโตรีค (azeotropic polycondensation) การสังเคราะห์โดยการเปิดวง (ring-opening polymerization) และการสังเคราะห์ผ่านการเกิดแลคไทด์ (lactide formation) โดยรูปที่ 2.2 จะแสดงกลไกการสังเคราะห์ PLA



รูปที่ 2.2 ภาพรวมกลไกการสังเคราะห์ PLA [12]

2.1.2 สมบัติของ PLA

2.1.2.1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล

สำหรับ PLA ที่ไม่ผ่านการดึงยืด (unoriented PLA) มีความเปราะมาก แต่จะมีความคงรูปและความแข็งแรง (strength) สูง แต่เมื่อนำ PLA ไปผ่านการดึงยืด PLA จะมีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (polyethylene terephthalate; PET) และมีสมบัติดีกว่าพอลิสไตรีนที่ผ่านการดึงยืด สำหรับมอดุลัสแรงดึงและแรงดัด (tensile and flexural modulus) ของ PLA นั้นจะมีค่าสูงกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene; HDPE) และพอลิพรอพิลีน (polypropylene; PP) แต่ความแข็งแรงในการรับแรงกระแทก (Izod impact strength) และระยะยืด ณ จุดแตกหัก (elongation at break) จะมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ [14, 15]

2.1.2.2 สมบัติทางความร้อน

PLA มีอุณหภูมิคล้ายแก้ว (glass transition temperature; T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลว (crystalline melting temperature; T_m) ค่อนข้างสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกทั่วไป ซึ่งค่า T_g จะขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและอัตราส่วนระหว่างอีแนนซีโอเมอร์ โดยพบว่า T_g มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักโมเลกุล นอกจากนี้การผสมแอล-ไอโซเมอร์เข้ากับดี-ไอโซเมอร์ ทำให้ T_g ของ PLA มีแนวโน้มลดลง [15]

ในขณะที่อุณหภูมิ T_m ของ PLA จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์เชิงแสงของพอลิเมอร์ โดย T_m สูงสุดที่พบใน PLA ที่มีความบริสุทธิ์มีค่าประมาณ 180 °C และ PLA มีค่าเอนทัลปีของการหลอมเหลว 40-50 J/g โดยที่ T_m ของ PLA จะลดลง เมื่อมีปริมาณของ D-lactide เป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้น [16] โดยตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติทางความร้อนของ PLA

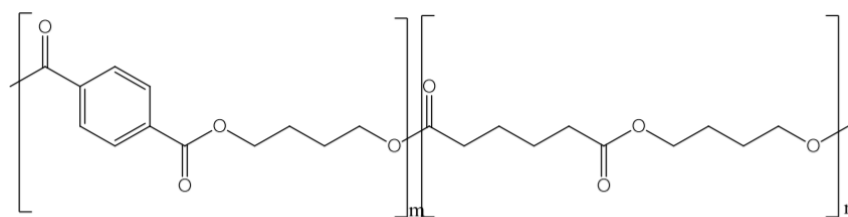
ตารางที่ 2.1 สมบัติทางความร้อนของ PLA [16]

Property	Unit	Condition	Value
Glass transition temperature; T_g	K	L-PLA of various molecular weights	326-337
		L-PLA with dichloromethane	-
		D, L-PLA of various molecular weights	323-330
		D, L-PLA with dichloromethane	-
Melting point; T_m	K	D-PLA injection-molded, $M_v = 21,000$	444.4
		L-PLA of various molecular weights	418-459
Decomposition temperature; T_d	K	L-PLA of $M_w = (0.5-3) \times 10^5$	508-528
		D, L-PLA of $M_w = (0.21-5.5) \times 10^5$	528

อย่างไรก็ตาม PLA นั้นมีข้อเสียจากการที่มีความแข็งเปราะมาก ซึ่งวิธีที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหา คือ การเติมเทอร์โมพลาสติกที่มีความเหนียวสูงมาผสม เช่น PBS หรือ PBAT [5, 6] เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือก PBAT มาทำการผสมเพื่อปรับปรุงความยืดหยุ่นและความเหนียวของ PLA

2.2 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลต (polybutylene adipate-co-terephthalate; PBAT)

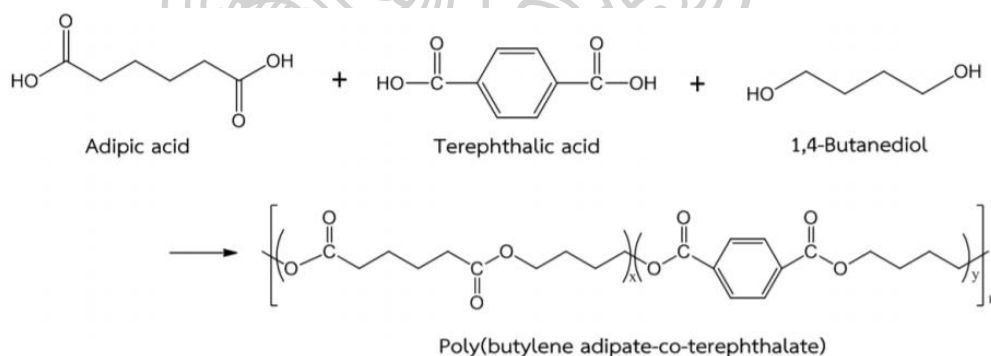
PBAT เป็นพลาสติกชีวภาพที่ได้จากผลิตภัณฑ์จากแหล่งปิโตรเคมี ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และจากการที่ PBAT เป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์และวงอะโรมาติกเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของสายโซ่หลักแสดงดังรูปที่ 2.3 ทำให้มีความแข็งแรง เหนียว ขึ้นรูปได้ง่าย และมีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งมีสมบัติคล้ายคลึงกับ LDPE ดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมนำ PBAT มาประยุกต์ใช้งานในด้านการผลิตฟิล์มประเภทต่าง ๆ [17] อย่างไรก็ตามต้นทุนการผลิต PBAT ยังมีราคาสูงในปัจจุบัน



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของ PBAT [17]

2.2.1 กระบวนการสังเคราะห์ PBAT

PBAT สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาควมนั้น (condensation polymerization) ของมอนอเมอร์ 3 ชนิด คือ กรดเทรฟทาลิกแอซิด (terephthalic acid) กรดอะดิปิก (adipic acid) และ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) ดังรูปที่ 2.4 โดย PBAT มี T_m ระหว่าง 110-130 °C และ T_g อยู่ที่ -30 °C มีสมบัติการย่อยสลายและสมบัติทางกายภาพที่น่าพอใจสำหรับภาคอุตสาหกรรม และสามารถนำไปใช้งานทางการแพทย์ได้หากมีการเติมสารเสริมแรง [17]



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PBAT [17]

2.3 การปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม [18]

การทำพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) เป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก โดยการนำพอลิเมอร์สองชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ สารละลาย (solution) หรือสารหลอมเหลว (molten) มาผสมให้อยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกันได้เป็นพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีสมบัติที่โดดเด่นของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันนั้นโดยธรรมชาติแล้วจะเป็นไปได้ยาก พอลิเมอร์ผสมที่ได้จึงไม่เป็นสารละลายของแข็งที่แท้จริง และพบว่าเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะกระจายตัว (disperse) อยู่ในเนื้อหรือเมทริกซ์ที่ต่อเนื่อง (continuous matrix) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ทั้งนี้การกระจายตัวดังกล่าวต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ มิฉะนั้นจะทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่อง (defects) ของผลิตภัณฑ์ และส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงสภาพเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน ซึ่งบางชนิดสามารถเข้ากันได้ดี แต่บางชนิดก็ไม่สามารถเข้ากันได้ เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่ต่างกัน จึงไม่สามารถกระจายตัวอย่างอิสระหรือเกิดการแยกชั้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยทางพลังงาน (energy factor) ที่ทำให้พอลิเมอร์สองชนิดเข้ากันไม่ได้ นั่นคือพลังงานที่ใช้ในการผสมผสานโมเลกุลหรือสายโซ่ของพอลิเมอร์ เช่น การตูดกลืนพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่ต่างกัน เป็นต้น

พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่จะทำให้สมบัติที่ค่อนข้างต่ำโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ทั้งนี้เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัส (interfacial interaction) ที่ต่ำและความเค้นสะสม (stress concentration) จะกระจายอยู่ในเมทริกซ์ ดังนั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ในการผสม จึงนิยมใช้สารช่วยผสมหรือทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผสม (in-situ chemical reaction) เพื่อปรับปรุงแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสม เพื่อให้ได้สัณฐานวิทยาและสมบัติของพอลิเมอร์ที่เหมาะสม

ในการผสม PLA และ PBAT ก็มีลักษณะดังที่กล่าวมา คือ มีความไม่เข้ากัน โดยจากงานวิจัยของ Urquijo และคณะ [19] พบว่าสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT นั้นจะมีลักษณะแยกเฟสกัน โดยเฟสที่มีอัตราส่วนน้อยกว่าจะกระจายตัวอยู่ในเฟสที่มีอัตราส่วนที่มากกว่า หรือมีลักษณะแบบ Sea-island สิ่งนี้จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ต้องมีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBAT ซึ่งการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมมีหลายวิธี [18] ได้แก่

2.3.1 การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (addition of block or graft copolymer)

การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการผสมเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ บล็อกโคพอลิเมอร์จะได้รับความนิยมมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยเฉพาะบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกของพอลิเมอร์ที่เหมือนกันกับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมจะไปเชื่อมประสานระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิด [18]

2.3.2 การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (addition of functional/reactive polymers)

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ บ่อยครั้งเป็นการนำพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะทำการผสมมาดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาหรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจนกับพอลิเมอร์ชนิดที่สอง กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์หรือผ่านกระบวนการอัดรีด เช่น มาเอลิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์บนสายโซ่ของพอลิโอเลฟินส์ โดยหมู่คาร์บอกซิลิกของแอนไฮไดรด์มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่อะมิโนของพอลิเอไมด์ได้ [18]

2.3.3 การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไรเซชันในระหว่างการผสม (in-situ grafting polymerization)

การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไรเซชันในระหว่างการผสมหรือ Reactive blending เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันได้ โดยต่างจากวิธีอื่น ๆ คือ องค์ประกอบที่ทำการผสมจะถูกนำมาดัดแปร เพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ ยกตัวอย่างเช่น การผสมระหว่างพอลิคาร์บอนเนตกับพอลิเอสเทอร์ แม้ว่าในบางครั้งการผสมแบบไม่ต่อเนื่องสามารถนำมาใช้กับการผสมแบบ Reactive blending ได้ แต่การใช้กระบวนการผสมแบบต่อเนื่อง เช่น การอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single-screw extruder) และการอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin-screw extruder) ก็ได้รับความนิยมเช่นกัน เพราะกระบวนการดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่า [18]

2.4 การนำไฟฟ้าของวัสดุ [20]

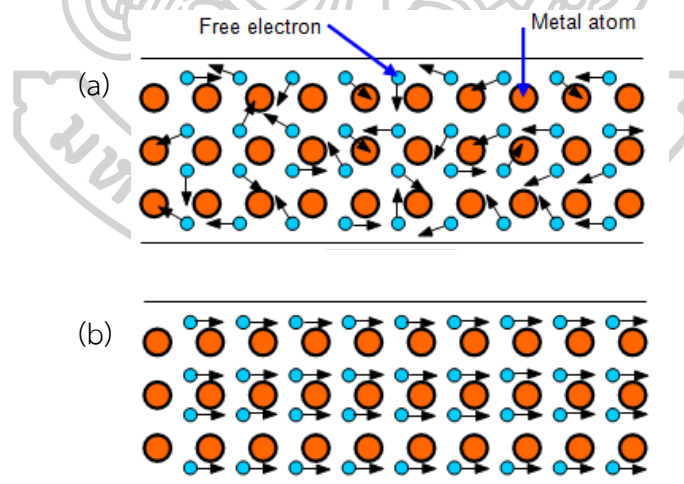
การนำไฟฟ้าของวัสดุเป็นสมบัติในการยอมให้ประจุไฟฟ้าผ่านได้ วัสดุที่กระแสไฟฟ้าผ่านได้ดี เรียกว่า ตัวนำไฟฟ้า (electrical conductor) หรือเรียกสั้นๆว่า ตัวนำ (conductor) ส่วนวัสดุที่กระแสไฟฟ้าผ่านได้ไม่ดีหรือผ่านไม่ได้ เรียกว่า ฉนวนไฟฟ้า (electrical insulator) หรือเรียกสั้นๆว่า ฉนวน (insulator)

2.4.1 การนำไฟฟ้า (conductivity) [21]

วัตถุใดที่ได้รับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนแล้วอิเล็กตรอนที่ถูกถ่ายโอนไปสามารถเคลื่อนที่ไปตลอดเนื้อวัตถุได้ง่าย คือ อิเล็กตรอนมีอิสระในการเคลื่อนที่ในวัตถุนั้น จะเรียกว่วัตถุที่มีสมบัติเช่นนั้นว่า ตัวนำไฟฟ้า ซึ่งสมบัตินี้จะตรงข้ามกับฉนวนไฟฟ้า ซึ่งไม่ยอมให้ประจุไฟฟ้าไหลผ่าน

2.4.1.1 การนำไฟฟ้าในโลหะ [21, 22]

โลหะประกอบด้วยอะตอมที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 1-3 ตัว ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะหลุดออกจากอะตอมได้ง่ายและเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา จึงเรียกว่า อิเล็กตรอนอิสระ (free electron) ซึ่งจะมีการเคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian motion) ดังรูปที่ 2.5 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในโลหะ



รูปที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในโลหะ (a) เมื่อไม่มีการให้ความต่างศักย์ และ (b) เมื่อมีความต่างศักย์เกิดขึ้นระหว่างปลายทั้งสองของโลหะ [21]

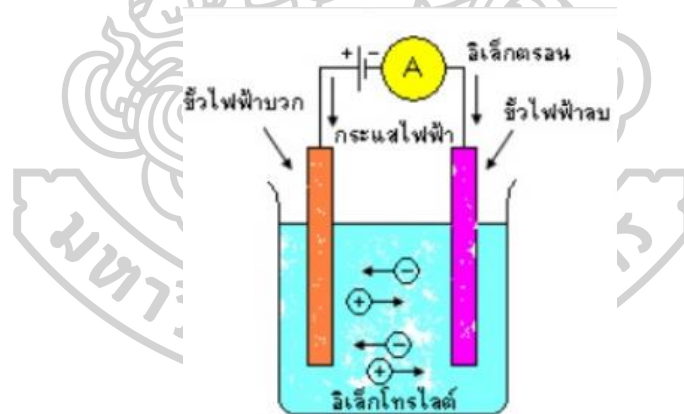
2.4.1.2 การนำไฟฟ้าในหลอดสุญญากาศ [21, 22]

หลอดสุญญากาศ เป็นหลอดแก้วซึ่งสุบอากาศภายในออกเกือบหมด มีขั้วสำหรับให้อิเล็กตรอน เรียกว่า แคโทด (cathode) และขั้วสำหรับรับอิเล็กตรอน เรียกว่า แอโนด (anode)

การทำให้ศักย์ไฟฟ้าของแอโนดสูงกว่าแคโทด อิเล็กตรอนจะถูกเร่งจากแคโทดผ่านบริเวณสุญญากาศมายังแอโนด จึงมีกระแสไฟฟ้าในหลอดสุญญากาศ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าในหลอดสุญญากาศเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

2.4.1.3 การนำไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์ [21, 22]

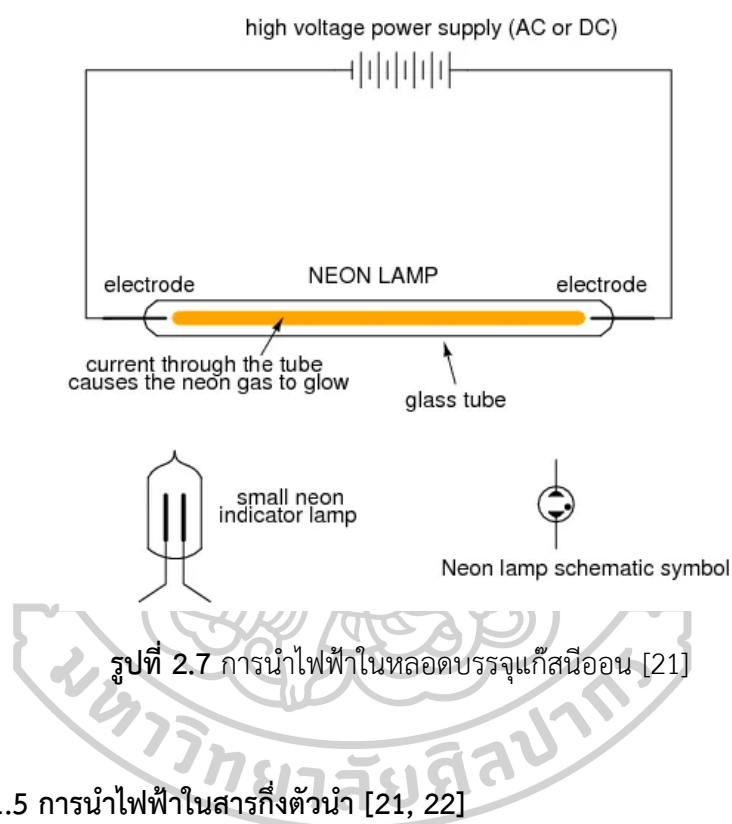
สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นสารละลายที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งอาจเป็นสารละลายของกรด เบส หรือเกลือ เช่น สารละลายกรดกำมะถัน โดยเมื่อจุ่มแท่งโลหะ 2 แท่งที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าลงไป ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะทำให้สารละลายแตกตัวเป็นไอออน โดยไอออนบวกจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟาลบและไอออนลบจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าบวก ดังรูปที่ 2.6 แสดงการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ [21]

2.4.1.4 การนำไฟฟ้าในหลอดบรรจุแก๊ส [21, 22]

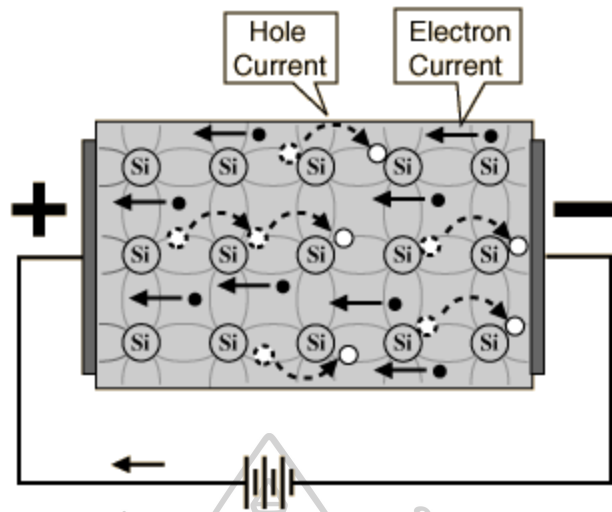
หลอดบรรจุแก๊ส เป็นหลอดแก้วซึ่งสูบอากาศออกและบรรจุแก๊สบางชนิดเข้าไป เช่น ไฮโดรเจน นีออน อาร์กอน โดยความดันของแก๊สในหลอดแก้วต่ำกว่าความดันบรรยากาศ การทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วหลอดทั้งสองสูงเพียงพอ จะทำให้โมเลกุลของแก๊สแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนอิสระแล้วเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า รูปที่ 2.7 แสดงการนำไฟฟ้าในหลอดบรรจุแก๊ส นีออน



รูปที่ 2.7 การนำไฟฟ้าในหลอดบรรจุแก๊สนีออน [21]

2.4.1.5 การนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ [21, 22]

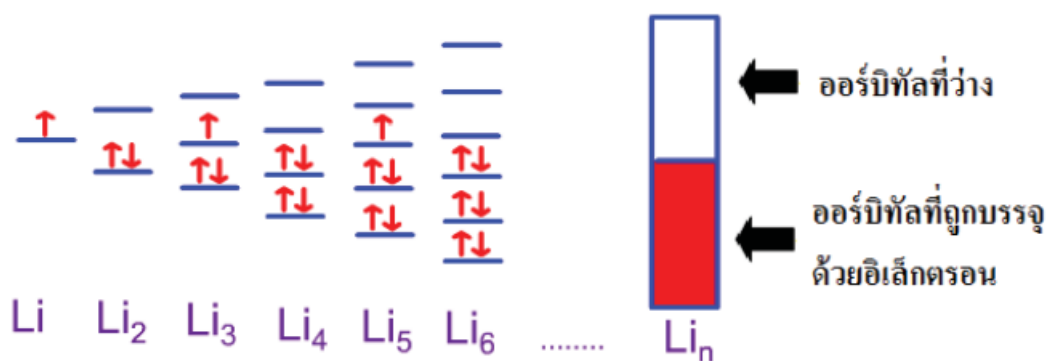
เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มข้นมากพอผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำจะทำให้อิเล็กตรอนบางตัวในสารกึ่งตัวนำหลุดออกมากลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระและเกิดที่ว่าง เรียกว่า โฮล (hole) โฮลจะมีพฤติกรรมคล้ายอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าบวก แรงแเคลื่อนจากสนามไฟฟ้าที่กระทำต่ออิเล็กตรอนอิสระและโฮลจะมีทิศทางตรงข้าม ทำให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮลเคลื่อนที่ โดยอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า ส่วนโฮลเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.8 แสดงการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.8 การนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ [21]

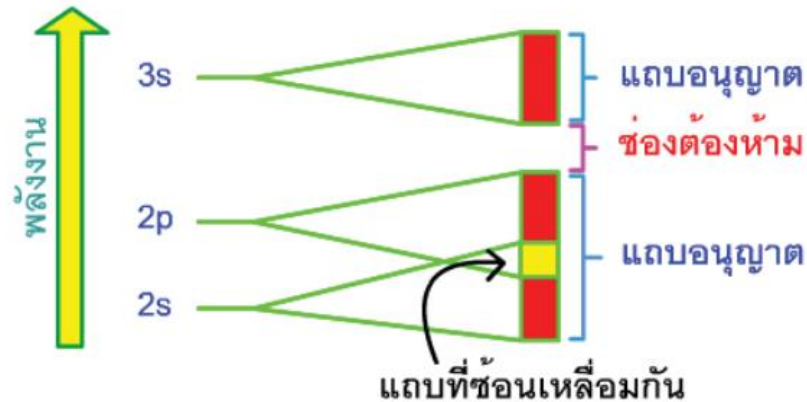
2.4.2 ทฤษฎีแถบพลังงาน (band theory) [23]

เมื่อออร์บิทัลของอะตอมสองออร์บิทัลมารวมกันจะได้ออร์บิทัลโมเลกุลสองชนิด คือ ออร์บิทัลโมเลกุลแบบมีพันธะ (bonding molecular orbital) และออร์บิทัลโมเลกุลแบบต้านพันธะ (antibonding molecular orbital) เมื่อมีอะตอมมากขึ้นและจำนวนออร์บิทัลโมเลกุลมากขึ้น ระดับพลังงานจะใกล้ชิดกันมากขึ้นจนเหมือนเป็นแถบต่อเนื่องกัน ซึ่งจะเรียกแถบนี้ว่า แถบพลังงาน (energy band) แสดงดังรูปที่ 2.9



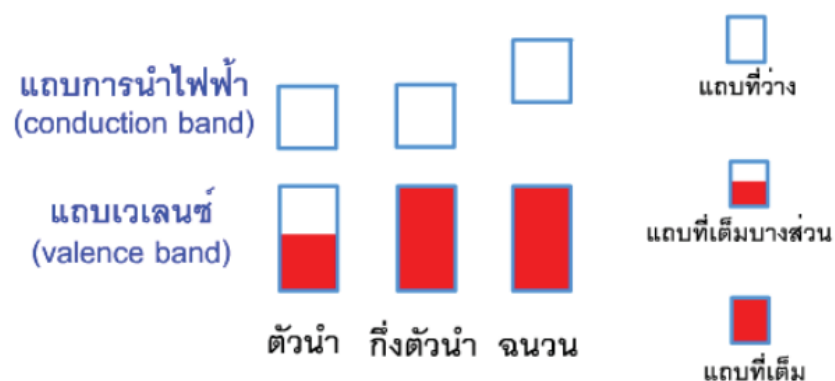
รูปที่ 2.9 แถบพลังงานของออร์บิทัลในกลุ่มอะตอมของลิเทียม [23]

อิเล็กตรอนจะมีพลังงานค่าต่าง ๆ ได้ภายในแถบหรือภายในแถบที่มีการซ้อนเหลื่อมกันเท่านั้น แถบพลังงานนี้ เรียกว่า แถบอนุญาต (allowed band) สำหรับช่วงว่างที่ไม่มีแถบพลังงาน เรียกว่า ช่องต้องห้าม (forbidden gap) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แถบพลังงานของอิเล็กตรอน [23]

เมื่อพิจารณากรณีของตัวนำไฟฟ้าจะพบว่าแถบเวเลนซ์มีลักษณะเป็นแถบที่เต็มบางส่วน คือในออร์บิทัลมีทั้งส่วนที่ว่างและส่วนที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ โดยเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าก็จะสามารถเคลื่อนที่ไปอยู่ในส่วนที่ว่างของออร์บิทัลได้ ทำให้นำไฟฟ้าได้ โดยรูปที่ 2.11 แสดงแถบพลังงานของวัสดุประเภทต่าง ๆ

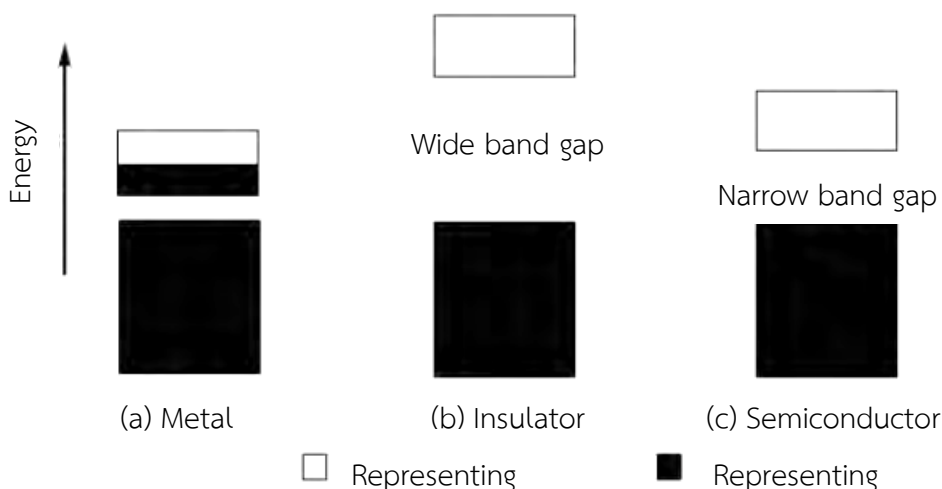


รูปที่ 2.11 แถบพลังงานอิเล็กตรอนของวัสดุชนิดต่าง ๆ [23]

2.5 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า [24]

พอลิเมอร์นำไฟฟ้าโดยทั่วไปจะมีระบบ π -conjugation อยู่ในโครงสร้างโมเลกุล กล่าวคือมีการซ้อนเหลื่อมกันของ p-orbital ของแต่ละอะตอม ส่งผลให้ทำให้เกิด Delocalization ของอิเล็กตรอนได้ การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้านั้นสามารถอธิบายได้โดย Band theory ซึ่งกล่าวว่าในการสร้างพันธะเคมี ออร์บิทัลอะตอมสองออร์บิทัลมารวมกันจะเกิดออร์บิทัลโมเลกุลสองชนิด คือ ออร์บิทัลโมเลกุลแบบมีพันธะ และออร์บิทัลโมเลกุลแบบต้านพันธะ โดยวัสดุพวก sp^2 hybridized π -electron เช่น พอลิเมอร์ไม่อิ่มตัวจะสร้างออร์บิทัลแบบมีพันธะ π และออร์บิทัลแบบต้านพันธะ π รวมทั้งจะสร้างแถบพลังงาน คือ ระดับชั้นพลังงานที่บรรจุอิเล็กตรอน (occupied π band) และระดับชั้นพลังงานที่ไม่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ โดยแถบพลังงานทั้งสองนี้จะมีพลังงานที่แบ่งแยกกัน โดยระดับชั้นพลังงานสูงสุดที่บรรจุอิเล็กตรอน (highest occupied molecular orbital; HOMO) เรียกว่า แถบวาเลนซ์ (valence band) และระดับชั้นพลังงานต่ำสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ (lowest unoccupied molecular orbital; LUMO) เรียกว่า แถบการนำ (conduction band) ความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานของแถบวาเลนซ์และแถบการนำ เรียกว่า Band gap สำหรับพอลิเมอร์นำไฟฟ้าจำพวก Linear π -conjugate ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง เช่น ความยาวของสายโซ่ ความเป็นระนาบ การมีหมู่แทนที่ที่มีสมบัติเป็นหมู่ให้อิเล็กตรอน (electron donor) หรือหมู่รับอิเล็กตรอน (electron acceptor) และความเสถียรของพลังงานเรโซแนนซ์ของวงแหวนอะโรมาติก จะส่งผลต่อค่าของ Band gap ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าจะคล้ายคลึงกับการนำไฟฟ้าของวัสดุจำพวกสารกึ่งตัวนำ นั่นคือ ที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนจะใช้พลังงานจากภายนอกมากระตุ้น เพื่อให้เคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำ ดังนั้นพอลิเมอร์ที่มี Band gap กว้างจะนำไฟฟ้าได้ไม่ดีหรือไม่นำไฟฟ้า เนื่องจากพลังงานที่ต้องใช้ในการข้ามช่องว่างมีไม่เพียงพอ โดยรูปที่ 2.12 แสดงถึงแถบพลังงานของสารตัวนำแต่ละชนิด

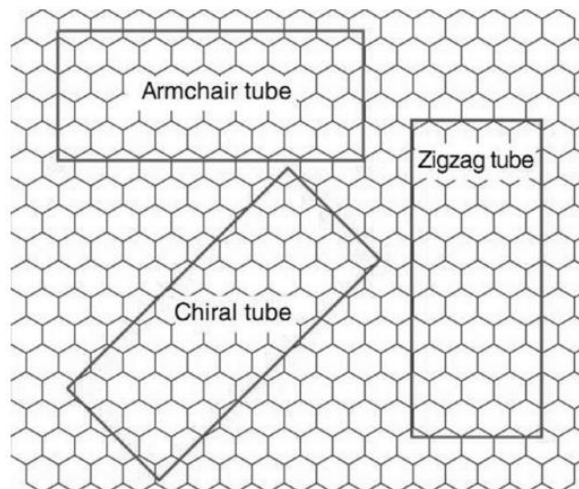


รูปที่ 2.12 Energy band gap ของ (a) โลหะ (b) ฉนวน และ (c) สารกึ่งตัวนำ [24]

2.6 คาร์บอนนาโนทิวบ์ (carbon nanotube; CNT) [25]

คาร์บอนนาโนทิวบ์ เป็นวัสดุที่มีสมบัติโดดเด่นหลายประการ เช่น มีค่าการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนเป็นเลิศ เป็นได้ทั้งวัสดุตัวนำหรือกึ่งตัวนำ เมื่อนำแผ่นแกรฟีนมาม้วนให้มีรูปร่างเป็นท่อ จะได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ โดยการเกิดการเปลี่ยนแปลงพันธะจากไฮบริดออร์บิทัล sp^2 ของแผ่นแกรฟีนเป็นพันธะที่อยู่ระหว่าง sp^2 และ sp^3 ที่มีการโค้งงอ หรือม้วนงอที่ตั้งเกิดในคาร์บอนนาโนทิวบ์ ซึ่งทำให้เกิดความเครียดของพันธะ (bond strain) มากขึ้น เพราะต้องมีการเหนี่ยวรั้ง เพื่อให้มีการโค้งงอ ปริมาณความเครียดของพันธะขึ้นกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของการม้วน ถ้าคาร์บอนนาโนทิวบ์มีขนาดเล็กมากจะมีความเป็น sp^3 มากกว่า มีความเครียดของพันธะมากกว่า แต่ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดใหญ่ขึ้น พันธะก็จะผ่อนคลายมากขึ้นมีความเครียดของพันธะลดลง และมีความใกล้เคียงกับแผ่นแกรฟีนมากยิ่งขึ้นไปด้วย ซึ่งจะมีความเป็น sp^2 มากกว่านั่นเอง

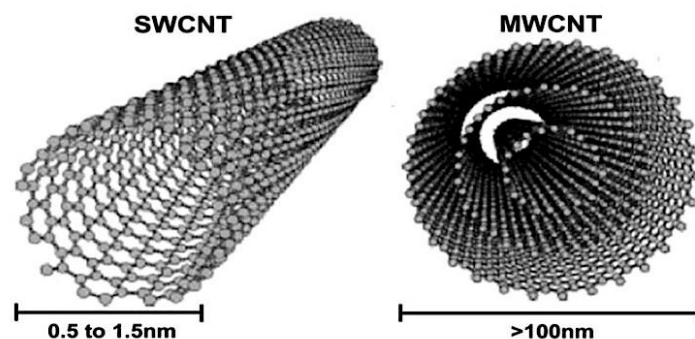
คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นวัสดุระดับนาโนที่มีความยาวโดดเด่นออกไปใน 1 มิติ (1D nanomaterial) อะตอมในโครงสร้างอยู่ที่ผิวทั้งหมด ทำให้มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาสูง เนื่องจากอะตอมที่ผิวสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมรอบตัวได้ทุกอะตอม มีการจัดเรียงตัวหลายแบบขึ้นกับทิศทางของการม้วนแผ่นแกรฟีนด้วยแฟกเตอร์ของการเป็นเกลียว (chiral factor) แบ่งออกได้เป็น คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบอาร์มแชร์ (armchair) ไครอล (chiral) และซิกแซก (zigzag) ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การจัดเรียงตัวของคาร์บอนนาโนทิวบ์ [25]

คาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถแบ่งออกเป็นสองชนิดตามจำนวนชั้นของผนังท่อ ดังนี้

1. คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว (single-walled carbon nanotube; SWCNT) มีลักษณะเป็นท่อกลวง ซึ่งคล้ายกับการม้วนแผ่นแกรไฟต์หนึ่งแผ่นให้เป็นท่อทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาด 0.5-1.5 nm มีโครงสร้างที่เป็นระเบียบ
2. คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น (multi-walled carbon nanotube; MWCNT) มีลักษณะเหมือนแผ่นแกรไฟต์ที่ม้วนเป็นท่อกลวงซ้อนกันตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไป โดยที่แต่ละชั้นอยู่ห่างกันประมาณ 0.34-0.36 nm เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของคาร์บอนนาโนทิวบ์ผนังหลายชั้นมีขนาดประมาณ 1.5-15 nm ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกมีขนาดมากกว่า 100 nm ดังรูปที่ 2.14 [26]



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียวและผนังหลายชั้น [26]

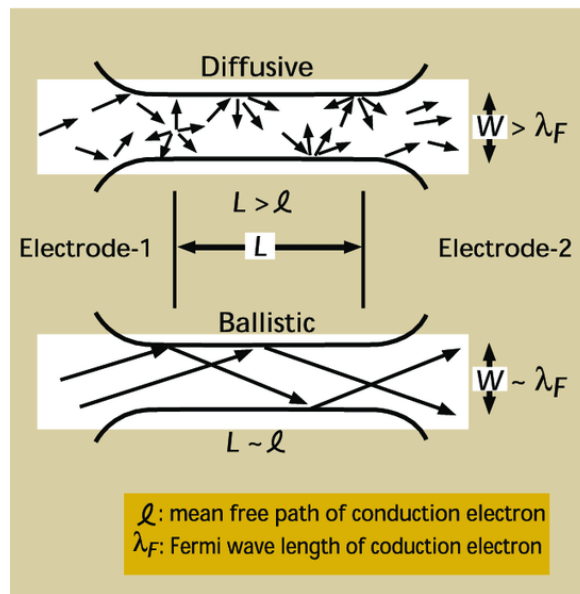
2.6.1 สมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์

1. **สมบัติเชิงกล** เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นวัสดุนาโนแบบ 1 มิติ ที่มีความยาวด้านหนึ่งยืดยาวออกไป นอกจากนี้คาร์บอนนาโนทิวบ์เกิดจากการสร้างด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่มีความแข็งแรงที่สุด ทำให้ความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ของคาร์บอนนาโนทิวบ์มีค่าสูงมากในทิศทางตามยาว โดยตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของคาร์บอนนาโนทิวบ์กับวัสดุอื่น ๆ

ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของคาร์บอนนาโนทิวบ์เทียบกับวัสดุอื่น ๆ [26]

วัสดุ	ค่ามอดูลัสของยัง (GPa)	ค่าความต้านทานแรงดึง (GPa)	ค่าความหนาแน่น (g/cm ³)
SWNTs	1054	150	1.33
MWNTs	1200	150	2.6
Steel	208	0.4	7.8
Epoxy	3.5	0.005	1.25
Wood	16	0.008	0.6

2. **สมบัติการนำไฟฟ้า** สำหรับกรณีคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้น แรงระหว่างชั้นของคาร์บอนนาโนทิวบ์จะยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นวัสดุนาโนที่อิเล็กตรอนถูกกักบริเวณให้เคลื่อนที่ได้ในทิศทางตามความยาวของท่อในทิศทางเดียว และระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) ของอิเล็กตรอนมีค่าใกล้เคียงกับขนาดของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่ไม่มีความต้านทาน ไม่มีการชนกันของอิเล็กตรอนหรือเรียกว่า การนำไฟฟ้าแบบบอลลิสติก (ballistic conduction) ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งสำหรับวัสดุปริมาณมวล (bulk materials) ทั่วไปอิเล็กตรอนจะมีการเคลื่อนย้ายแบบแพร่กระจาย (diffusive conduction) โดยไม่ขึ้นกับรูปร่างกับระบบ ทำให้เกิดการชนกันของอิเล็กตรอนและอาจส่งผลให้เกิดความต้านทานไฟฟ้าในระบบขึ้น ดังนั้นคาร์บอนนาโนทิวบ์จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุอิเล็กทรอนิกส์เพื่อลดความต้านทานไฟฟ้า [25, 27]



รูปที่ 2.15 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบ Diffusive และ Ballistic ในเส้นลวด 1 มิติ

2.6.2 การปรับปรุงพื้นผิวคาร์บอนนาโนทิวบ์ (surface modification of carbon nanotube)

คาร์บอนนาโนทิวบ์มีความสำคัญอย่างมากและถูกนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ อย่างหลากหลาย โดยโครงสร้างท่อเหล่านี้มีความแข็งแรงอย่างมาก และมี Aspect ratio สูง อีกทั้งยังมีสมบัติการนำความร้อนและการนำไฟฟ้าที่โดดเด่น อย่างไรก็ตามการปรับปรุงทางเคมีของคาร์บอนนาโนทิวบ์มีความจำเป็นในการนำไปประยุกต์ใช้งาน เพื่อส่งเสริมสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงกล [27] ซึ่งปัญหาที่สำคัญคือการกระจายตัวและความเข้ากันได้ของ CNT กับสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหรือพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งวิธีการปรับปรุงพื้นผิวของคาร์บอนนาโนทิวบ์มีหลายวิธี ได้แก่

2.6.2.1 การปรับปรุงด้วยโคเวเลนต์ (covalent modification)

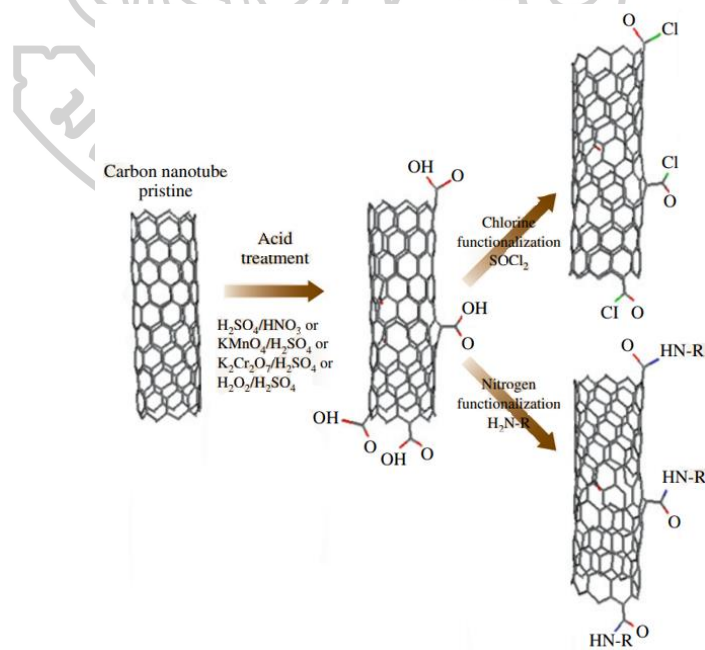
ในการปรับปรุงคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นโคเวเลนต์มีขั้นตอนการทำ คือ

1. สร้างความบกพร่องที่พื้นผิว และทำให้มีหมู่ฟังก์ชันเกิดขึ้นบนบริเวณที่มีความบกพร่อง
2. สร้างหมู่คาร์บอกซิลิกที่ปลายคาร์บอนนาโนทิวบ์และทำให้เกิดอนุพันธ์จากการใช้กรด

โดยเฉพาะอย่างยิ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียวที่มีหมู่ฟังก์ชันโคเวเลนต์สามารถสังเคราะห์ได้ผ่าน 3 วิธี ได้แก่ การกระตุ้นทางเคมีด้วยความร้อน (thermally activated chemistry) การปรับปรุงทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical modification) และ การทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วยแสง (photochemical functionalization) สำหรับคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังหลายชั้นก็มีการพัฒนาวิธีการทำให้มีหมู่ฟังก์ชันโคเวเลนต์ แต่มีการศึกษาน้อยกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์แบบผนังชั้นเดียว [28]

2.6.2.2 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

มีงานวิจัยมากมายที่ประสบความสำเร็จในการปรับปรุงคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น การทำโซนิเคชัน (sonication) ในสารผสมระหว่างกรดซัลฟิวริกและกรดไนตริก หรือการปรับปรุงด้วยสารผสมระหว่างกรดซัลฟิวริก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ในสารละลายกรด กระบวนการเหล่านี้ช่วยกำจัดคาร์บอนที่ป้องกันการของวัสดุ นอกจากนี้กระบวนการเหล่านี้สามารถทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์สั้นลง การทำให้สั้นลงดังกล่าวจะทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์มีหมู่ปลายที่ไม่แน่นอน (รูปที่ 2.16) เช่น กรดคาร์บอกซิลิก แอนไฮไดรด์ คิวโนน และเอสเทอร์ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้จากการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโอโซน ทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์มีความว่องไวมากขึ้น [28]



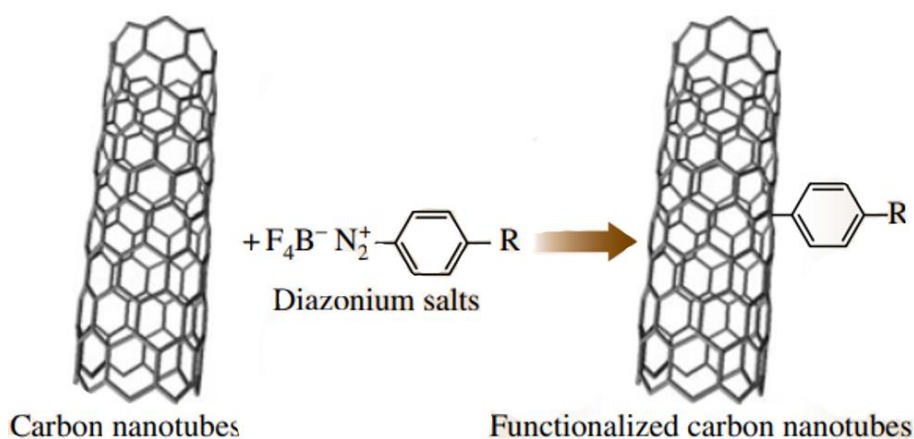
รูปที่ 2.16 แผนภาพของกระบวนการออกซิเดชันในคาร์บอนนาโนทิวบ์และความเป็นไปได้ที่จะเกิดหมู่ฟังก์ชันสองวงจร [28]

2.6.2.3 การเกิดปฏิกิริยาฟลูออรีนชัน (fluorination)

กระบวนการฟลูออรีนชันเป็นกระบวนการการเติมอะตอมฟลูออรีนบนพื้นผิวของคาร์บอนนาโนทิวบ์ จึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างมีนัยสำคัญ โดยอาจปรับปรุงคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยไฮดราซีนหรือแอลคิลแมกนีเซียมโบรไมด์ เพื่อให้ได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีหมู่อัลคิลแล้วทำให้เกิดฟลูออรีนในภายหลัง ซึ่งคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีหมู่ฟังก์ชันฟลูออรีนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสงและส่งเสริมความสามารถในการละลายในตัวทำละลายอินทรีย์อย่างมีนัยสำคัญ [28]

2.6.2.4 Aryl diazonium chemistry

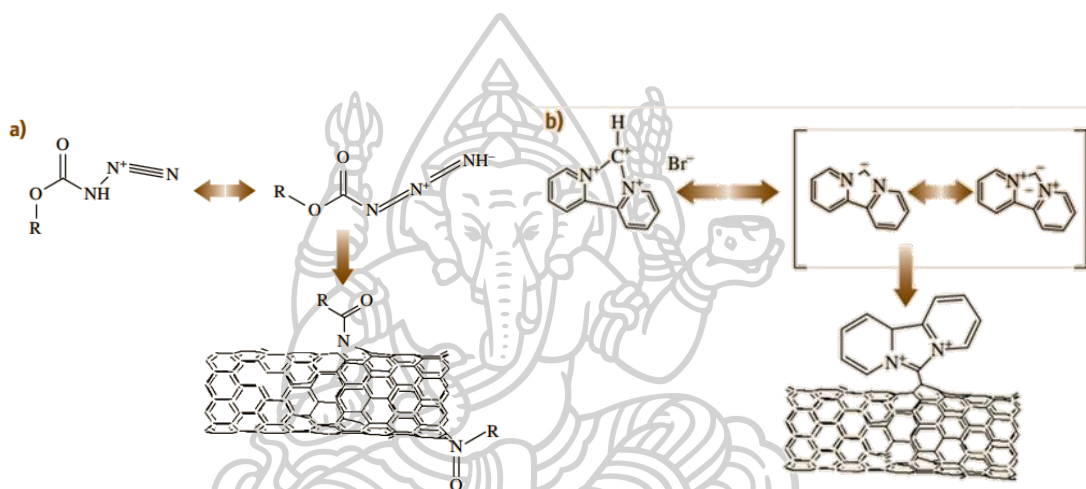
สารประกอบไดอะโซเนียมเป็นสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันเป็น $R-N_2H^+X^-$ ซึ่ง R แทนสารประกอบอินทรีย์ และ X^- แทนแอนไอออน (anion) ของสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ ความสำคัญของเกลือเหล่านี้ในคาร์บอนนาโนทิวบ์คือ สามารถสร้าง Aryl radical ซึ่งมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาทางเคมีของเกลือ Aryl diazonium กับพื้นผิวของคาร์บอนนาโนทิวบ์จะเกิดขึ้นเมื่อเติมเกลือ Diazonium ลงในสารแขวนลอยของคาร์บอนนาโนทิวบ์ จากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังหมู่ฟังก์ชัน Diazo และจะเกิดการปลดปล่อยสารประกอบไนโตรเจนพร้อมกับการสร้าง Aryl radical ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับผนังของคาร์บอนนาโนทิวบ์ทันที ดังรูปที่ 2.17 [28]



รูปที่ 2.17 แผนภาพการเกิดหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเกลือ Diazonium [28]

2.6.2.5 คาร์บีนและไนเตริน (carbenes and nitrenes)

Nitrenes (R-N:) เป็นอนุภาคของคาร์บีน สารประกอบเหล่านี้จัดเป็นสารประเภทอิเล็กโตรไฟล์ (electrophile) ซึ่งสามารถเติมลงในพันธะคู่ของ C=C กระบวนการทำคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีหมู่ไนเตรินทำได้โดยเทอร์โมไลซิสของ Alkyl azidoformates ดังรูปที่ 2.18a ซึ่งกระบวนการของคาร์บีนก็มีกลไกลักษณะเช่นเดียวกัน เริ่มแรกนิวคลีโอฟิลิกของคาร์บีน (nucleophilic carbene) เกิดจากการ Deprotonation ของ Imidazolium cation และขั้นที่สองประจุลบประจุหนึ่งจะเคลื่อนย้ายไปยังคาร์บอนนาโนทิวบ์ ดังรูปที่ 2.18b [28]



รูปที่ 2.18 แผนภาพการปรับปรุงพื้นผิวของคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วย (a) Cycloaddition ของไนเตริน และ (b) Nucleophilic carbene functionalization [28]

2.7 การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interference; EMI)

ในปัจจุบันอุปกรณ์ทางด้านไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ได้ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลาย มีทั้งแบบการใช้ความถี่ส่งกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปในอากาศที่ย่านความถี่ต่าง ๆ และการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปตามตัวนำ ในบางครั้งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็ไปรบกวนระบบอื่น ๆ ที่คลื่นได้ถูกส่งกระจายออกไป นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่ระบบการทำงานไม่ได้ใช้หลักการของการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปในอากาศ ก็ยังสามารถเป็นแหล่งกำเนิดและกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาโดยไม่มี การควบคุม [29]

Electromagnetic interference (EMI) หรือเรียกว่า Radio frequency interference (RFI) เป็นสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น เพราะจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ โดยในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เกือบทุกชนิดจะสามารถสร้างและแพร่กระจาย EMI ออกมาได้ การแพร่กระจายสามารถทำได้โดยการกระจายคลื่น (radiated emission) หรือแพร่กระจายไปตามตัวนำ (conducted emission) ดังเช่น สายไฟ (power cord) และเช่นเดียวกันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ก็สามารถรับ EMI ที่สร้างจากอุปกรณ์อื่นได้ด้วย

สำหรับสถานะการเกิด EMI มีอยู่ 3 ลักษณะ ประกอบด้วย

1. Source หรือแหล่งการกระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
2. Media หรือสื่อกลางของการกระจาย โดยการส่งกระจายคลื่นออกไป
3. Receptor เป็นผลกระทบต่อการใช้สัญญาณ

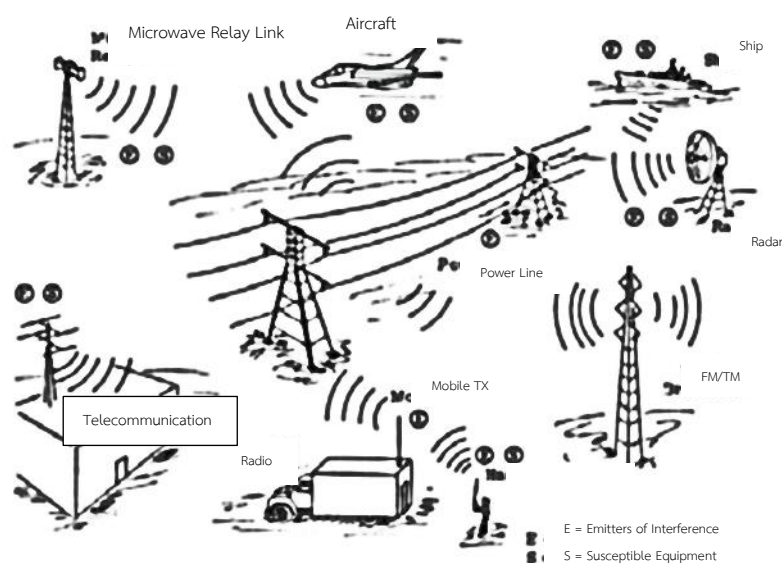
ในทั้ง 3 ลักษณะของการเกิด EMI ถ้าลักษณะหนึ่งลักษณะใดถูกจำกัดก็จะส่งผลให้การรบกวน (interference) ไม่เกิดขึ้น เพราะฉะนั้นการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่พอดีเหมาะสมต่อการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ จะเรียกว่า EMC สามารถทำให้เกิดได้โดยการลดความแรงของการแพร่กระจายที่แหล่งจ่ายกำลัง เป็นการขัดจังหวะในส่วนของการเดินทางไปของคลื่น (propagation path) หรือทำให้ยากต่อการที่ตัวรับจะรับเอามาได้ โดยทำการป้องกันต่อการแพร่กระจาย (emission) [29, 30]

2.7.1 หลักการของการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า [30]

รูปแบบในการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ หากเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นระหว่างระบบใด ๆ ตั้งแต่สองระบบขึ้นไป จะเรียกการรบกวนดังกล่าวว่า เป็นการรบกวนกันระหว่างระบบ (inter system) ในทำนองเดียวกันถ้าเป็นการรบกวนกันระหว่างองค์ประกอบภายในที่อยู่ในระบบเดียวกันจะเรียกการรบกวนดังกล่าวว่า การรบกวนภายในระบบ (intra system)

2.7.1.1 การเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างระบบ

รูปที่ 2.19 แสดงรูปแบบการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างระบบ ซึ่งแต่ละระบบจะทำงานที่ความถี่ไม่เท่ากัน พิสัยความถี่ในการทำงานจะอยู่ระหว่างความถี่ไฟฟ้ากำลังไปจนถึงความถี่ในย่านไมโครเวฟ (50/60 Hz ~ GHz) พิกัดกำลังไฟฟ้าจะมีขนาดตั้งแต่ไม่กี่วัตต์ไปจนถึงระดับเมกะวัตต์ ดังนั้นเพื่อทำให้ระหว่างระบบเกิดความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า จึงต้องมีการควบคุมสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากระบบต่าง ๆ ให้เหมาะสม

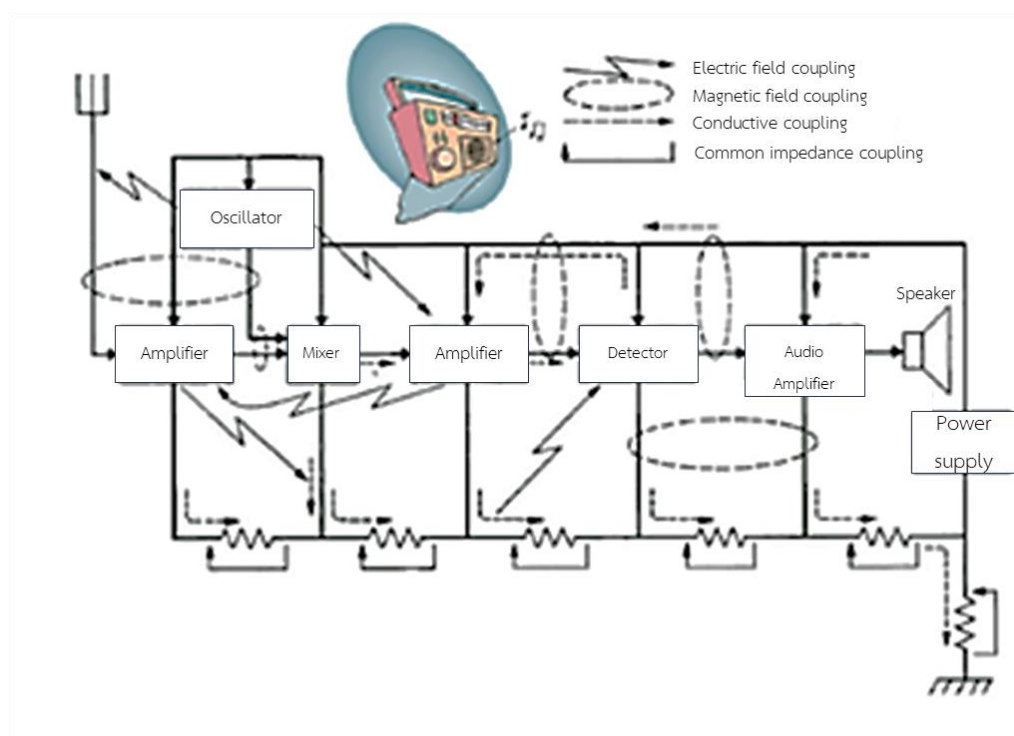


รูปที่ 2.19 ตัวอย่างการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างระบบ [30]

2.7.1.2 การเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบ

การเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบจะเหมือนกับการรบกวนกันเองอยู่แต่เฉพาะภายในระบบเท่านั้น (self-jamming) ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นภายในระบบ รูปที่ 2.20 แสดงรูปแบบตัวอย่างการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบ จากตัวอย่างกล่าวได้ว่าสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าอาจจะอยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะ (transient voltage) หรือสไปร์คของกระแสไฟฟ้า (current spike) ที่มาตามสายตัวนำ ซึ่งสไปร์คของกระแสไฟฟ้างกล่าวอาจอยู่ในรูปของไฟฟ้า สามารถแทนให้อยู่ในรูปของตัวเก็บประจุ (capacitor) หรือถ้าอยู่ในรูปของแม่เหล็ก ก็จะแทนให้อยู่ในรูปของตัวเหนี่ยวนำ โดยที่ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำเหล่านี้จะเป็นตัว

เชื่อมต่อในการนำสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายเคเบิลที่มีสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ให้สามารถส่งผ่านสัญญาณรบกวนไปยังสายเคเบิลที่ไม่มีสัญญาณรบกวน สำหรับการควบคุมสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบนั้น สามารถทำได้โดยการออกแบบระบบหรือเครื่องมือดังกล่าว



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างการเกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าภายในระบบในเครื่องรับวิทยุ [30]

2.7.2 กลไกการป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า

จากการที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นั้นมีการปลดปล่อย EMI ทำให้มีการออกแบบวัสดุเพื่อใช้งานในด้านป้องกัน EMI ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการป้องกัน EMI โดยทั่วไปนั้นจะต้องมีค่าประสิทธิภาพการป้องกันมากกว่า 20 dB [31] โดยประสิทธิภาพการป้องกัน EMI (electromagnetic interference shielding effectiveness; EMI SE) คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างกำลังขาเข้า (incoming power; P_i) และกำลังขาออก (outgoing power; P_o) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [32, 33] ดังสมการที่ (1)

$$SE = 10 \log \left(\frac{P_i}{P_0} \right) \quad (1)$$

โดยหน่วยของ SE คือ เดซิเบล (dB) และตารางที่ 2.3 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดทอน EMI (EMI attenuation) ที่ค่า SE ต่าง ๆ

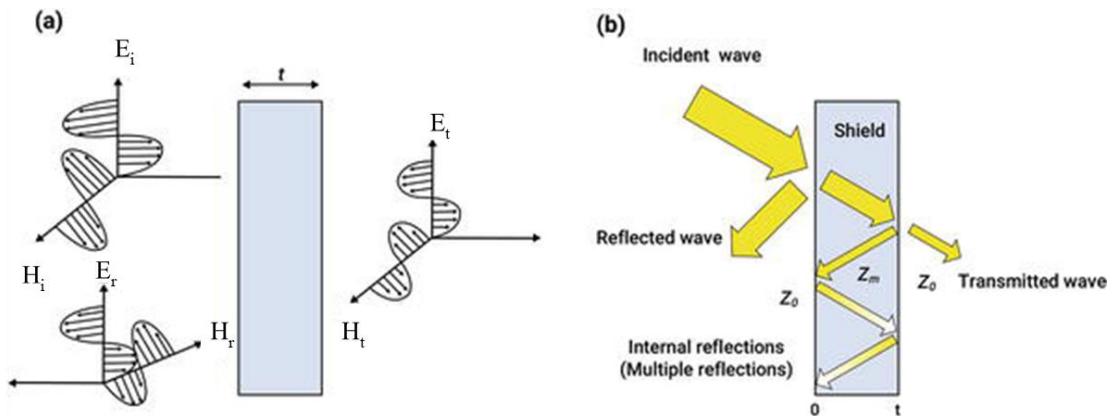
ตารางที่ 2.3 เปอร์เซ็นต์การลดทอน EMI เมื่อเทียบกับค่า SE [32]

SE (dB)	20	30	40	50	60	70
Attenuation (%)	99	99.9	99.99	99.999	99.9999	99.99999

โดยทั่วไปเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระทบกับวัสดุ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดการสะท้อนกลับ และทะลุผ่านวัสดุตั้งรูปที่ 2.21a คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สม่ำเสมอที่ประกอบด้วยสนามไฟฟ้า E_i และสนามแม่เหล็ก H_i จะเป็นเหตุการณ์ปกติที่เกิดขึ้นกับวัสดุ เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระทบกับพื้นผิววัสดุ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบางส่วนจะสะท้อนไปในทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้า E_r และสนามแม่เหล็ก H_r และส่วนที่เหลือของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็จะทะลุผ่านวัสดุด้วยสนามไฟฟ้า E_t และสนามแม่เหล็ก H_t [32] ซึ่งประสิทธิภาพป้องกันสนามไฟฟ้าสามารถคำนวณจากสมการที่ (2)

$$SE = 20 \log \frac{E_1}{E_2} = 20 \log \frac{H_1}{H_2} \quad (2)$$

เมื่อ E_1	คือ	ความเข้มสนามไฟฟ้าขาเข้า
E_2	คือ	ความเข้มสนามไฟฟ้าขาออก
H_1	คือ	ความเข้มสนามแม่เหล็กขาเข้า
H_2	คือ	ความเข้มสนามแม่เหล็กขาออก



รูปที่ 2.21 (a) ทิศทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อกระทบกับวัสดุทั่วไป และ (b) การลดทอนการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยวัสดุป้องกัน [32]

ในทางทฤษฎีแล้วประสิทธิภาพการป้องกัน EMI ของวัสดุเกิดขึ้นจาก 3 กลไก ประกอบด้วย การสะท้อน (reflection) การดูดกลืน (absorption) และการสะท้อนภายในวัสดุ (internal reflection or multiple reflection) โดยวัสดุที่มีตัวพาประจุเคลื่อนที่ (อิเล็กตรอนหรือช่องว่าง) สามารถตอบโต้ (interact) กับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เข้ามา เพื่อให้เกิดการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ง่ายขึ้น สำหรับการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุป้องกันจะขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุ โดยวัสดุที่มีความหนามากก็จะป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้มาก อีกทั้งการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ายังมีนัยสำคัญกับวัสดุที่มีขั้วทางไฟฟ้าหรือแม่เหล็กซึ่งจะสามารถป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ สำหรับการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในของวัสดุป้องกันจะทำงานผ่านการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในวัสดุ ดังนั้นประสิทธิภาพป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมด ($SE_{overall}$) จึงเป็นผลรวมของทั้ง 3 กลไก ดังแสดงในสมการที่ (3) [1, 32, 33]

$$SE_{overall} \text{ (dB)} = SE_R + SE_A + SE_{MR} \quad (3)$$

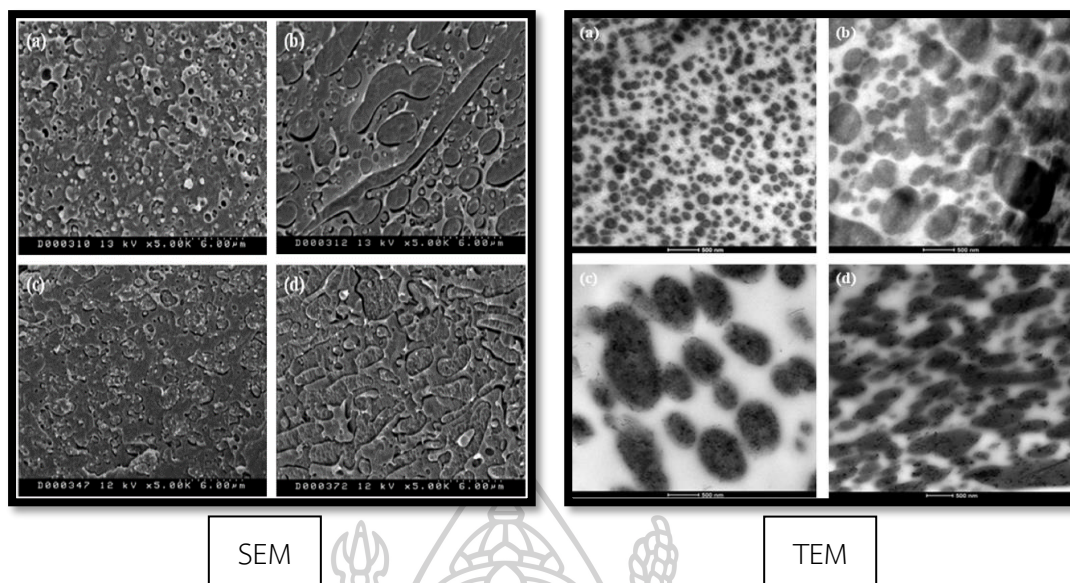
เมื่อ	$SE_{overall}$	คือ	ประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมด
	SE_R	คือ	ประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการสะท้อนที่ผิวของวัสดุ
	SE_A	คือ	ประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการดูดกลืนของวัสดุ
	SE_{MR}	คือ	ประสิทธิภาพการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการสะท้อนภายในวัสดุ

นอกจากนี้ประสิทธิภาพการป้องกัน EMI ยังขึ้นอยู่กับระยะทางของแหล่งกำเนิดกับวัสดุป้องกัน โดยเมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นอยู่ไกลจากวัสดุป้องกันจะเรียกประสิทธิภาพนั้นว่า ประสิทธิภาพการป้องกันระยะไกล (far field shielding effectiveness) แต่หากแหล่งกำเนิดคลื่นอยู่ใกล้กับวัสดุป้องกันจะเรียกประสิทธิภาพนั้นว่า ประสิทธิภาพการป้องกันระยะใกล้ (near field shielding effectiveness)

สำหรับรูปที่ 2.21b จะแสดงกลไกการป้องกัน EMI ทั้งสามรูปแบบในวัสดุนำไฟฟ้า โดยเมื่อคลื่นกระทบกับผิววัสดุ จะมีคลื่นบางส่วนที่เกิดการสะท้อนกลับ (reflected wave) และบางส่วนทะลุผ่านเข้าไปในวัสดุ โดยคลื่นที่ทะลุผ่านไปวัสดุบางส่วนจะเคลื่อนที่ผ่านออกมาจากวัสดุ (transmitted wave) โดยคลื่นที่ผ่านออกมาจะมีแอมพลิจูดลดลงอย่างมาก ซึ่งเป็นผลมาจากการดูดกลืนและสูญเสียพลังงาน เนื่องจากการดูดกลืนที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นความร้อน สำหรับคลื่นที่ยังไม่สามารถผ่านออกมาจากวัสดุได้จะเกิดการสะท้อนไปมาหลายครั้งภายในวัสดุ (multiple reflection) [1, 32]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Urquijo และคณะ [19] ทำการผสม PLA และ PBAT ในอัตราส่วน 80/20 และ 60/40 โดยทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีคาร์บอนนาโนทิว (CNT) ในปริมาณต่าง ๆ โดยในรูปที่ 2.22 แสดงภาพ SEM (ซ้าย) และ TEM (ขวา) ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT พบว่าในกรณีไม่ได้ทำการผสม CNT เฟสของ PBAT จะมีลักษณะเป็นทรงกลมกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของ PLA สำหรับอัตราส่วนผสม 80/20 ในขณะที่อัตราส่วนผสม 60/40 จะแสดงสัณฐานวิทยาที่ PBAT รวมกันเป็นเฟสที่ใหญ่ขึ้นและเกือบจะเป็นเฟสต่อเนื่อง แต่เมื่อทำการผสม CNT พบว่า CNT จะเข้าไปอยู่ในเฟสของ PBAT เนื่องจาก CNT มีความเข้ากันได้กับ PBAT มากกว่า PLA เนื่องจาก CNT มีอันตรกิริยากับหมู่เอโรมาติกของ PBAT มากกว่าหมู่เอลิฟาติกของ PLA นอกจากนี้ PBAT ยังมีแรงดึงผิวระหว่างเฟสน้อยกว่า PLA จึงทำให้ CNT เข้าไปอยู่ในเฟสของ PBAT ได้ดีกว่าในเฟสของ PLA



รูปที่ 2.22 ภาพ SEM (ซ้าย) ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT (a) 80/20/0 (b) 60/40/0 (c) 80/20/4 และ (d) 60/40/3 และภาพ TEM (ขวา) ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT (a) 80/20/0 (b) 60/40/0 (c) 80/20/2.4 และ (d) 60/40/1.8 [19]

สำหรับพฤติกรรมทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT นั้นจะปรากฏพีกดูดความร้อนเพียงตำแหน่งเดียวซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิการหลอมผลึก (T_m) ของ PLA อีกทั้งยังปรากฏพีกการคายความร้อนซึ่งเกิดจากกระบวนการเกิดผลึกเมื่อได้รับความร้อน (cold crystallization process) สำหรับพฤติกรรมการหลอมเหลวของ PBAT นั้นวิเคราะห์ได้ยากจากการที่มีพีกกว้างและซ้อนทับกับพีก Cold crystallization temperature (T_c) ของ PLA โดยที่การเติม CNT ไม่ได้ส่งผลต่อพฤติกรรมทางความร้อนของทั้ง 80/20 และ 60/40 และ CNT แทบจะไม่ส่งผลต่อ T_m แต่ปริมาณผลึก (X_c) ของ PLA มีแนวโน้มลดลง ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 อุณหภูมิหลอมผลึก (T_m) และปริมาณผลึก (X_c) ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT [19]

Composition	T_m (°C)	X_c PLA (%)	Composition	T_m (°C)	X_c PLA (%)
80/20	156.7	15	60/40	155.1	13.5
80/20/0.8	155.7	6.7	60/40/0.6	158.1	6.2
80/20/1.6	157.1	6.4	60/40/1.2	156.7	3.5
80/20/2.4	156.7	2.2	60/40/1.8	156.7	3.1
80/20/3.2	156.7	1.1	60/40/2.4	155.7	4.4
80/20/4.0	158.0	1.3	60/40/3.0	155.1	3.8

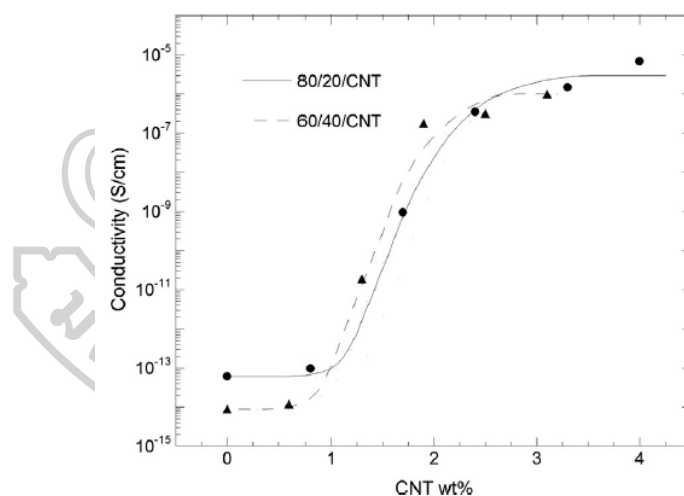
จากการทดสอบสมบัติเชิงกล (ตารางที่ 2.5) พบว่าการเติม CNT เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า Elongation at break ค่อนข้างคงที่ใน 80/20 และมีแนวโน้มลดลงใน 60/40 โดยค่า Tensile strength ลดลง แต่ค่า Young's modulus เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเป็นการเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ อาจเกิดจากการรวมตัวกันของ CNT ที่อยู่ในเฟสของ PBAT หรืออาจเกิดจากการที่ CNT มีค่า Aspect ratio ที่ลดลงเนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปต่าง ๆ

ตารางที่ 2.5 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT [19]

Composition	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
80/20	2940 ± 20	60.7 ± 0.7	153 ± 8
80/20/2.4	2950 ± 40	49.3 ± 1.3	153 ± 8
80/20/4.0	2980 ± 70	48.8 ± 1.1	156 ± 11
60/40/0	2180 ± 60	44.0 ± 0.5	190 ± 11
60/40/1.8	2200 ± 20	37.1 ± 1.3	156 ± 8
60/40/3.0	2210 ± 50	35.0 ± 0.9	153 ± 11

นอกจากนี้ในรูปที่ 2.23 แสดงค่าการนำไฟฟ้าโดยปริมาตร (volume conductivity) ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ โดยมีการผสม PLA/PBAT ในสัดส่วน 80/20 และ 60/40 พบว่า ในกรณีที่ไม่ได้มีการผสม CNT พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT จะมีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วงของการเป็นวัสดุฉนวนไฟฟ้า แต่เมื่อมีการเติม CNT 1.6%wt ในสัดส่วน 80/20 และ 1.2%wt

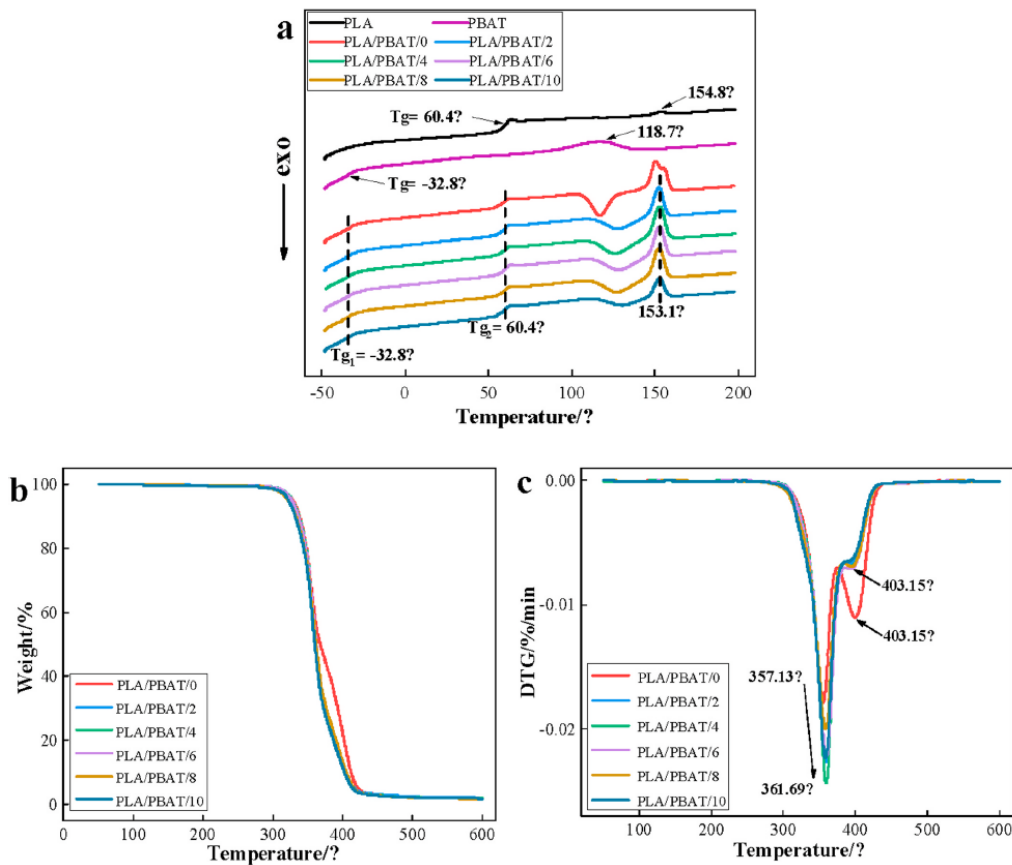
ในสัดส่วน 60/40 จะทำให้คอมพอสิต PLA/PBAT/CNT มีค่าการนำไฟฟ้าในช่วงของวัสดุกึ่งตัวนำ แต่เมื่อมีปริมาณ CNT มากขึ้นจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตเพิ่มขึ้น จนกระทั่งคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่มีสัดส่วนผสมของ CNT มากกว่า 2.4 %wt ในสัดส่วน 80/20 และ 1.8%wt ในสัดส่วน 60/40 ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นน้อยมาก เมื่อใช้ฟังก์ชัน Power law เพื่อทำการคำนวณหาปริมาณ CNT ที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันของอนุภาค CNT เพื่อให้เกิดเป็นเครือข่ายนำไฟฟ้า หรือเรียกว่า Electrical percolation threshold พบว่าปริมาณ CNT ที่ทำให้เกิดช่วง Electrical percolation threshold มีค่าเท่ากับ 1.62 และ 1.28 %wt สำหรับพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีสัดส่วนผสม 80/20 และ 60/40 ตามลำดับ ซึ่งสมบัติการนำไฟฟ้านี้สอดคล้องกับสมบัติความหนืด เนื่องจากพฤติกรรมคล้ายของแข็ง (solid-like behavior) ในช่วงความถี่ต่ำ (terminal region) จะมีความเกี่ยวข้องกับ Electrical percolation threshold โดยจะพบว่าการที่พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT มีเฟสต่อเนื่องมากขึ้นจะเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิต



รูปที่ 2.23 ค่าการนำไฟฟ้าโดยปริมาตรของคอมพอสิต (●) 80/20/CNT และ (▲) 60/40/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ [19]

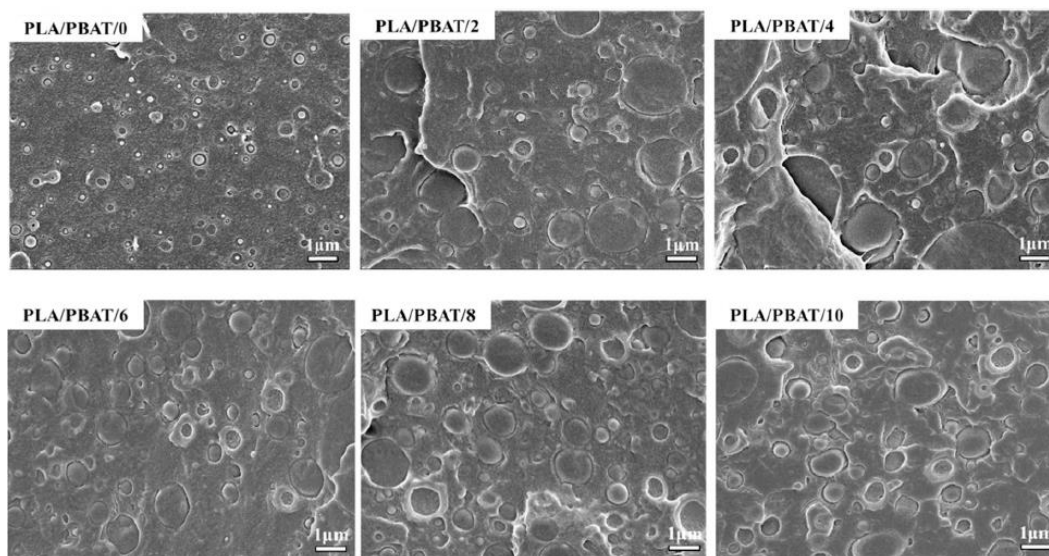
จากงานวิจัยของ Lyu และคณะ [8] ได้ทำการผสม PLA กับ PBAT ในอัตราส่วนผสม 70/30 และใช้ PLA-g-GMA ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ซึ่งทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ 3D-printing โดยได้ทำการศึกษาสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการไหล พบว่าเมื่อทำการผสม PLA-g-GMA ในระบบของ PLA/PBAT จะไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ไม่ว่าจะเป็น T_g ของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด และ T_m ของ PLA ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณของ PLA-g-GMA ทั้งนี้อาจเกิดจากการที่ PLA-g-GMA มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ส่งผลให้ปริมาตรอิสระ (free volume) มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก อย่างไรก็ตามการเติม PLA-g-GMA จะส่งผลให้ T_{CC} ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม PLA-g-GMA บ่งบอกถึงจลนพลศาสตร์ของการตกผลึก (kinetics of crystallization) ที่ช้าลงของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ดังรูปที่ 2.24(a)

สำหรับการทดสอบ TGA ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน พบว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA ในทุกสัดส่วนจะมีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวใกล้เคียงกันที่ 328 °C (รูปที่ 2.24(b)) และจากกราฟ DTG (รูปที่ 2.24(c)) แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT มีการสลายตัว 2 ขั้นตอน ที่อุณหภูมิประมาณ 357 °C และ 403 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของ PLA และ PBAT ตามลำดับ การเติม PLA-g-GMA มากขึ้น ส่งผลให้พิกการสลายตัวทั้ง 2 ขั้นตอน มีการขยับเข้าใกล้กันมากขึ้น บ่งบอกถึงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBAT ที่เพิ่มขึ้น



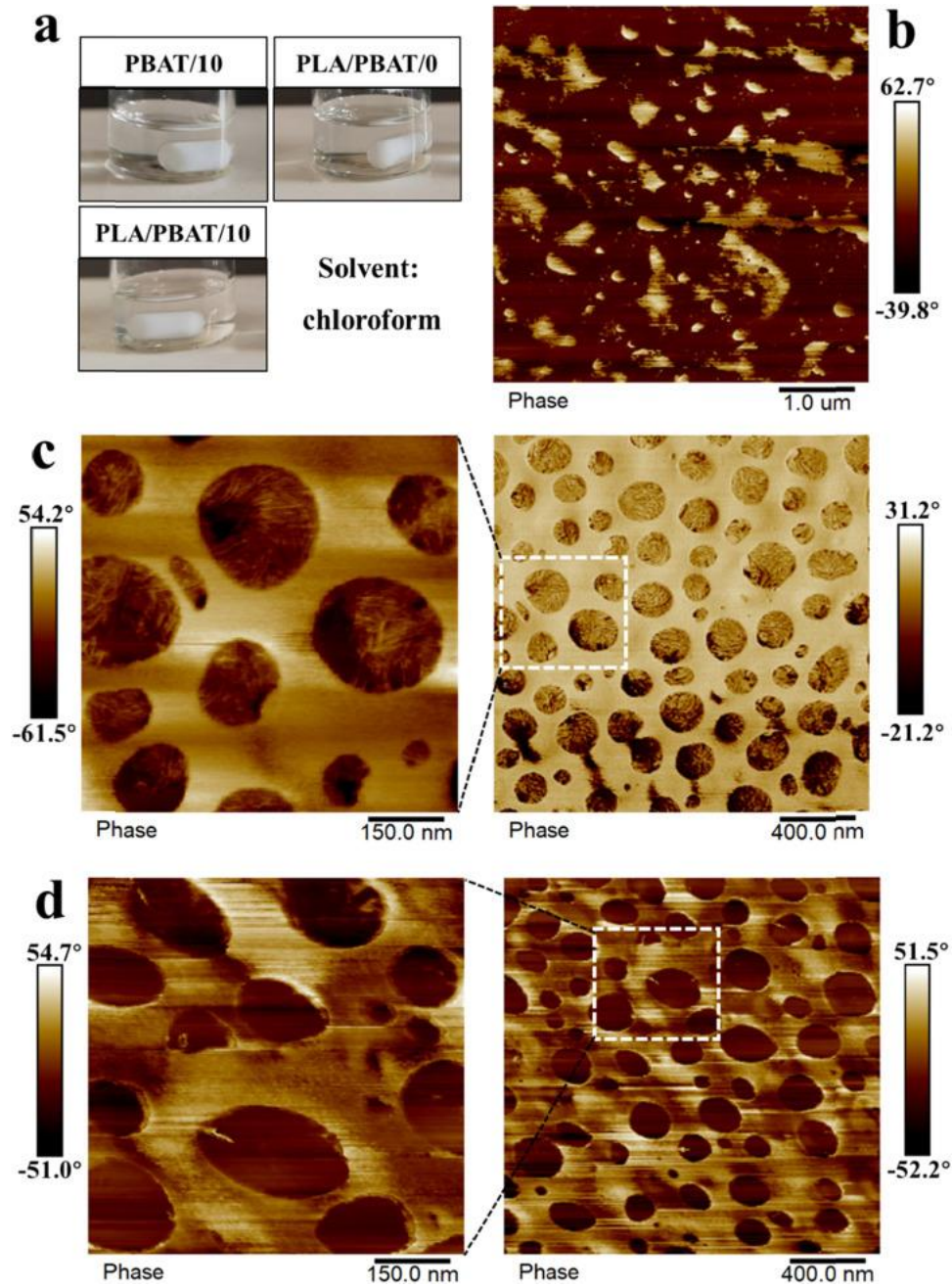
รูปที่ 2.24 สมบัติทางความร้อนของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่ปริมาณการเติม PLA-g-GMA ต่าง ๆ (a) กราฟ DSC การให้ความร้อนครั้งที่สอง ที่อัตรา 10 K/min (b) กราฟ TGA และ (c) กราฟ DTG [8]

เมื่อทำการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT จะมีสัณฐานวิทยาแบบ Sea-island โดย PBAT จะกระจายตัวอยู่ในเฟสของ PLA ซึ่งการเกิดสัณฐานวิทยาลักษณะนี้แสดงถึงความไม่เข้ากันของ PLA และ PBAT แต่เมื่อมีการเติม PLA-g-GMA เข้าไปในระบบ จะส่งผลให้เฟสของ PBAT มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น และช่องว่างระหว่างเฟสทั้งสองเล็กลง แสดงให้เห็นถึงแรงดึงผิวระหว่างเฟส PLA และ PBAT ที่ลดลง ดังรูปที่ 2.25



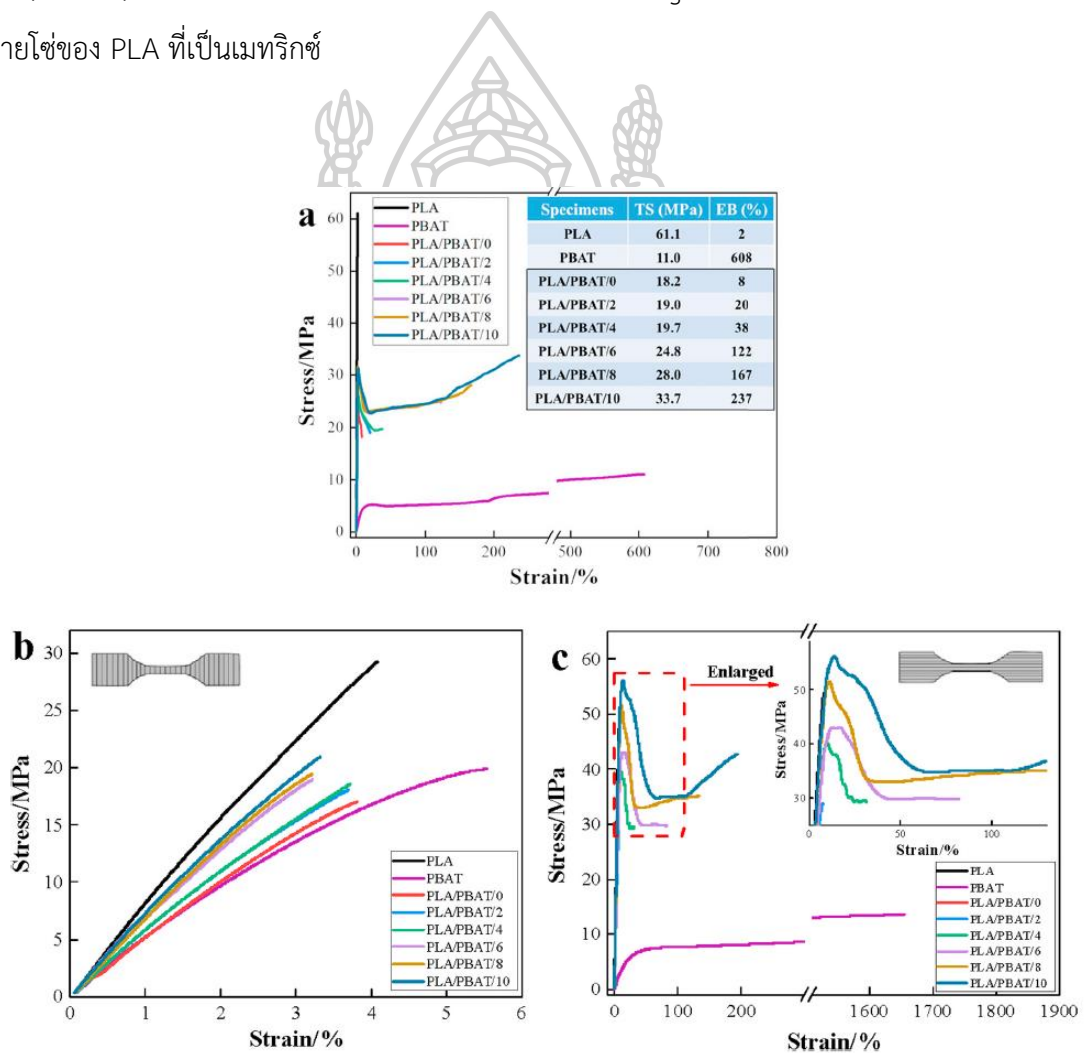
รูปที่ 2.25 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่ปริมาณ PLA-g-GMA ต่าง ๆ [8]

จากการทดสอบ SEM แสดงให้เห็นถึงแรงดึงผิวที่ลดลง แต่ไม่สามารถที่จะอธิบายผลของแรงดึงผิวต่อความเข้ากันได้อย่างชัดเจน จึงได้มีการทดสอบ AFM เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยา ขนาด และความสามารถในการกระจายตัวของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA แสดงรูปที่ 2.26 โดยในรูปที่ 2.26(a) แสดงการละลายของพอลิเมอร์ผสมในสัดส่วนต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นว่าพอลิเมอร์ผสมทุกสัดส่วนจะมีการละลายได้ดีในสารละลายคลอโรฟอร์ม สำหรับภาพ AFM ในรูปที่ 2.26(b-d) บริเวณสว่างจะแสดงถึง PLA หรือ PLA-g-GMA ในขณะที่บริเวณมืดจะแสดงถึงเฟสของ PBAT ในรูปที่ 2.26(b) แสดงให้เห็นถึงความแข็งแรงระหว่างเฟสของ PBAT และ PLA-g-GMA จากการเกิดพันธะเคมี ในรูปที่ 2.26(c-d) เฟสของ PBAT จะกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ PLA คล้ายกับภาพ SEM สำหรับกรณีที่ไม่มีการเติม PLA-g-GMA (รูปที่ 2.26(c)) พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ซึ่งมีความหนืดน้อยกว่าส่งผลให้สามารถเห็นส่วนที่เป็นผลึกของ PBAT ได้ชัดเจนจากส่วนขยายในรูปที่ 2.26(c) ซึ่งแสดงถึงความไม่เข้ากันระหว่างเฟส PLA และ PBAT เพราะสายโซ่ของ PLA ไม่สามารถเข้าไปแทรกในส่วนของ PBAT เพื่อขัดขวางการเกิดผลึกของ PBAT อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเติม PLA-g-GMA ที่ปริมาณ 10%wt (รูปที่ 2.26(d)) พบว่าความหนืดของพอลิเมอร์ผสมจะเพิ่มขึ้นและจะไม่เห็นส่วนที่เป็นผลึกของ PBAT ดังภาพขยายในรูปที่ 2.26(d) แสดงถึงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBAT ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสายโซ่ PLA สามารถเข้าไปแทรกในส่วนของ PBAT แล้วไปขัดขวางการเกิดผลึกของ PBAT ได้

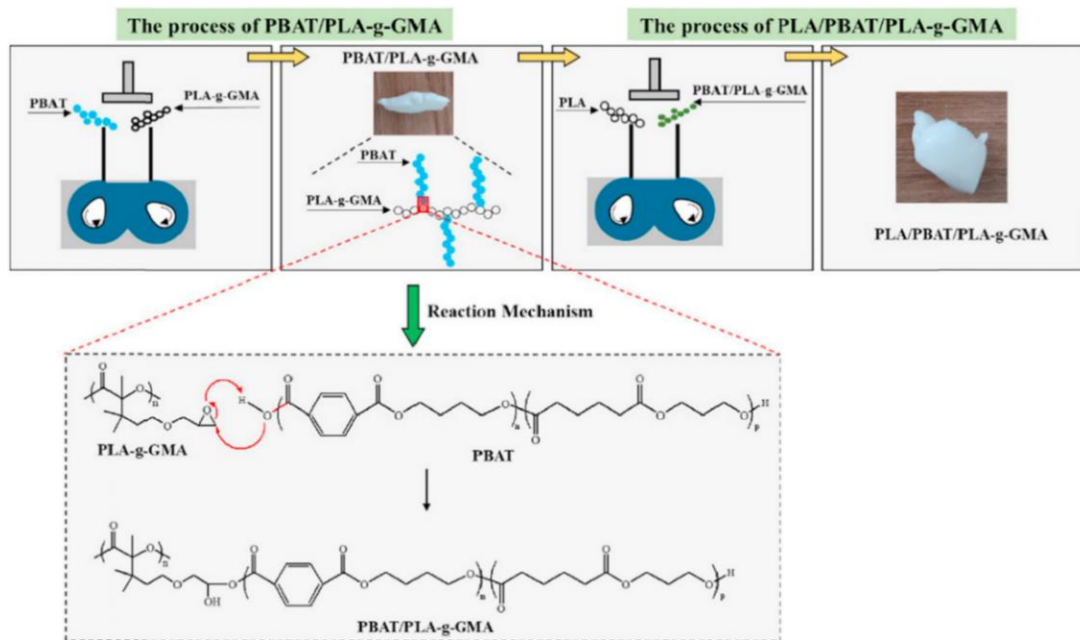


รูปที่ 2.26 (a) ภาพการละลายของพอลิเมอร์ผสมที่สัดส่วนต่าง ๆ ในคลอโรฟอร์ม และภาพ AFM ของพอลิเมอร์ผสมที่สัดส่วนต่าง ๆ (b) PBAT/10%wt PLA-g-GMA (c) PLA/PBAT (d) PLA/PBAT/10%wt PLA-g-GMA [8]

จากการศึกษาสมบัติเชิงกล (รูปที่ 2.27) พบว่าการเติม PLA-g-GMA ที่ปริมาณ 10%wt จะสามารถปรับปรุง Tensile strength ของ PLA/PBAT ได้ถึง 86% เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่เติม PLA-g-GMA สำหรับการขึ้นรูปด้วยเทคนิค 3D-printing ในแนว Longitudinal นอกจากนี้ขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมดังรูปที่ 2.28 บ่งบอกถึงการที่ PLA-g-GMA ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBAT โดยส่วนของหมู่เอพอกซีของ GMA จะไปเกิดปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) ของ PBAT ในขณะที่สายโซ่ของ PLA บน PLA-g-GMA ก็จะไปเกิดการเกี่ยวพันกันกับสายโซ่ของ PLA ที่เป็นเมทริกซ์

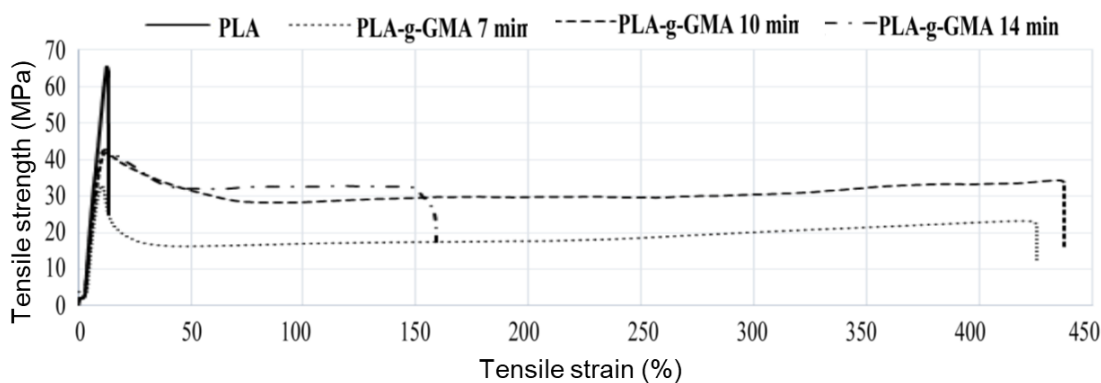


รูปที่ 2.27 สมบัติเชิงกลของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่ขึ้นรูปด้วยเทคนิค (a) Injection molding (b) 3D-printing ในทิศทาง Transverse และ (c) 3D-Printing ในทิศทาง Longitudinal [8]



รูปที่ 2.28 ขั้นตอนการผสมและกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA [8]

Thanh และคณะ [34] ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาการกราฟต์ของ GMA บน PLA ในเครื่อง Internal mixer โดยได้ศึกษาระยะเวลาในการผสมหรือเกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ที่เวลา 7 10 และ 14 นาที พบว่าระยะเวลาการผสมที่เหมาะสมที่สุด คือ 10 นาที เนื่องจากที่เวลาในการผสม 10 นาที จะมีเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ของ GMA บน PLA มากที่สุด คือ 1.379% และมีสมบัติเชิงกลดีที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบกับตัวอย่าง PLA บริสุทธิ์ และ PLA-g-GMA ที่ทำการผสมเป็นเวลา 7 และ 14 นาที (รูปที่ 2.29)

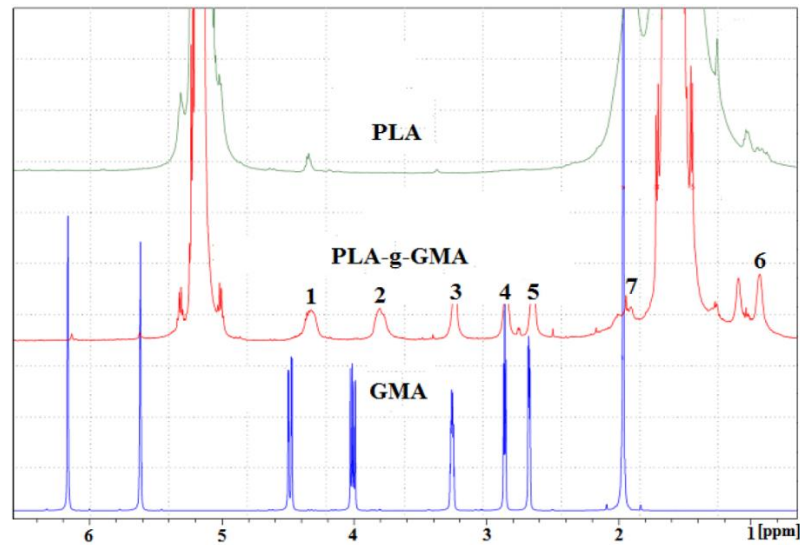


รูปที่ 2.29 กราฟ Stress-strain ของ PLA บริสุทธิ์ และ PLA-g-GMA ที่ระยะเวลาผสมแตกต่างกัน [34]

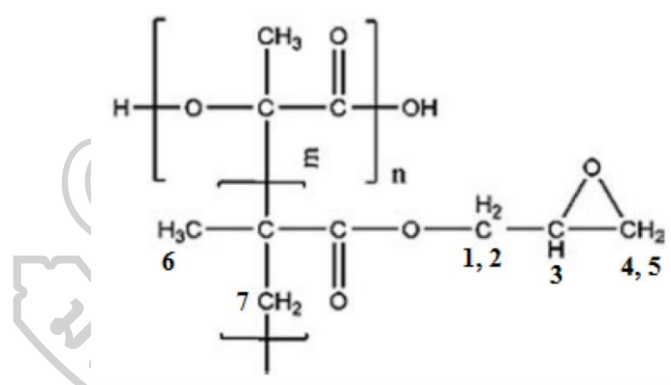
รูปที่ 2.30 แสดงผลการทดสอบด้วยเทคนิค ^1H NMR พบว่า PLA และ PLA-g-GMA จะปรากฏพีค 2 ตำแหน่ง คือ 5.2 และ 1.6 ppm ซึ่งเป็นโปรตอนของหมู่เมทิลลีนและเมทิลของสายโซ่ PLA ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของ PLA บริสุทธิ์ พบว่า PLA-g-GMA จะปรากฏพีคใหม่ขึ้นที่ตำแหน่ง 0.9-4.3 ppm ซึ่งเป็นพีคของโปรตอนในตำแหน่งที่ 1-7 ในโครงสร้างของ GMA ดังรูปที่ 2.31 ซึ่งสัมพันธ์กับโปรตอนของ CH , CH_2 และ CH_3 ของ GMA โดยอาจจะมี Chemical shift ที่แตกต่างกันในโปรตอนบางตำแหน่ง ซึ่งข้อสังเกตนี้แสดงให้เห็นว่า ^1H NMR ของ PLA-g-GMA พีคที่เกิดขึ้นใหม่นอกจากพีคของ PLA นั้นเป็นของ GMA ซึ่งเปอร์เซ็นต์การกราฟต์สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใต้พีคของ PLA-g-GMA และพื้นที่ใต้พีคของ PLA ดังสมการที่ (4)

$$\% \text{ Grafting} = \frac{\text{relative area of characteristic peak of PLA-g-GMA}}{\text{relative area of characteristic peak of PLA}} \times 100 \quad (4)$$

โดยในงานวิจัยนี้ได้นำพื้นที่ใต้พีคที่ตำแหน่ง 1.6 ppm ของ PLA และพีคโปรตอนตำแหน่งที่ 7 ของ PLA-g-GMA มาใช้ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ของ GMA บนสายโซ่ PLA

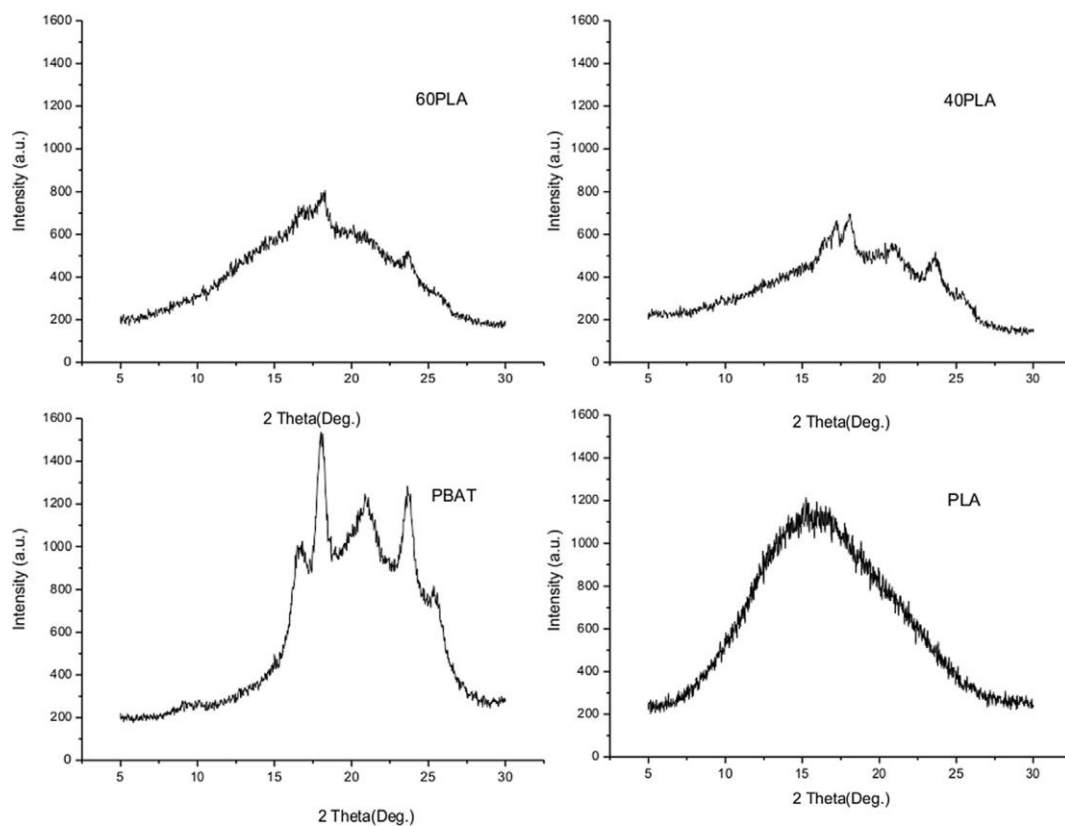


รูปที่ 2.30 สเปกตรัม ^1H NMR ของ PLA GMA และ PLA-g-GMA ที่ระยะเวลาผสม 10 นาที [34]



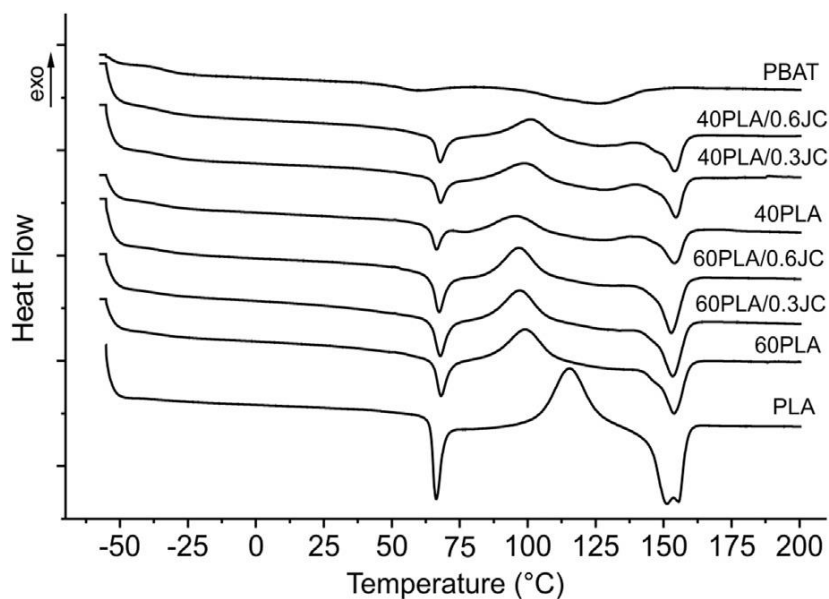
รูปที่ 2.31 โครงสร้างที่เป็นไปได้ของ PLA-g-GMA [34]

งานวิจัยของ Arruda และคณะ [35] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของ Chain extender ต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 40/60 และ 60/40 โดยใช้ Chain extender ชนิด Joncryl (JC) ที่มีหมู่อีพอกไซด์อยู่ที่ปลายสายโซ่ จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าพอลิเมอร์ผสมทั้งสองอัตราส่วนจะปรากฏ Halo peak ที่แสดงถึงส่วนอสัณฐานของ PLA นอกจากนี้ยังปรากฏพีคอีก 4 ตำแหน่ง ที่ประมาณ 17.6° 20.5° 22.9° และ 25.2° ซึ่งแสดงถึงส่วนที่เป็นผลึกของ PBAT ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 XRD patterns ของ PLA PBAT และ PLA/PBAT ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ [35]

สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมชนิดต่าง ๆ ที่ศึกษาด้วยเทคนิค DSC แสดงดังรูปที่ 2.33 และตารางที่ 2.6 พบว่า PLA บริสุทธิ์จะปรากฏ T_g ที่อุณหภูมิ $60.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ และปรากฏพีก T_m 2 ตำแหน่ง ที่อุณหภูมิ $151\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $155.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ นอกจากนี้ยังปรากฏพีก T_{cc} ที่อุณหภูมิประมาณ $115.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ในขณะที่ PBAT จะปรากฏ T_g ที่อุณหภูมิ $-33.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ และปรากฏพีก T_m 2 ตำแหน่ง ที่อุณหภูมิ $60.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $126.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT จะมีการซ้อนทับกันระหว่างพีก T_m ของ PBAT กับ T_g และพีก T_{cc} ของ PLA นอกจากนี้จะสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิ T_g ของ PLA และ PBAT ไม่มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่เข้ากันในเชิงเทอร์โมไดนามิกของ PLA และ PBAT



รูปที่ 2.33 DSC thermogram ของ PLA PBAT และ PLA/PBAT ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ [35]

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางความร้อนของ PLA PBAT และ PLA/PBAT ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ [34]

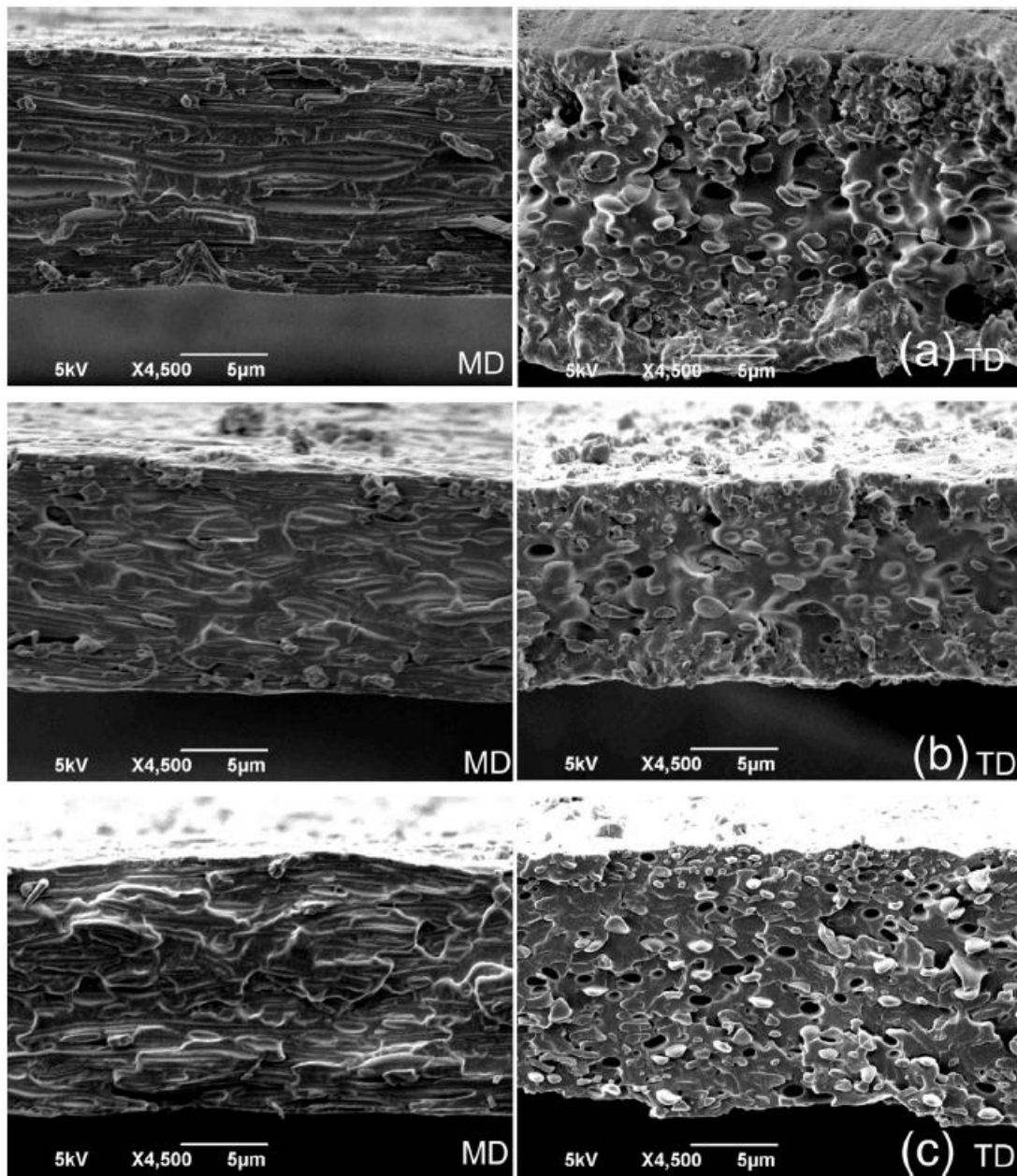
Formulation	T_g^a (°C)	T_g^b (°C)	T_{cc} (°C)	ΔH_{cc} (Jg ⁻¹)	T_m (°C)	ΔH_m (Jg ⁻¹)	X_c^c (%)
PLA	60.9	–	115.5	25.6	151/155.4	25.6	0.0
PBAT	–	–33.2	–	–	60.4/126.5	21.8	19.1
40PLA	58.9	–34.5	95.7	7.2	153.7	15.7	12.4
40PLA/0.3JC	57.9	–34.5	98.6	6.0	154.1	13.8	11.4
40PLA/0.6JC	58.9	–33.0	101.3	6.6	153.7	15.2	12.6
60PLA	59.1	–35.1	98.8	12.9	154.1	19.4	14.2
60PLA/0.3JC	59.2	–35.3	97.4	12.8	153.6	19.6	14.9
60PLA/0.6JC	59.3	–34.8	96.8	11.5	153.0	19.5	17.5

T_g^a = glass transition temperature of PLA, T_g^b = glass transition temperature of PBAT, X_c^c = degree of crystallinity of PBAT.

ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีความเข้ากันไม่ได้จะเกี่ยวข้องกับตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการขึ้นรูป (อุณหภูมิ ประเภทของการเสียรูป และอัตราเร็วของกระบวนการ) และสมบัติขององค์ประกอบในพอลิเมอร์ผสม (สัดส่วนผสม อัตราส่วนความหนืด แรงดึงผิวระหว่างผิวหน้า ความหนืดของเฟสต่อเนื่อง และความยืดหยุ่นขององค์ประกอบ) ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะก่อให้เกิดลักษณะสัณฐานวิทยาสุดท้าย ในขณะที่ขนาดอนุภาคเริ่มต้น ความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ เปอร์เซ็นต์ของเฟสกระจายตัว และอัตราการดึง จะเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาที่เกิดขึ้นในระหว่างการดึงยืด (drawing) โดยเมื่อเฟสกระจายตัวและเฟสหลักมีอัตราส่วนใกล้เคียง 1:1 จะทำให้เกิดโครงสร้างที่

ซับซ้อนขึ้น เช่น โครงสร้างคล้ายริบบิ้นหรือแผ่น (ribbon- or sheet-like) โครงสร้างแบบแบ่งชั้นและโครงสร้างแบบต่อเนื่อง (stratified and co-continuous structures) เป็นต้น

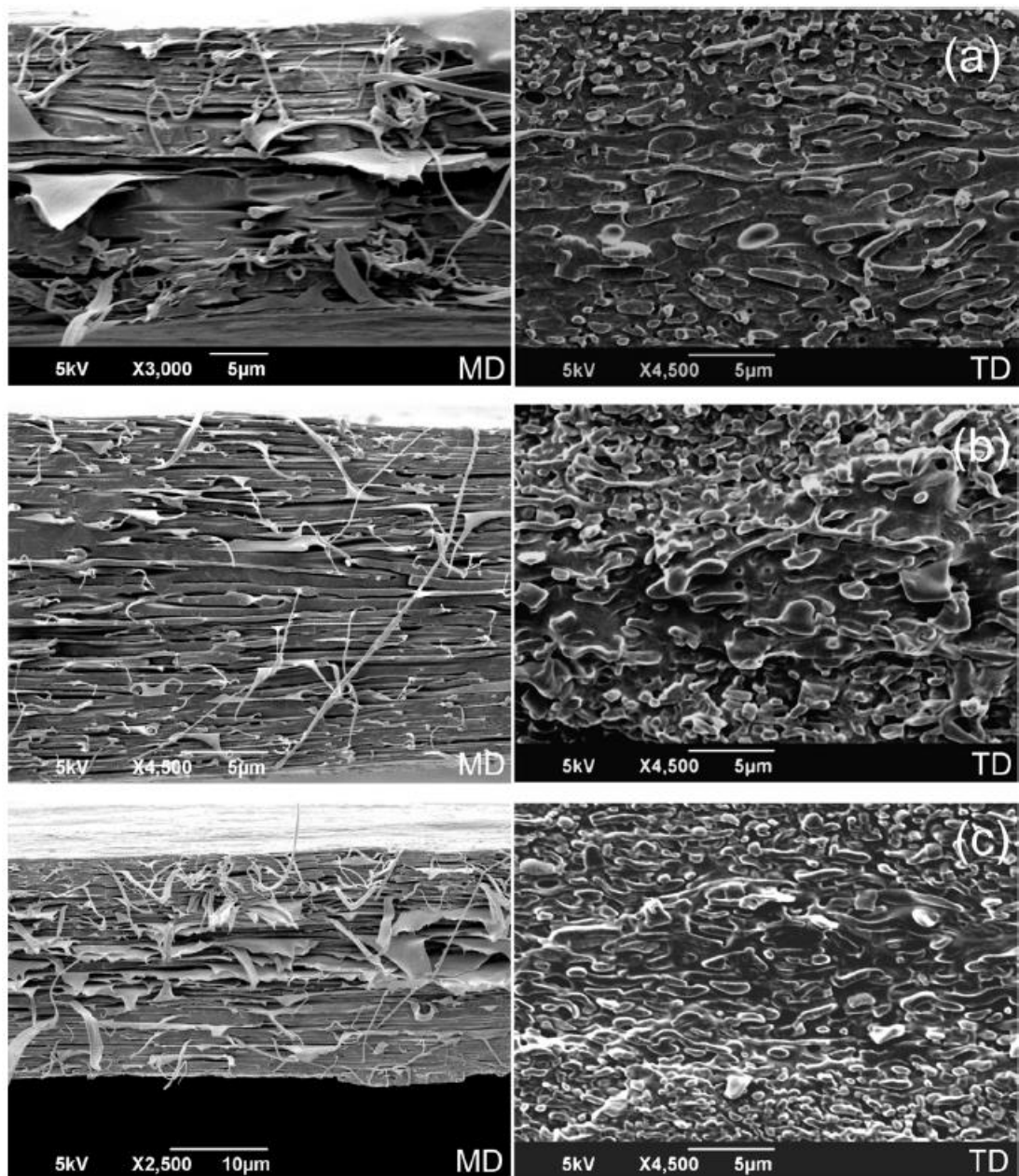
รูปที่ 2.34 แสดงสัณฐานวิทยาของฟิล์ม 40PLA ที่มีการเติมและไม่เติม JC ในทิศทางการขึ้นรูปฟิล์มตามแนวยาวและแนวขวาง พบว่ามีโอกาสที่พอลิเมอร์ผสมที่มีความไม่เข้ากันจะมีการยึดติดระหว่างเฟสที่ไม่ดี ซึ่งมี PLA เป็นเฟสกระจายตัว โดยในกรณีที่ไม่มีการเติม JC พบว่าเฟสกระจายตัวของ PLA จะมีลักษณะยึดตัวออกและมีลักษณะเป็นแบบเส้นใย (fibrils) ตามทิศทางการดึง โดยลักษณะเส้นใยที่ปรากฏนี้เกิดจากความเค้นที่ได้จากกระบวนการดึงยึดฟิล์ม สำหรับฟิล์ม 40PLA ที่มีการเติม JC ในสัดส่วน 0.3 และ 0.6 %wt เฟสกระจายตัวจะมีลักษณะเป็นทรงรีตามทิศทางการดึงยึดฟิล์ม โดยได้มีงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าการเติม Chain extender สามารถสร้างโคพอลิเมอร์ที่เกิดจากการเชื่อมโยงระหว่างพอลิเมอร์และพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง (ในกรณีนี้ คือ PLA-co-PBAT) ซึ่งจะช่วยให้การปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเฟส PLA และ PBAT โดยโคพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นนี้อาจทำหน้าที่เป็น Compatibilizer และทำให้แรงดึงผิวระหว่างผิวหน้าลดลง ส่งผลให้เฟสกระจายตัวมีความเสถียรในขนาดที่เล็กลง สำหรับสัณฐานวิทยาที่มีอัตราส่วนความหนืด ($h_d > h_m$) ที่มากกว่า 1 เช่นเดียวกันกับกรณีของ 40PLA/0.3JC และ 40PLA/0.6JC มักจะเกิดสัณฐานวิทยาแบบทรงรีมากกว่าเส้นใย แม้ว่าจะมีการปรับปรุงความเข้ากันได้ก็ตาม ซึ่งอาจเกิดจากโคพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นมีไม่เพียงพอที่จะส่งเสริมการยึดติดระหว่างเมทริกซ์กับเฟสกระจายตัว ดังที่เห็นในภาพ SEM



รูปที่ 2.34 ภาพ SEM ในทิศทางการขึ้นรูปฟิล์มตามแนวตั้ง (MD) และตามขวาง (TD) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม 40PLA ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ (a) 40PLA, (b) 40PLA/0.3JC และ (c) 40PLA/0.6JC [35]

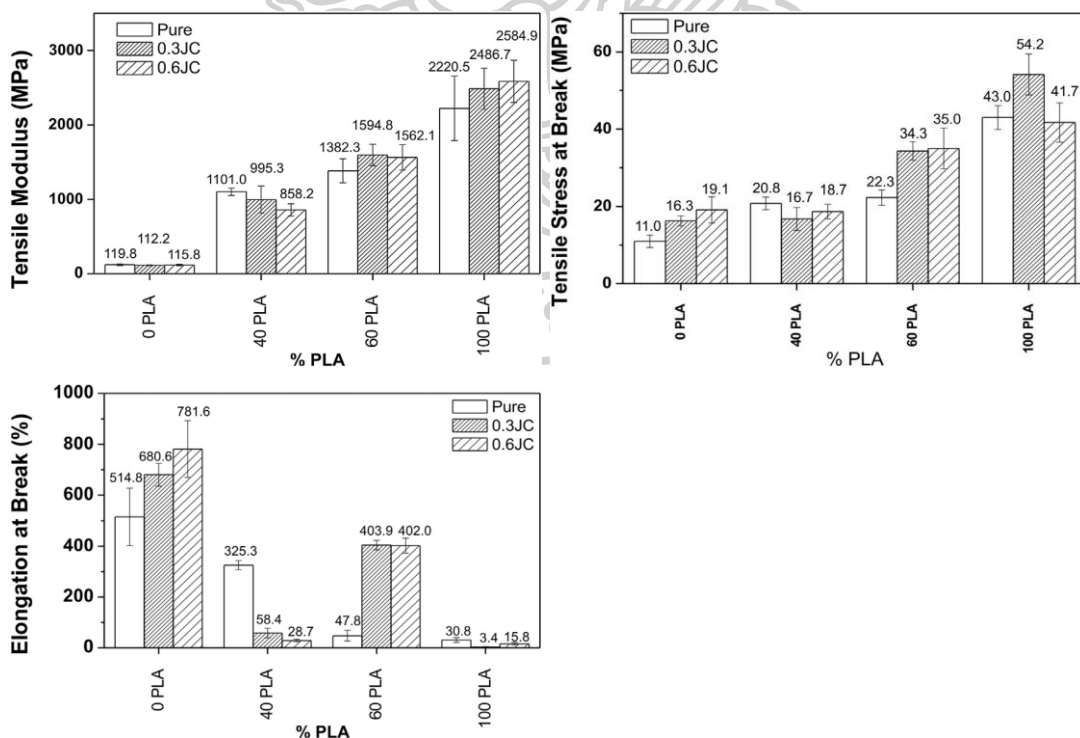
สำหรับสัณฐานวิทยาของฟิล์ม 60PLA ที่มีการเติมและไม่เติม JC ในทิศทางการขึ้นรูปฟิล์มตามแนวยาวและแนวขวาง แสดงดังรูปที่ 2.35 พบว่าพอลิเมอร์ผสมในสัดส่วนนี้จะมี PBAT เป็นเฟสกระจายตัว และมีลักษณะสัณฐานวิทยาแบบคล้ายริบบิ้นหรือแผ่นซึ่งจัดเรียงตัวตามทิศทางการดึงฟิล์ม โดยจะสังเกตเห็นโครงสร้างคล้ายกับ Skin core ซึ่งบริเวณตรงกลางเฟสกระจายตัวจะมีลักษณะหยาบ ในขณะที่บริเวณผิวฟิล์มจะมีลักษณะแบบเส้นใย เนื่องจากในระหว่างการไหลผ่านบริเวณปลายเปิด (die) พอลิเมอร์หลอมเหลวจะต้องได้รับแรงดัน ส่งผลให้มีอัตราการเฉือนสูงที่บริเวณใกล้ผนัง Die กล่าวคือจากที่บริเวณผิวฟิล์มมายังแกนกลางของฟิล์มจะมีอัตราการเฉือนที่ลดลง โดยการไล่ระดับของอัตราเฉือนนี้จะทำให้บริเวณแกนกลางของฟิล์มมีลักษณะสัณฐานวิทยาแบบหยาบ (อัตราเฉือนต่ำหรือเท่ากับ 0) และเมื่อเข้าใกล้บริเวณผิวฟิล์มจะมีขนาดของสัณฐานวิทยาแบบหยาบเล็กลงเนื่องจากอัตราเฉือนสูง จากนั้นเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่าน Die จะเกิดการยืดตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวใน 2 ทิศทาง คือ ทิศทางการดึง (machine direction; MD) และทิศทางตามขวาง (transversal direction; TD) ที่ตำแหน่งนี้อนุภาคทรงกลมจะถูกดึงและจัดเรียงตัว ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีการยืดตัวออก ซึ่งโครงสร้างแบบ Skin core ก็ปรากฏให้เห็นในฟิล์ม 40PLA ที่ไม่มีการเติม JC อย่างไรก็ตามฟิล์ม 60PLA ที่ไม่มีการเติม JC จะมีลักษณะที่หยาบกว่าฟิล์ม 60 PLA ที่มีการเติม JC นอกจากนี้ในกรณีของ 60PLA/0.3JC และ 60PLA/0.6JC จะมีแรงดึงผิวที่ต่ำและอัตราส่วนความหนืดที่น้อยกว่า 1 ส่งผลให้เกิดโครงสร้างแบบเส้นใยละเอียดที่ผิวหน้าเมื่อได้รับแรงดึง





รูปที่ 2.35 ภาพ SEM ในทิศทางการขึ้นรูปฟิล์มตามแนวตั้ง (MD) และตามขวาง (TD) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม 60PLA ที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ (a) 60PLA, (b) 60PLA/0.3JC และ (c) 60PLA/0.6JC [35]

สำหรับการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม JC ทำหน้าที่เป็น Chain extender แสดงดังรูปที่ 2.36 พบว่า PLA ที่เติมและไม่เติม Chain extender จะมีค่า Tensile modulus ในช่วง 2200 ถึง 2548 MPa เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างปลายสายโซ่ของ PLA และ JC ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของ PLA เพิ่มขึ้น ในขณะที่ PBAT จะมีค่า Tensile strength และ Elongation at break เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม Chain extender จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างปลายสายโซ่ PBAT และ JC สำหรับกรณีพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ในอัตราส่วน 40/60 ค่า Modulus ในกรณีที่เติม JC จะมีการลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่เติม JC เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะสัณฐานวิทยาจากเส้นใยไปเป็นลักษณะแบบหยด (droplet) นอกจากนี้เมื่อมีการเติม JC ยังส่งผลให้ค่า Elongation at break ของพอลิเมอร์ผสมลดลง เนื่องจาก Chain extender จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาจากเส้นใยไปเป็นลักษณะแบบหยด และแบบทรงรี (ellipsoids) เมื่อมีการเติม JC ในปริมาณ 0.3 และ 0.6 %wt ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 60/40 การเติม JC จะทำให้ค่า Elongation at break เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเฟส PBAT ที่กระจายตัวจากลักษณะแผ่นหยาบ (coarse sheet) ไปเป็นเส้นใย

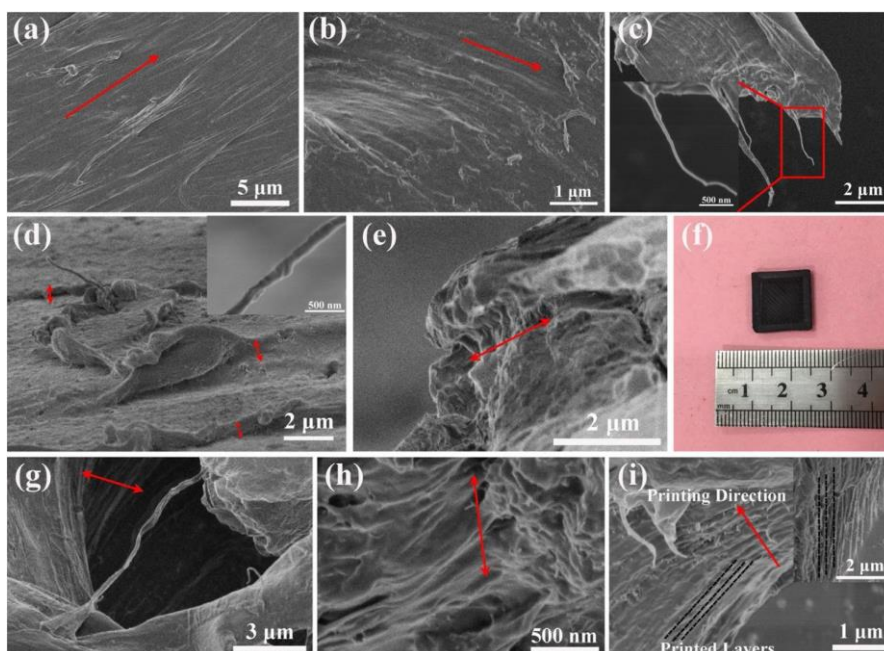


รูปที่ 2.36 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมและไม่เติม Chain extender [35]

งานวิจัยของ Zhou และคณะ [36] ศึกษาการเตรียมคอมพอสิต PLA/CNT ผ่านกระบวนการอัดรีด (extrusion) และการขึ้นรูปแบบ 3D-printing โดยได้ศึกษาการจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของ CNT ใน PLA และศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของคอมพอสิต PLA/CNT ซึ่งจากการทดสอบด้วยเทคนิค SEM พบว่าในรูปที่ 2.37(a) การจัดเรียงตัวของ PLA มีทิศทางตามลูกศรแสดงให้เห็นว่า PLA สามารถสร้างโครงสร้างระดับจุลภาคที่เป็นระเบียบผ่านกระบวนการอัดรีดได้ เช่นเดียวกันกับกรณีของ PLA/CNT-1 (รูปที่ 2.37(b)) ก็จะทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นระเบียบหลังผ่านกระบวนการ 3D-printing ในรูปที่ 2.37(c) แสดงถึงการจัดเรียงตัวและการกระจายของ CNT ในเมทริกซ์ PLA ซึ่ง CNT จะจัดเรียงตัวไปตามแนวของพื้นผิว PLA ดังที่แสดงในภาพ SEM ส่วนแรกในรูปที่ 2.37(c)

สำหรับคอมพอสิต PLA/CNT ที่ขึ้นรูปผ่านกระบวนการ 3D-printing จะพบโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นชั้น ซึ่งเกิดจากกระบวนการขึ้นรูป ดังรูปที่ 2.37(d-e) รูปที่ 2.37(e) แสดงให้เห็นว่าคอมพอสิตสามารถสร้างโครงสร้างแบบชั้นขนานกับหน้าตัดได้ และเพื่อศึกษาการจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของ CNT จึงได้เพิ่มปริมาณ CNT จากเดิม 1%wt เป็น 3%wt ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.37(f-i) โดยรูปที่ 2.37(g) แสดงโครงสร้างแบบชั้นที่หนาแน่นและ CNT ที่กระจายตัว และรูปที่ 2.37(h) แสดงโครงสร้างแบบชั้นที่มีลักษณะเหมือนหน้าผา (precipice) นอกจากนี้โครงสร้างแบบชั้นในรูปที่ 2.37(i) และในรูปแทรกแสดงถึงชั้นที่พิมพ์และทิศทางการพิมพ์ได้อย่างชัดเจน

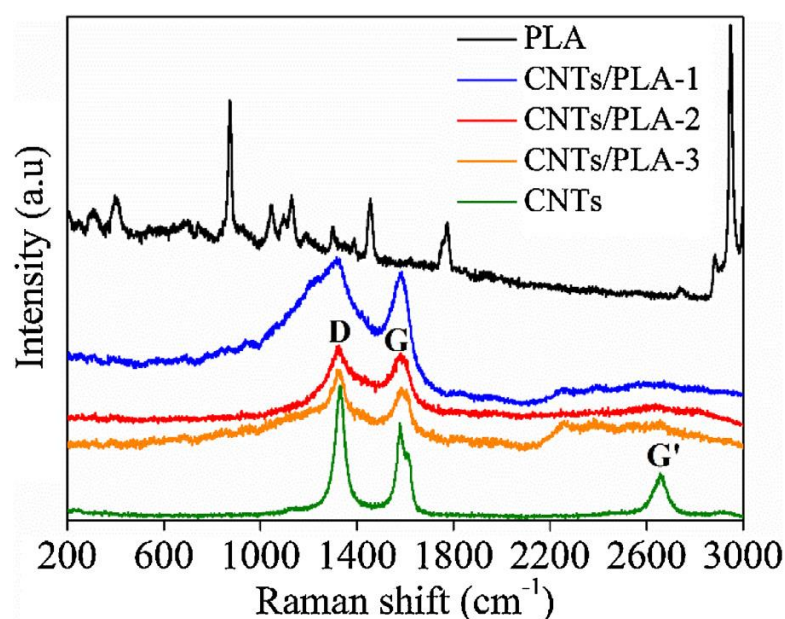




รูปที่ 2.37 ภาพ SEM ของคอมพอสิต PLA/CNT ก่อนและหลังการขึ้นรูป 3D printing (a) PLA บริสุทธิ์ (b-c) คอมพอสิต PLA/CNT-1 ที่มีปริมาณ CNT 1%wt หลังผ่านกระบวนการอัดรีด (d-e) คอมพอสิต PLA/CNT-1 ที่มีปริมาณ CNT 1%wt หลังผ่านกระบวนการ 3D printing (f) คอมพอสิต PLA/CNT-3 ที่ผ่านกระบวนการ 3D printing และ (g-i) คอมพอสิต PLA/CNT-1 ที่มีปริมาณ CNT 3%wt หลังผ่านกระบวนการ 3D printing [36]

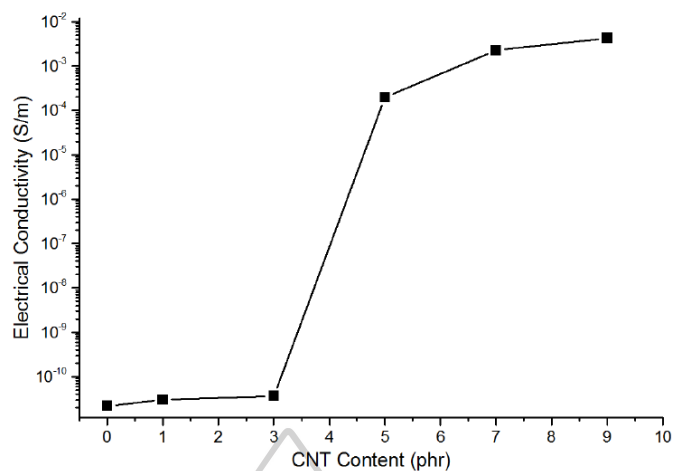
ในรูปที่ 2.38 แสดงสเปกตรัม Raman เพื่อศึกษาโครงสร้างเฉพาะของ CNT PLA และคอมพอสิต PLA/CNT พบว่า สำหรับคอมพอสิต PLA/CNT ทุกตัวอย่างจะแสดงสเปกตรัม Raman ที่แตกต่างจากของ PLA โดยจะปรากฏตำแหน่ง D-band ที่ 1330 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากไฮบริดไดซ์คาร์บอน sp^3 และ G-band ที่ตำแหน่ง 1582 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากไฮบริดไดซ์คาร์บอน sp^2 แสดงถึงการมีอยู่ของ CNT ในคอมพอสิต PLA/CNT นอกจากนี้ยังพบ G'-band ที่ตำแหน่ง 2656 cm^{-1} สำหรับ CNT บริสุทธิ์ แต่ไม่ปรากฏ G'-band ในคอมพอสิต PLA/CNT-1 และ PLA/CNT-2 โดยจะพบฟีกที่มีความเข้มน้อยมากในคอมพอสิต PLA/CNT-3 แสดงให้เห็นว่า PLA อาจจะรบกวนโฟนอน (phonon) และโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของโครงสร้างแกรฟีนใน CNT สำหรับความสมบูรณ์ของโครงสร้าง CNT สามารถหาได้จากอัตราส่วนความเข้มระหว่าง D-band และ G-band (I_D/I_G) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.37 1.07 1.05 และ 1.18 สำหรับ CNT บริสุทธิ์ คอมพอสิต PLA/CNT-1 PLA/CNT-2 และ PLA/CNT-3 ตามลำดับ พบว่า I_D/I_G ของคอมพอสิตจะต่ำกว่า CNT บริสุทธิ์ และ I_D/I_G ของคอมพอสิตที่มีปริมาณ

CNT เท่ากันหลังผ่านกระบวนการ 3D-printing จะต่ำกว่าก่อนผ่านกระบวนการ 3D-printing เนื่องจาก การคืนตัวของโดเมน sp^2 โดยการกำจัดหมู่ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยออกซิเจน นอกจากนี้ I_D/I_G ของ คอมพอสิต PLA/CNT-3 สูงกว่าคอมพอสิต PLA/CNT-2 บ่งบอกถึงการเพิ่มขึ้นของ CNT มีผลต่อผลึก แกรฟีนอย่างมีนัยสำคัญ



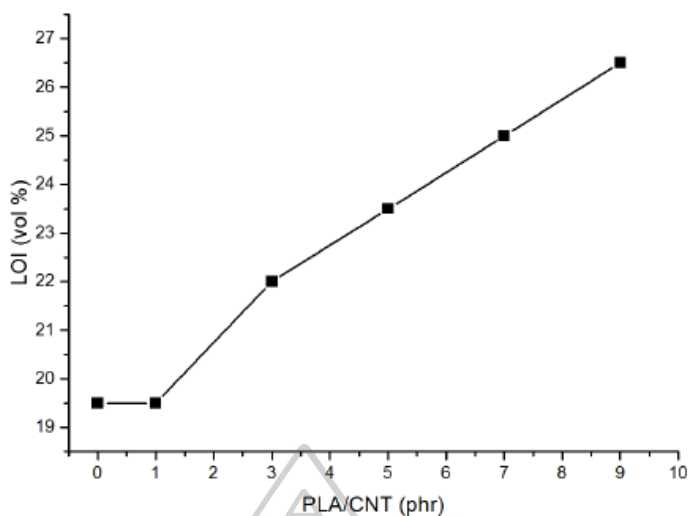
รูปที่ 2.38 สเปกตรัม Raman ของ PLA บริสุทธิ์ และคอมพอสิต PLA/CNT ก่อนและหลังผ่าน กระบวนการ 3D printing [36]

งานวิจัยของ Mat Desa และคณะ [11] ศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณ CNT ต่อสมบัติการนำ ไฟฟ้าและความสามารถในการติดไฟ (flammability) ของ PLA/CNT รูปที่ 2.39 แสดงค่าการนำ ไฟฟ้าของ PLA/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ โดยพบว่า การเติม CNT ในปริมาณ 1 และ 3 phr ส่งผล ให้ค่าการนำไฟฟ้าของ PLA/CNT เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อทำการเติม CNT ในปริมาณ 5 phr จะส่งผล ให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับการเติม CNT ในปริมาณ 3 phr และการเติม CNT ใน ปริมาณ 7 และ 9 phr ยังคงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของ PLA/CNT เพิ่มขึ้น แต่จะมีอัตราการเพิ่มขึ้น ลดลงเมื่อเทียบกับการเติมที่ 5 phr แสดงให้เห็นว่า CNT สามารถกระจายตัวใน PLA ได้ดีในปริมาณ 5 7 และ 9 phr และบ่งบอกถึง CNT สามารถเปลี่ยนสมบัติการนำไฟฟ้าของ PLA จากการเป็นฉนวน ทางไฟฟ้าไปเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าได้



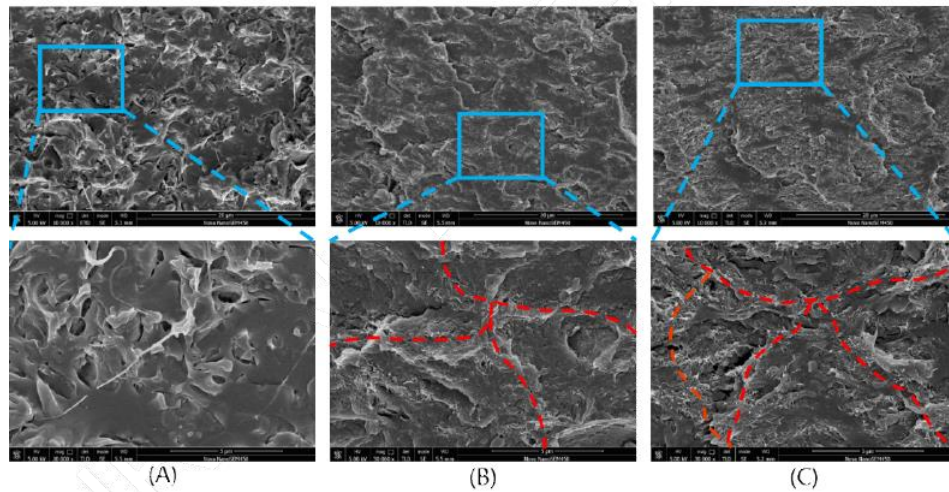
รูปที่ 2.39 ค่าการนำไฟฟ้าของ PLA/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ [11]

จากการทดสอบการติดไฟด้วยวิธี Limiting oxygen index (LOI) พบว่า เมื่อมีปริมาณ CNT มากขึ้น จะส่งผลให้ค่า LOI ของคอมพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นด้วย โดยเมื่อทำการเติม CNT ในปริมาณ 9 phr จะทำให้ค่า LOI มีค่าเท่ากับ 26.5 vol% ส่วนกรณีที่ไม่เติม CNT จะมีค่า LOI อยู่ที่ 19.5 vol% ดังรูปที่ 2.40 เนื่องจากในกรณีของ PLA บริสุทธิ์ กลไกต้านการติดไฟเกิดเพียงกลไกเดียว คือ เมื่อ PLA ถูกเผาไหม้จะมีการสร้างแก๊สซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงจากการสลายตัวอันเนื่องมาจากความร้อนของ PLA ซึ่งแก๊สที่เกิดขึ้นจะทำการยับยั้งการลามไฟ (propagation) ของเปลวไฟ ในขณะที่กรณีของคอมพอลิเมอร์ PLA/CNT จะมีกลไกเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งกลไก คือ เมื่อคอมพอลิเมอร์ถูกเผาไหม้นอกจากเกิดแก๊สขึ้นมาแล้วยังทำให้เกิดขี้เถ้า (char) อันเนื่องมาจาก CNT ซึ่งปกคลุมอยู่บนพื้นผิวของวัสดุที่กำลังลุกติดไฟ ซึ่งขี้เถ้าจะเป็นฉนวนในการป้องกันการถ่ายโอนความร้อน



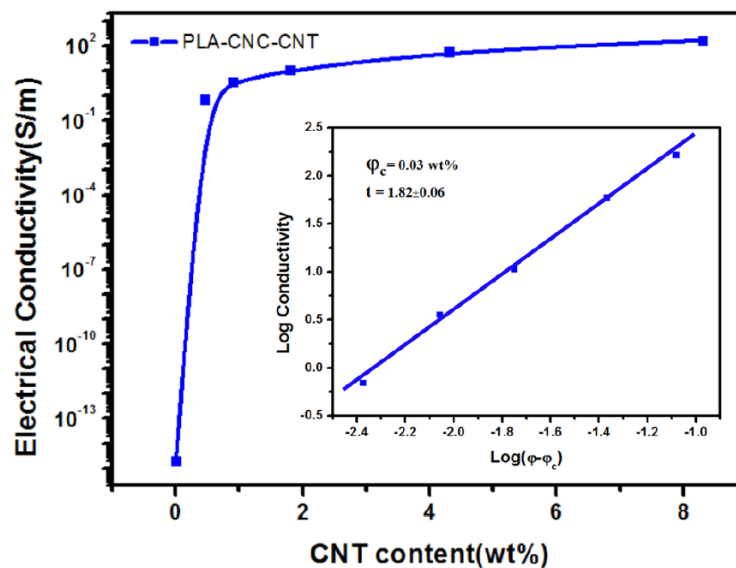
รูปที่ 2.40 ค่า LOI ของ PLA บริสุทธิ์ และคอมพอสิต PLA/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ [11]

งานวิจัยของ Yu และคณะ [2] ศึกษาการสังเคราะห์คอมพอสิตระหว่าง PLA Cellulose nanocrystals (CNC) และ CNT ด้วยวิธี Pickering emulsion เพื่อป้องกัน EMI โดยจากการทดสอบ SEM ได้ผลดังรูปที่ 2.41 ในกรณีของคอมพอสิต PLA/CNC พบว่า CNC จะมีการกระจายตัวในเฟสของ PLA อย่างสม่ำเสมอ แต่ปริมาณ CNC ที่มากจะไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่ PLA ทำให้เกิดช่องว่าง (void) บางส่วนขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของทั้งสองเฟส แต่เมื่อมีการเติม CNT พื้นผิวที่แตกหักมีความเรียบมากขึ้น ในขณะที่การเชื่อมโยงโครงร่างตาข่ายสามมิติ (interconnected 3D network) ของ CNT จะเกิดการรวมกลุ่มเล็กน้อย (เส้นสีแดง)



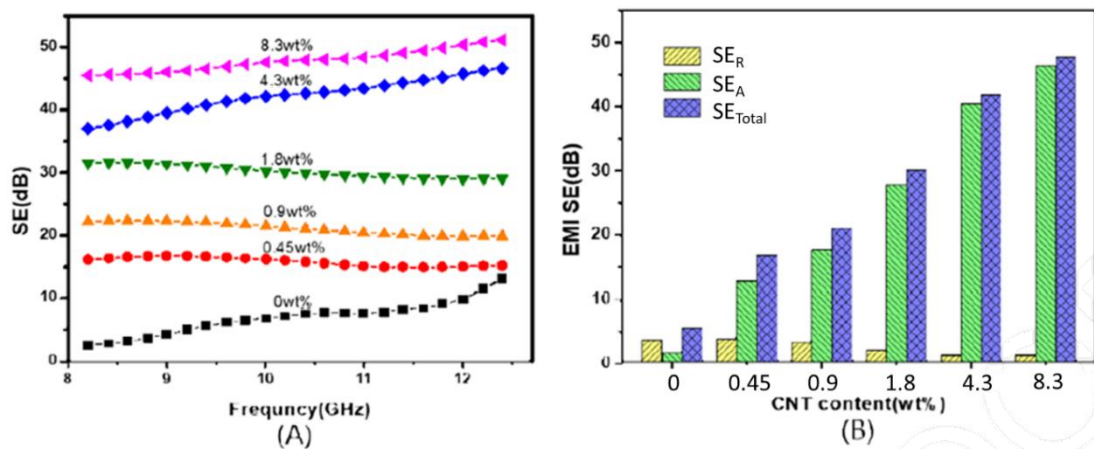
รูปที่ 2.41 ภาพ SEM พื้นผิวแตกหักของคอมพอสิต PLA/CNC/CNT ที่ปริมาณ CNC 0.2%wt และมีการเติม CNT ในปริมาณต่าง ๆ (a) 0%wt (b) 0.9%wt และ (c) 4.3%wt [2]

จากผลทดสอบการนำไฟฟ้าในรูปที่ 2.42 พบว่าเมื่อทำการเติม CNT ในปริมาณ 0.9%wt ส่งผลให้การนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 3.6 S/m และเมื่อทำการเติม CNT ที่ 4.3%wt ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 59.3 S/m ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่างานวิจัยอื่นที่สังเคราะห์คอมพอสิต PLA/CNT ผ่านวิธีการผสมแบบหลอมเหลว (melt mixing) หรือการผสมแบบสารละลาย (solution mixing) เนื่องจากการเกิดการเชื่อมโยงโครงร่างตาข่ายสามมิติของ CNT ขึ้น และเมื่อคำนวณหาปริมาณ CNT ที่น้อยที่สุดที่ทำให้คอมพอสิตนำไฟฟ้าได้ (percolation threshold) มีค่าอยู่ที่ 0.03%wt



รูปที่ 2.42 ค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิต PLA/CNC/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ [2]

นอกจากนี้การเติม CNT ยังส่งเสริมในการป้องกัน EMI สังเกตได้จากรูปที่ 2.43 ซึ่งพบว่า PLA/CNC นั้นมีค่า EMI SE ที่ต่ำ (เฉลี่ยประมาณ 5.71 dB) แต่เมื่อมีการเติม CNT ที่ 0.9 %wt จะทำให้ค่า EMI SE เพิ่มขึ้นจนมีค่าเฉลี่ยที่ 21.1 dB (รูปที่ 2.43(a)) ซึ่งโดยทั่วไปวัสดุป้องกัน EMI ที่มีการจำหน่ายในเชิงพาณิชย์จะมี EMI SE เท่ากับ 20 dB ดังนั้นการเติม CNT เพียง 0.9%wt ก็เพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการป้องกัน EMI รูปที่ 2.43(b) แสดงค่าประสิทธิภาพการป้องกัน EMI โดยรวม (SE_{Total}) ประสิทธิภาพการป้องกัน EMI จากกลไกการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE_A) และประสิทธิภาพการป้องกัน EMI จากกลไกการสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE_R) พบว่าค่า SE_A จะมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อมีการเติม CNT ซึ่งส่งผลให้ค่า SE_{Total} เพิ่มขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่ากลไกหลักในการป้องกัน EMI คือ กลไกการดูดกลืน เนื่องจาก CNT ทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายของการนำไฟฟ้า จะทำให้ระยะอิสระเฉลี่ย (mean free path) ยาวขึ้น ส่งผลให้สามารถลดทอนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แทรกผ่านเข้ามาในวัสดุได้ ในขณะที่ค่า SE_R ของคอมพอสิตมีค่าลดลงเล็กน้อย บ่งบอกถึงว่าโครงร่างตาข่ายของ CNC จะทำหน้าที่ป้องกัน EMI แบบสะท้อนนั้นไม่ได้เป็นกลไกหลักในการป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 2.43 ประสิทธิภาพการป้องกัน EMI (EMI SE) ของคอมพอสิต PLA/CNC/CNT (a) ค่า EMI SE ในช่วงความถี่ 8-13 GHz และ (b) SE_{Total} , SE_R และ SE_A ของคอมพอสิต PLA/CNC/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ [2]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid; PLA) เกรด 2003D จากบริษัท NatureWorks LLC จำกัด ประเทศไทย

2. พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (polybutylene adipate-co-terephthalate; PBAT) เกรด Ecoflex®F Blend C1200 จากบริษัท BASF

3. ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide; DCP) จากบริษัท SIGMA-ALDRICH

มีสถานะเป็นของแข็ง สูตรโมเลกุล คือ $C_{18}H_{22}O_2$ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 270.37 g/mol ความหนาแน่นเท่ากับ 1.107 g/cm³ อุณหภูมิการหลอมเหลวมีค่า 39.8 °C ทำหน้าที่เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา (initiator)

4. ไกลซิديلเมทาคริเลต (glycidyl methacrylate; GMA) จากบริษัท SIGMA-ALDRICH

มีสถานะเป็นของเหลว สูตรโมเลกุล คือ $C_7H_{10}O_3$ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 142.15 g/mol ความหนาแน่นเท่ากับ 1.07 g/cm³ จุดเดือดมีค่า 189 °C

5. คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยหมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic-functionalized carbon nanotube; CNT-COOH) เกรด HDPlas® MWCNT - COOH จากบริษัท Haydale

6. คลอโรฟอร์มดิคลอไรด์ (d-chloroform) จากบริษัท SIGMA-ALDRICH

7. คลอโรฟอร์ม (chloroform) จากบริษัท RCI Labscan

8. เอทานอล (ethanol) จากบริษัท RCI Labscan

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องหลอมผสมภายใน (internal mixer) รุ่น W50EHT ของบริษัท Brabender ประเทศเยอรมนี



รูปที่ 3.1 เครื่องหลอมผสมภายใน (internal mixer)

2. เครื่องขึ้นรูปด้วยการกดอัด (compression molding machine) รุ่น LP-S-50 ของบริษัท Labtech Engineering ประเทศไทย



รูปที่ 3.2 เครื่องขึ้นรูปด้วยการกดอัด (compression molding machine)

3. เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างสารประกอบด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (nuclear magnetic resonance spectrometer; NMR) รุ่น Avance III HD 300 MHz ของบริษัท Bruker ประเทศเยอรมนี

4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) รุ่น Tabletop Microscope TM 3030 ของบริษัท Hitachi High-Technologies ประเทศญี่ปุ่น



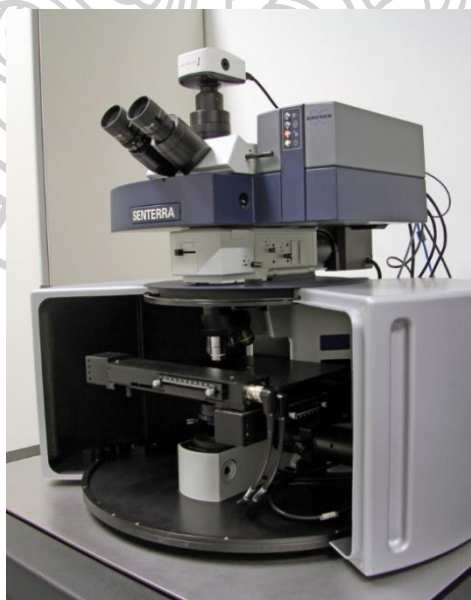
รูปที่ 3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

5. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD) รุ่น XRD-6100 ของบริษัท Shimadzu Corporation ประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ X-ray diffractometer (XRD)

6. เครื่องวิเคราะห์เชิงโมเลกุลและหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิครามานสเปคโตรสโคปี (raman spectrophotometer) รุ่น Bruker Optics SENTERRA R200-785 ของบริษัท Bruker ประเทศเยอรมนี



รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์เชิงโมเลกุลหรือหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิครามานสเปคโตรสโคปี (raman spectrometer)

7. เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนเชิงพลังงาน (differential scanning calorimeter; DSC) รุ่น DSC1 ของบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์



รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนเชิงพลังงาน (DSC)

8. เครื่องวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิกความร้อน (thermogravimetric analyzer; TGA) รุ่น TGA/DSC1 ของบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์



รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิกความร้อน (TGA)

9. เครื่องทดสอบแรงดึงหรือแรงกด (universal testing machine) โมเดล 5969 ของบริษัท Instron Engineering ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบแรงดึงหรือแรงกด (universal testing machine)

10. เครื่องวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (resistivity chamber) รุ่น Keithley model 6150 ของบริษัท Keithley ประเทศสหรัฐอเมริกา

11. เครื่องวิเคราะห์คลื่นไมโครเวฟ (microwave analyzer) สำหรับการทดสอบ EMI SE รุ่น N9952B FieldFox 50 GHz ของบริษัท Keysight ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

ตอนที่ 1 สังเคราะห์ PLA-g-GMA เพื่อทำหน้าที่เป็น Compatibilizer และศึกษาผลของปริมาณ PLA-g-GMA ที่มีต่อความเข้ากันได้และสมบัติของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

1. เตรียม PLA-g-GMA โดยผสม GMA และ DCP ลงในปิกเกอร์ในอัตราส่วน 5:1 %wt ทำการกวนจนกระทั่ง DCP ละลายหมด จากนั้นทำการใส่ PLA ในเครื่อง Internal mixer แล้วทำการหลอมผสมที่อุณหภูมิ 180 °C และความเร็วรอบ 60 rpm เป็นเวลา 1 นาที แล้วทำการเทสารละลายผสมระหว่าง GMA และ DCP ปริมาณ 10 %wt เทียบกับพอลิเมอร์ผสม ลงในเครื่อง Internal mixer ทำการหลอมผสมเป็นเวลา 10 นาที จะทำให้ได้ PLA-g-GMA เกิดขึ้น จากนั้นนำ PLA-g-GMA ที่ได้มาละลายใน Chloroform เมื่อละลายเป็นเนื้อเดียวกันแล้วจึงเทสารละลายลงในตัวทำละลายผสมระหว่าง Chloroform และ Ethanol (1:20 %vol) เพื่อทำการตกตะกอน แล้วล้างตะกอนที่ได้ด้วย Ethanol หลังจากนั้นนำ PLA-g-GMA ที่ได้มาอบที่อุณหภูมิ 80 °C เพื่อไล่ตัวทำละลาย

2. วิเคราะห์โครงสร้างและหาเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ของ PLA-g-GMA ด้วยเทคนิค ^1H NMR โดยนำ PLA-g-GMA ที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์และทำการอบแล้วจากข้อ 1 ข้างต้น มาละลายใน d-Chloroform แล้วนำไปทดสอบ ^1H NMR และทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ของ GMA บน PLA-g-GMA โดยทำการอินทิเกรตพื้นที่ใต้พีกเอกลักษณ์โดยกำหนดให้พีกที่ตำแหน่ง 1.6 ppm เป็นพีกเอกลักษณ์ของ PLA และพีกที่ตำแหน่ง 1.8 ppm เป็นพีกเอกลักษณ์ของ PLA-g-GMA แล้วทำการคำนวณตามสมการที่ 4

$$\% \text{ Grafting} = \frac{\text{relative area of characteristic peak of PLA-g-GMA}}{\text{relative area of characteristic peak of PLA}} \times 100 \quad (4)$$

3. เตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม PLA-g-GMA (PLA/PBAT/PLA-g-GMA) ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยในขั้นตอนแรกทำการหลอมผสม PBAT และ PLA-g-GMA ในเครื่อง Internal mixer ที่อุณหภูมิ 180 °C และความเร็วรอบ 60 rpm จนกระทั่งค่า Torque คงที่ จากนั้นทำการเติม PLA ลงไปและทำการหลอมต่อจนกระทั่งค่า Torque คงที่ โดยอัตราส่วนการผสมแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งอัตราส่วนผสมระหว่าง PLA และ PBAT จะคงที่เท่ากับ 60/40 %wt จากนั้นนำ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่มีสัดส่วน PLA-g-GMA ต่าง ๆ มาขึ้นรูปเป็นแผ่นซีทด้วยเครื่อง

Compression molding ที่อุณหภูมิ 180 °C ภายใต้ความดัน 10 MPa เป็นเวลา 10 นาที แล้วทำการเก็บแผ่นซีทที่ได้ไว้ในกล่องที่มี Silica gel เพื่อป้องกันความชื้น และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA

Sample	PLA (%wt)	PBAT (%wt)	PLA-g-GMA (%wt)
PLA/PBAT/PG0	60.0	40.0	0
PLA/PBAT/PG3	58.2	38.8	3
PLA/PBAT/PG6	56.4	37.6	6
PLA/PBAT/PG9	54.6	36.4	9

4. ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM เพื่อดูความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBAT ที่ปริมาณ PLA-g-GMA ต่าง ๆ โดยการนำตัวอย่างที่เป็นแผ่นซีทไปแช่ในไนโตรเจนเหลวและทำการหักตัวอย่างอย่างรวดเร็ว แล้วตัดตัวอย่างให้มีขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ ติดตั้งตัวอย่างบนสตั๊ป 90 องศา ด้วยเทปคาร์บอน จากนั้นรอยแตกหักของตัวอย่างจะถูกนำไปเคลือบด้วยทอง โดยใช้กระบวนการ Sputtering สำหรับค่าความเร่งศักย์ไฟฟ้า (acceleration voltage) ที่ใช้ในการทดสอบ SEM เท่ากับ 15 kV

5. ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC โดยทำการทดสอบในช่วง $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตราการให้ความร้อน $10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ด้วยรูปแบบ Heat-cool-heat โดยคงอุณหภูมิ (hold) ของแต่ละขั้นเป็นเวลา 1 นาที แล้วทำการวิเคราะห์ข้อมูลในการให้ความร้อนครั้งที่ 2

6. ศึกษาสมบัติการดึงยึดด้วยเครื่อง Universal testing machine ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882 โดยทำการตัดตัวอย่างให้มีขนาด $1 \times 6 \text{ inch}^2$ และกำหนดให้ระยะเกจ (gauge length) เท่ากับ 4 inch จากนั้นทำการทดสอบตัวอย่างด้วยอัตราการดึง (cross-head speed) $12.5 \text{ mm}/\text{min}$

ซึ่งจากการทดลองในตอนที่ 1 จะทำให้ทราบว่าปริมาณของ PLA-g-GMA ส่งผลต่อความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBAT อย่างไร จากนั้นจะทำการเลือกปริมาณของ PLA-g-GMA มา 1 อัตราส่วน โดยพิจารณาจากลักษณะสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA เพื่อนำไปใช้สำหรับการทดสอบในตอนที่ 2 ต่อไป

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของปริมาณ CNT ที่มีต่อสมบัติของคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT/CNT ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA

1. เตรียมคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT/PLA-g-GMA/CNT โดยในขั้นตอนแรกทำการหลอมผสม PBAT และ PLA-g-GMA ในเครื่อง Internal mixer ที่อุณหภูมิ 180 °C และความเร็วรอบ 60 rpm จนกระทั่งค่า Torque คงที่ จากนั้นทำการเติม PLA และ CNT ลงไปและทำการหลอมต่อจนกระทั่งค่า Torque คงที่ โดยอัตราส่วนการผสมแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งอัตราส่วนผสมระหว่าง PLA และ PBAT จะคงอยู่ที่ 60/40 %wt และในกรณีที่มีการเติม PLA-g-GMA จะใช้สัดส่วนของ PLA-g-GMA ที่เหมาะสมจากการทดลองตอนที่ 1 จากนั้นนำ PLA/PBAT/PLA-g-GMA/CNT มาขึ้นรูปเป็นแผ่นซีทด้วยเครื่อง Compression molding ที่อุณหภูมิ 180 °C ภายใต้ความดัน 10 MPa เป็นเวลา 10 นาที แล้วทำการเก็บแผ่นซีทคอมพอลิเมอร์ที่ได้ไว้ในกล่องที่มี Silica gel เพื่อป้องกันความชื้น และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง



ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของคอมพอสิต PLA/PBAT/PLA-g-GMA/CNT

Sample	PLA (%wt)	PBAT (%wt)	PLA-g-GMA (%wt)	CNT (phr)
PLA/PBAT/PG0/C0	60	40	0	0
PLA/PBAT/PG0/C1	60	40	0	1
PLA/PBAT/PG0/C3	60	40	0	3
PLA/PBAT/PG0/C5	60	40	0	5
PLA/PBAT/PG0/C10	60	40	0	10
PLA/PBAT/PGX/C0	A	B	X	0
PLA/PBAT/PGX/C1	A	B	X	1
PLA/PBAT/PGX/C3	A	B	X	3
PLA/PBAT/PGX/C5	A	B	X	5
PLA/PBAT/PGX/C10	A	B	X	10

หมายเหตุ : X คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ PLA-g-GMA ที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1

A และ B คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ PLA และ PBAT ซึ่งจะปรับเปลี่ยนตามสัดส่วนโดยน้ำหนักของ PLA-g-GMA (X) โดยอัตราส่วนผสม A:B จะคงที่เท่ากับ 60:40 %wt

2. ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM เพื่อดูการกระจายตัวของ CNT ในแผ่นซีทคอมพอสิต โดยการนำตัวอย่างที่เป็นแผ่นซีทไปแช่ในไนโตรเจนเหลวและทำการหักตัวอย่างอย่างรวดเร็ว แล้วตัดตัวอย่างให้มีขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ ติดตั้งตัวอย่างบนสตัป 90 องศา ด้วยเทปคาร์บอน จากนั้นรอยแตกหักของตัวอย่างจะถูกนำไปเคลือบด้วยทอง โดยใช้กระบวนการ Sputtering สำหรับค่าความเร่งศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ SEM เท่ากับ 15 kV

3. ศึกษาโครงสร้างของ CNT และคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ด้วย Raman spectrometer โดยใช้แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 532 nm ที่กำลัง 20 mW และ Aperture $25 \times 1000 \mu\text{m}$ โดยทดสอบในช่วง $50 - 4450 \text{ cm}^{-1}$

4. ศึกษาโครงสร้างและปริมาณผลึกของ CNT และคอมพอสิตด้วย X-ray diffractometer โดยใช้ Cu เป็น Target และทดสอบที่ 2-theta ระหว่าง $5^\circ - 50^\circ$ ที่อัตราการสแกน $2^\circ/\text{min}$

5. ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC โดยทำการทดสอบในช่วง $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตราการให้ความร้อน $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน ด้วยรูปแบบ Heat-cool-heat โดยคงอุณหภูมิของแต่ละขั้นเป็นเวลา 1 นาที แล้วทำการวิเคราะห์ข้อมูลในการให้ความร้อนครั้งที่ 2

6. ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA โดยทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตราการให้ความร้อน $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ภายใต้บรรยากาศแก๊สออกซิเจน

7. ศึกษาสมบัติการดึงยึดด้วยเครื่อง Universal testing machine ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882 โดยทำการตัดตัวอย่างให้มีขนาด $1 \times 6\text{ inch}^2$ และกำหนดให้ระยะเกจ (gauge length) เท่ากับ 4 inch จากนั้นทำการทดสอบตัวอย่างด้วยอัตราการดึง (cross-head speed) $12.5\text{ mm}/\text{min}$

8. ศึกษาสมบัติความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (volume resistivity) ด้วยเครื่อง Resistivity chamber ตามมาตรฐาน ASTM D257-14 โดยทำการตัดตัวอย่างให้มีขนาด $5 \times 5\text{ inch}^2$ โดยก่อนทดสอบจะทำการเก็บชิ้นงานทดสอบที่อุณหภูมิ $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ 50% เป็นเวลา 40 ชั่วโมง จากนั้นติดตั้งตัวอย่างระหว่างอิเล็กโทรดชนิดขั้วเรียบ (Agilent 16008B) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 50 mm และเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 70 mm แล้วทำการให้ไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดัน 500 V เป็นเวลา 60 วินาที แล้ววัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร

9. ทดสอบประสิทธิภาพในการป้องกัน EMI (EMI SE) ด้วยเครื่อง Microwave analyzer ตามมาตรฐาน IEEE STD 299TM - 2006 โดยทำการตัดตัวอย่างให้มีขนาด $15 \times 15\text{ cm}^2$ แล้วนำมาติดตั้งใน Specimen holder โดยทดสอบในช่วงความถี่ 700 MHz ถึง 2600 MHz

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBAT ที่มีต่อสมบัติของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT เนื่องจากปัจจุบันมีแนวโน้มการใช้งานพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพิ่มมากขึ้น เพื่อลดการสะสมของขยะและมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ที่นิยมนำมาใช้งานกันมาก คือ PLA อย่างไรก็ตาม PLA เป็นวัสดุที่แข็งแต่เปราะ ทำให้เกิดข้อจำกัดการใช้งาน จึงได้มีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาเพื่อที่จะปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงเปราะของ PLA ซึ่งวิธีที่นิยมใช้ในการปรับปรุงสมบัติ PLA คือ การเติมเทอร์โมพลาสติกที่มีความเหนียวสูงเข้าไปผสมกับ PLA โดยเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้ปรับปรุงความแข็งแรงของ PLA คือ PBAT อย่างไรก็ตาม PLA และ PBAT มีความไม่เข้ากัน ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นที่จะทำการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBAT โดยใช้ PLA-g-GMA ทำหน้าที่เป็น Compatibilizer ซึ่งจะเริ่มจากการสังเคราะห์ PLA-g-GMA จากนั้นทำการเตรียมแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ในสัดส่วน 60/40 %wt และมีการเติม PLA-g-GMA ในสัดส่วนต่าง ๆ เพื่อศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของ PLA-g-GMA ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBAT โดยจะพิจารณาจากลักษณะสัญญาณวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่เตรียมได้ จากนั้นจะนำสัดส่วนการเติม PLA-g-GMA ที่เหมาะสมมาทำการศึกษาผลของปริมาณ CNT ที่มีต่อสมบัติของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA โดยจะทำการศึกษาสมบัติของคอมพอสิต ได้แก่ ลักษณะสัญญาณวิทยา โครงสร้างของ CNT ในคอมพอสิต ปริมาณผลึก สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติการนำไฟฟ้า และความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

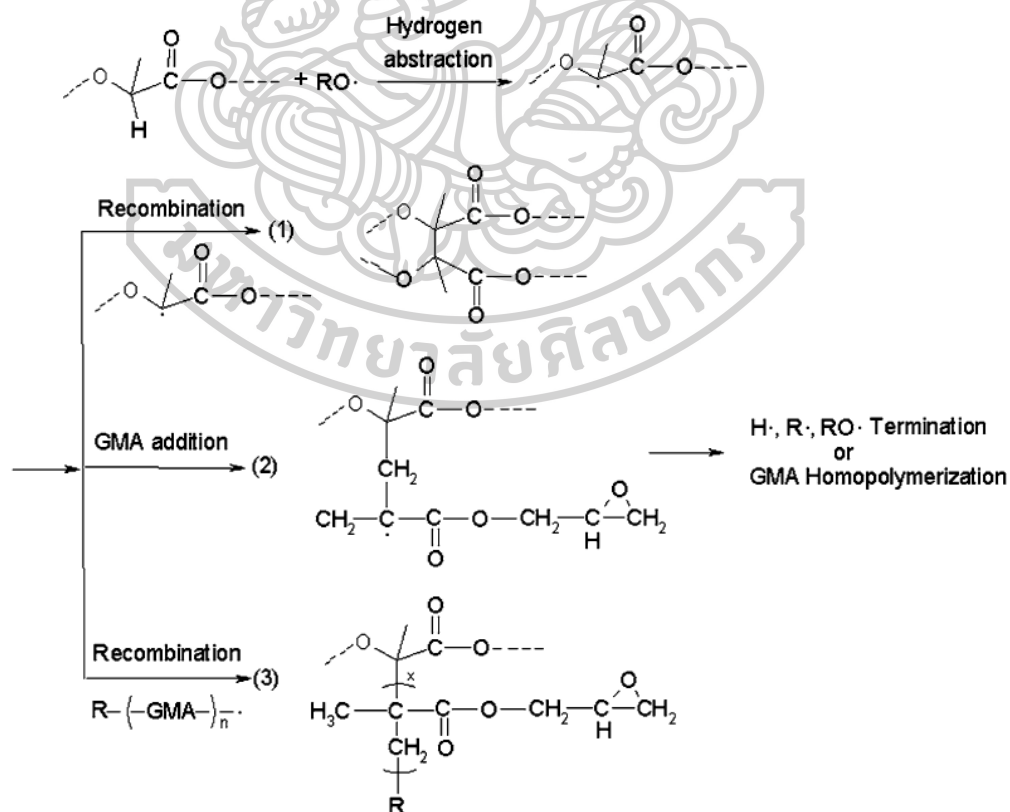
ตอนที่ 1 สังเคราะห์ PLA-g-GMA เพื่อทำหน้าที่เป็น Compatibilizer และศึกษาผลของปริมาณ PLA-g-GMA ที่มีต่อความเข้ากันได้และสมบัติของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของปริมาณ CNT ที่มีต่อสมบัติของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA

ตอนที่ 1 สังเคราะห์ PLA-g-GMA เพื่อทำหน้าที่เป็น Compatibilizer และศึกษาผลของปริมาณ PLA-g-GMA ที่มีต่อความเข้ากันได้และสมบัติของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่มีการเติม PLA-g-GMA ในสัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้เทคนิค Nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR)

ในการศึกษาผลของปริมาณ PLA-g-GMA ที่ทำหน้าที่เป็น Compatibilizer ที่มีต่อความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBAT นั้น PLA-g-GMA จะถูกสังเคราะห์ด้วยวิธี Melt blending ในเครื่อง Internal mixer แล้วนำ PLA-g-GMA ที่ได้ไปตกตะกอนเพื่อทำให้บริสุทธิ์ โดยกลไกการสังเคราะห์ PLA-g-GMA ที่อาจเกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์จะเริ่มจากการตัดสายโซ่ของตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) หรือ DCP และอนุมูลอิสระเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะไปจับกับไฮโดรเจนที่ตำแหน่งแอลฟา-คาร์บอน (α -carbon) ของ PLA แล้วเกิดเป็นอนุมูลอิสระ PLA ขนาดใหญ่ (PLA macroradical) สำหรับการสิ้นสุดปฏิกิริยา (termination reaction) จะสามารถเกิดได้หลากหลายวิธีผ่านการกราฟต์กับ GMA หรือปฏิกิริยาการรวมตัวกลับ (recombination) พร้อมกับปฏิกิริยาที่เป็นไปได้อื่น ๆ ที่อาจเกิดขึ้น [37] ดังแสดงในรูปที่ 4.1

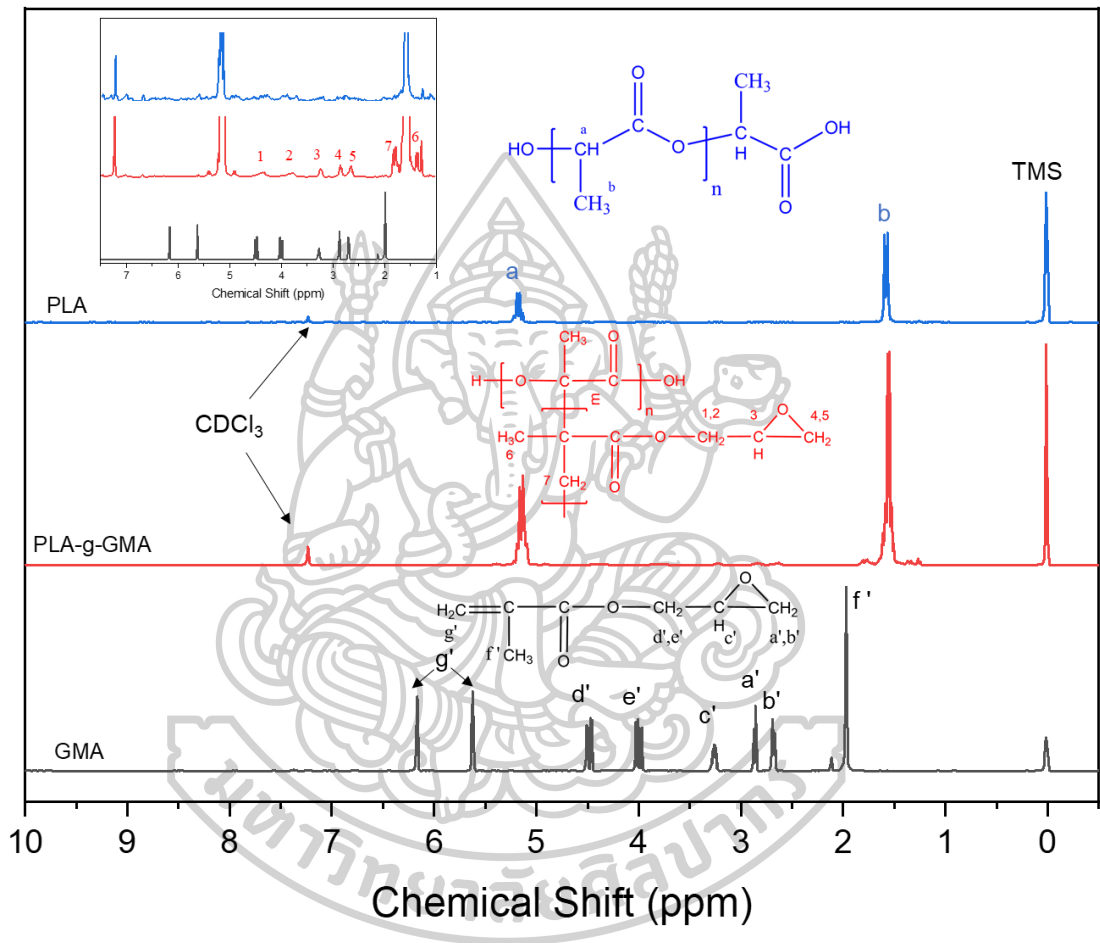


รูปที่ 4.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาที่อาจเป็นไปได้ของ PLA-g-GMA [37]

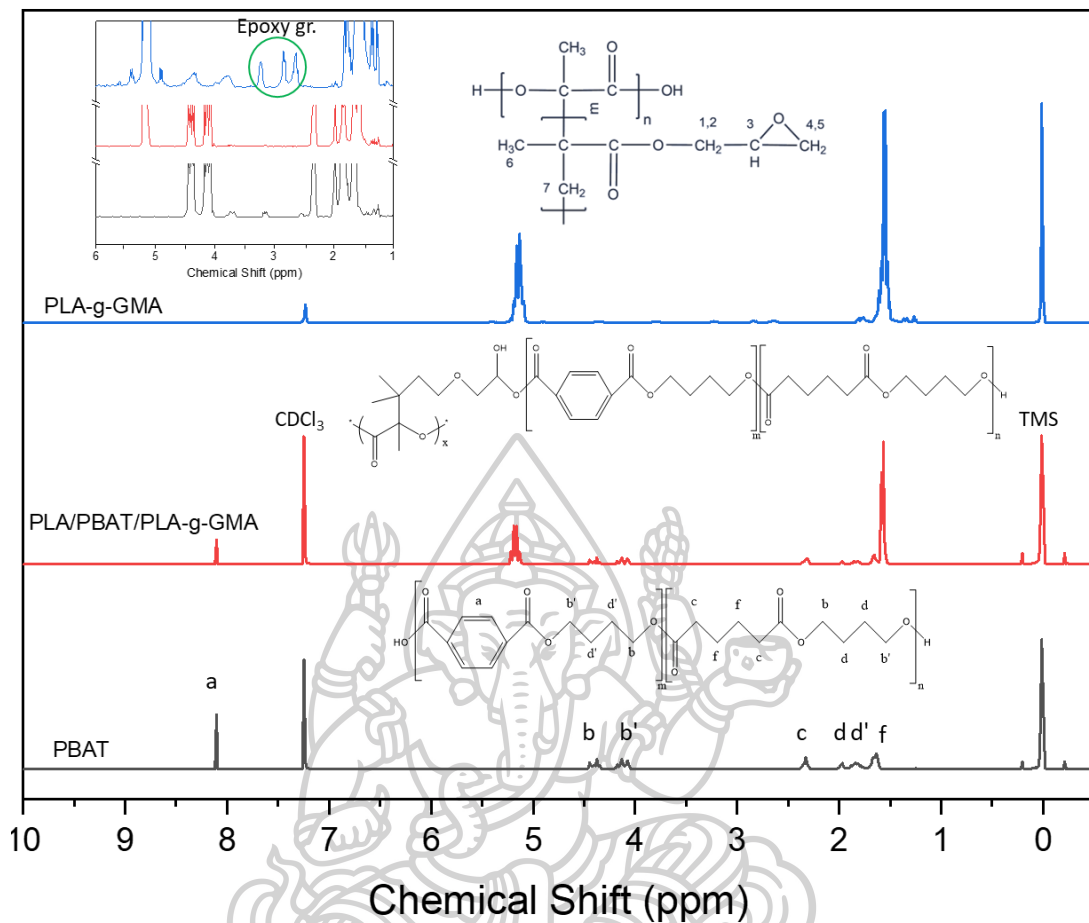
จากนั้นเพื่อยืนยันการกราฟต์ของ GMA บนสายโซ่ PLA และหาเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ของ GMA ใน PLA-g-GMA จึงได้ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของ PLA GMA และ PLA-g-GMA ที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเทคนิค Proton NMR ($^1\text{H-NMR}$) โดยรูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของ PLA GMA และ PLA-g-GMA จากผลการทดสอบ พบว่า PLA และ PLA-g-GMA จะปรากฏพีกที่เหมือนกัน 2 ตำแหน่ง คือ 5.2 และ 1.6 ppm ซึ่งเป็นตำแหน่งของโปรตอนในเมไทม์ (methine; CH) และเมทิล (methyl; CH_3) บนสายโซ่ PLA ในตำแหน่ง a และ b ตามลำดับ [37-39] นอกจากนี้ PLA-g-GMA ยังปรากฏพีกตำแหน่งใหม่ในช่วงประมาณ 1.0-4.4 ppm ซึ่งเป็นตำแหน่งของโปรตอนในตำแหน่งที่ 1-7 ในโครงสร้างของ GMA [34, 39, 40] ที่อยู่บนสายโซ่ของ PLA-g-GMA ดังรูปที่ 4.2 และยังพบว่า พีกจะมีการเลื่อนไปทางขวาเล็กน้อย เนื่องจากกลุ่มของโมเลกุลข้างเคียงของโปรตอนใน GMA บนสายโซ่ PLA-g-GMA แตกต่างกับกลุ่มของโมเลกุลข้างเคียงของโปรตอนใน GMA บริสุทธิ์ จึงส่งผลต่อค่า Chemical shift ที่มีการเปลี่ยนตำแหน่งไป [34, 39] ดังนั้นจากการปรากฏพีกใหม่ของ PLA-g-GMA ที่เพิ่มเติมจากพีกของ PLA และสอดคล้องกับพีกของ GMA จึงเป็นการยืนยันว่าสามารถสังเคราะห์ PLA-g-GMA ได้สำเร็จ และเมื่อทำการคำนวณเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ตามสมการที่ 4 โดยกำหนดพีกตำแหน่ง 1.6 ppm เป็นพีกเอกลักษณ์ของ PLA และพีกที่ตำแหน่ง 1.8 ppm เป็นพีกเอกลักษณ์ของ PLA-g-GMA จะได้ค่าเท่ากับ 1.03% ซึ่งเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ของ PLA-g-GMA ที่สังเคราะห์ได้อาจมีค่าน้อย เนื่องจากในงานวิจัยของ Kangwanwatthanasiri P. และคณะ [41] ได้ทำการสังเคราะห์ PLA-g-GMA ที่มีเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ เท่ากับ 2.28% โดยใช้ DCP และ GMA ในปริมาณ 0.2 %wt และ 10 %wt ตามลำดับ และในงานวิจัยของ Liu J. และคณะ [37] สามารถทำการสังเคราะห์ PLA-g-GMA ที่มีเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ได้มากถึง 11.0 %wt เมื่อใช้ Benzoyl peroxide (BPO) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาในปริมาณ 10%wt ของ GMA และใช้ GMA ในปริมาณ 20 %wt ของ PLA

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาระหว่าง PBAT และ PLA-g-GMA จากสเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ที่แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าสำหรับ PBAT จะปรากฏพีกเอกลักษณ์ที่ตำแหน่ง 1.6 ppm และ 1.8-1.9 ppm ซึ่งสอดคล้องกับโปรตอนตำแหน่ง f d และ d' ในโครงสร้างของ PBAT ตามลำดับ นอกจากนี้ยังปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2.3 ppm ซึ่งสอดคล้องกับโปรตอนในตำแหน่ง c อีกทั้งพีกที่ตำแหน่ง 4.0-4.1 ppm และ 4.3-4.4 ppm แสดงถึงโปรตอนในตำแหน่ง b และ b' ตามลำดับ โดยโปรตอนของหมู่ฟีนิลในโครงสร้างของ PBAT จะปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 8.03 ppm [42, 43] ในขณะที่พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA จะปรากฏพีกเอกลักษณ์ทั้งของ PLA PBAT และ PLA-g-GMA อย่างไรก็ตาม PLA/PBAT/PLA-g-GMA จะไม่ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2.6 2.8 และ 3.2 ppm ซึ่งสอดคล้องกับ

โปรตอนของหมู่อีพอกซีในโครงสร้างของ PLA-g-GMA เช่นเดียวกับพีคที่ตำแหน่ง 3.6-3.8 ที่สอดคล้องกับเมทิลีนที่อยู่ติดกับหมู่คาร์บอกซิลิกที่ปลายสายโซ่ของ PBAT ก็จะไม่ปรากฏในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA บ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่อีพอกซีของ PLA-g-GMA และหมู่คาร์บอกซิลิกของ PBAT [44-46]



รูปที่ 4.2 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของ PLA GMA และ PLA-g-GMA



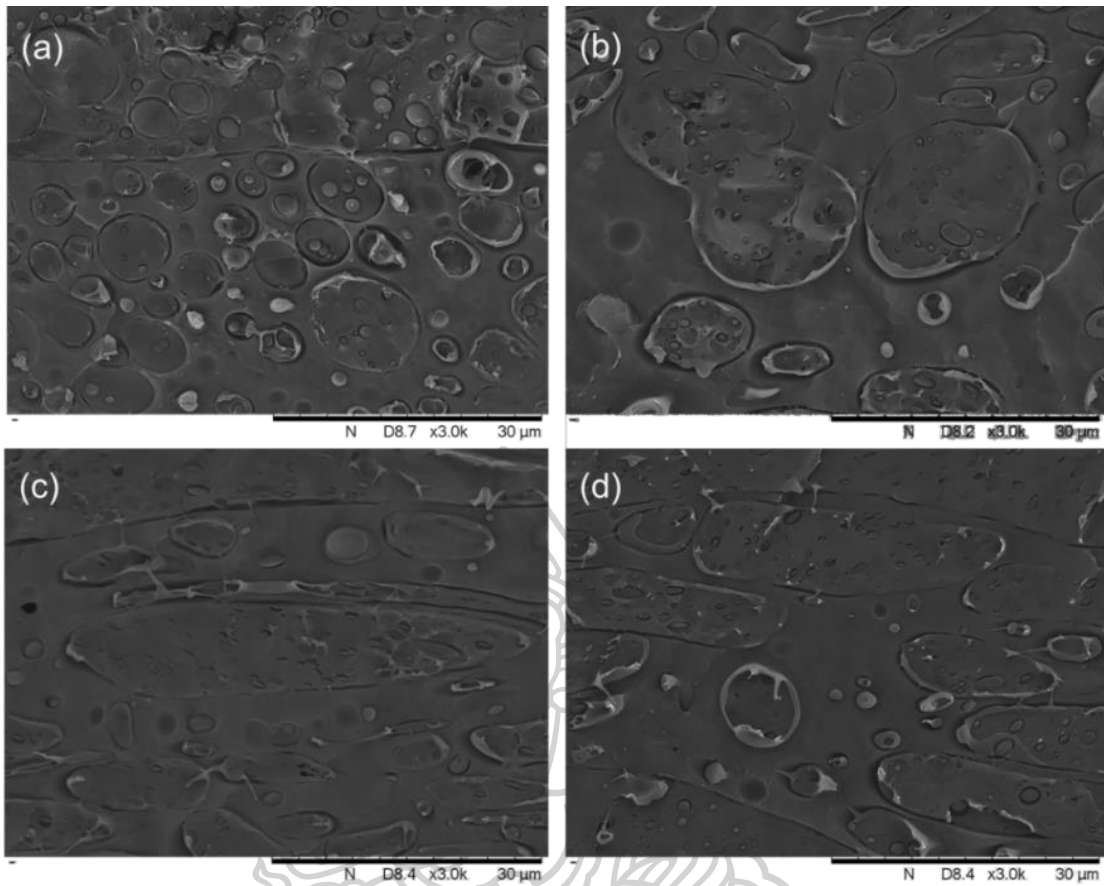
รูปที่ 4.3 สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของ PBAT, PLA-g-GMA และ PLA/PBAT/PLA-g-GMA

4.2 ลักษณะวิทยาของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่มีการเติม PLA-g-GMA ในสัดส่วนต่าง ๆ

การศึกษาลักษณะสัณฐานทางวิทยาของแผ่นซีทพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่มีการเติม PLA-g-GMA ในสัดส่วนต่าง ๆ เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งงานตัวอย่างจะถูกนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวแล้วทำให้ชิ้นงานแตกหักอย่างรวดเร็ว โดยรูปที่ 4.4 แสดงภาพ SEM ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่มีการเติม PLA-g-GMA ในสัดส่วนต่าง ๆ

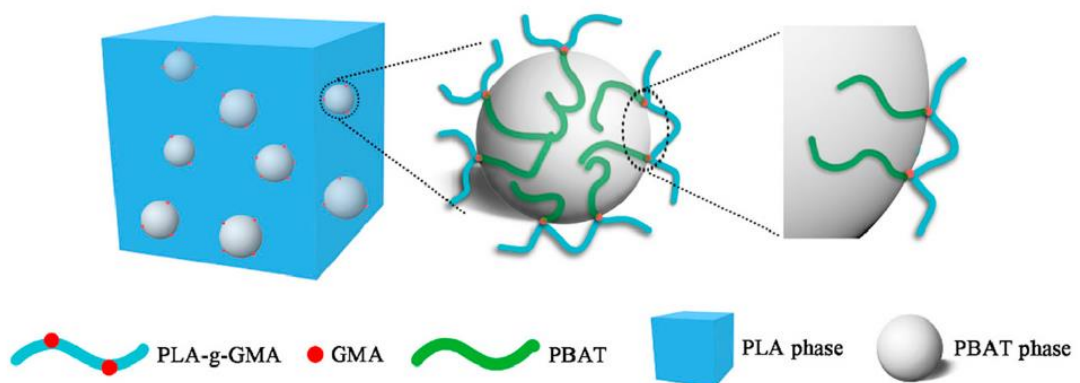
จากภาพ SEM พบว่าเมื่อทำการศึกษาลักษณะวิทยาของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA พบว่า PLA/PBAT ที่ไม่มีการเติม PLA-g-GMA จะมีลักษณะสัณฐานวิทยาเป็นแบบ Sea-island โดย PBAT มีลักษณะที่ค่อนข้างกลมกระจายตัวอยู่ในเฟสของ PLA ดังรูปที่ 4.4(a) แต่เมื่อมีการเติม PLA-g-GMA เข้าไปในพอลิเมอร์ผสม พบว่าเฟสกระจายตัวของ PBAT มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 4.4(b) และเมื่อ

ปริมาณ PLA-g-GMA เพิ่มขึ้นเป็น 6 และ 9 %wt เฟสของ PBAT มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากทรงกลมไปเป็นรูปทรงรีที่มีการยืดออกยาวขึ้น ดังรูปที่ 4.4(c,d) ทั้งนี้เนื่องจากหมู่อีพอกไซด์ในโครงสร้างของ GMA ที่อยู่บนสายโซ่ PLA-g-GMA จะไปเกิดปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลิกของ PBAT เป็นส่วนมากและบางส่วนบน PLA ทำให้เกิดพันธะเคมีที่แข็งแรงขึ้น ทั้งนี้ในขั้นตอนการผสมได้ทำการผสม PBAT กับ PLA-g-GMA เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยากันก่อนใน Internal mixer [47, 48] ในขณะเดียวกันส่วนของ PLA ใน PLA-g-GMA สามารถเกิดการเกี่ยวพันกับโมเลกุลของ PLA ซึ่งเป็นเนื้อเมทริกซ์ได้ ซึ่งเป็นลักษณะของแรงกระทำเชิงกายภาพ (physical interaction) จึงส่งผลให้แรงดึงผิวระหว่างเฟส PLA และ PBAT ลดลง แล้วทำให้สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมเกิดการเปลี่ยนแปลง [8, 47, 48] นอกจากนี้เฟสของ PBAT จะมีการยืดตัวออกมากขึ้นเมื่อมีปริมาณของ PLA-g-GMA เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากสมบัติความเหนียวของ GMA ที่แทรกอยู่ระหว่างเฟส PLA และ PBAT โดยสังเกตได้จากการปรากฏลักษณะเส้นใยบริเวณรอยต่อทั้งสองเฟส [47, 49, 50] และจากการที่ PLA-g-GMA เกิดปฏิกิริยาเคมีกับ PBAT พร้อมกับเกิดการเกี่ยวพันกับสายโซ่ PLA ซึ่งทำให้พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม PLA-g-GMA มีความเหนียวเพิ่มขึ้น [8] ประกอบกับการคืนตัว (relaxation) ของสายโซ่ PBAT ถูกจำกัด จึงทำให้เฟสของ PBAT มีลักษณะเป็นทรงรีที่มีการยืดตัวออกยาวขึ้น ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของ PLA และ PBAT ที่ดีขึ้น ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shi Q. และคณะ [50] ที่ได้ทำการศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมสององค์ประกอบ (binary blend) และสามองค์ประกอบ (ternary blend) โดยทำการผสม PLA กับ TPS เข้าด้วยกันในอัตราส่วน 80/20 %wt และมี GMA-g-POE ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากัน พบว่าการเติม GMA-g-POE จะทำให้จำนวนช่องว่างระหว่างเฟส PLA กับ TPS น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการเติม GMA-g-POE อีกทั้งการเติม GMA-g-POE ยังทำให้พื้นผิวของพอลิเมอร์เมทริกซ์มีการยืดตัวออก ซึ่งเกิดจากสมบัติความเหนียวของ GMA-g-POE ที่เกิดปฏิกิริยากับ TPS และ PLA



รูปที่ 4.4 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่สัดส่วนผสมต่าง ๆ (a) PLA/PBAT/PG0 (b) PLA/PBAT/PG3 (c) PLA/PBAT/PG6 และ (d) PLA/PBAT/PG9

โดยกลไกการทำหน้าที่เป็น Compatibilizer ของ PLA-g-GMA แสดงดังรูปที่ 4.5 จากงานวิจัยของ Lyu และคณะ [8] ที่ได้รายงานกลไกที่จะเกิดเป็น PLA/PBAT/PLA-g-GMA



รูปที่ 4.5 แผนภาพกลไกการทำหน้าที่เป็น Compatibilizer ของ PLA-g-GMA [8]

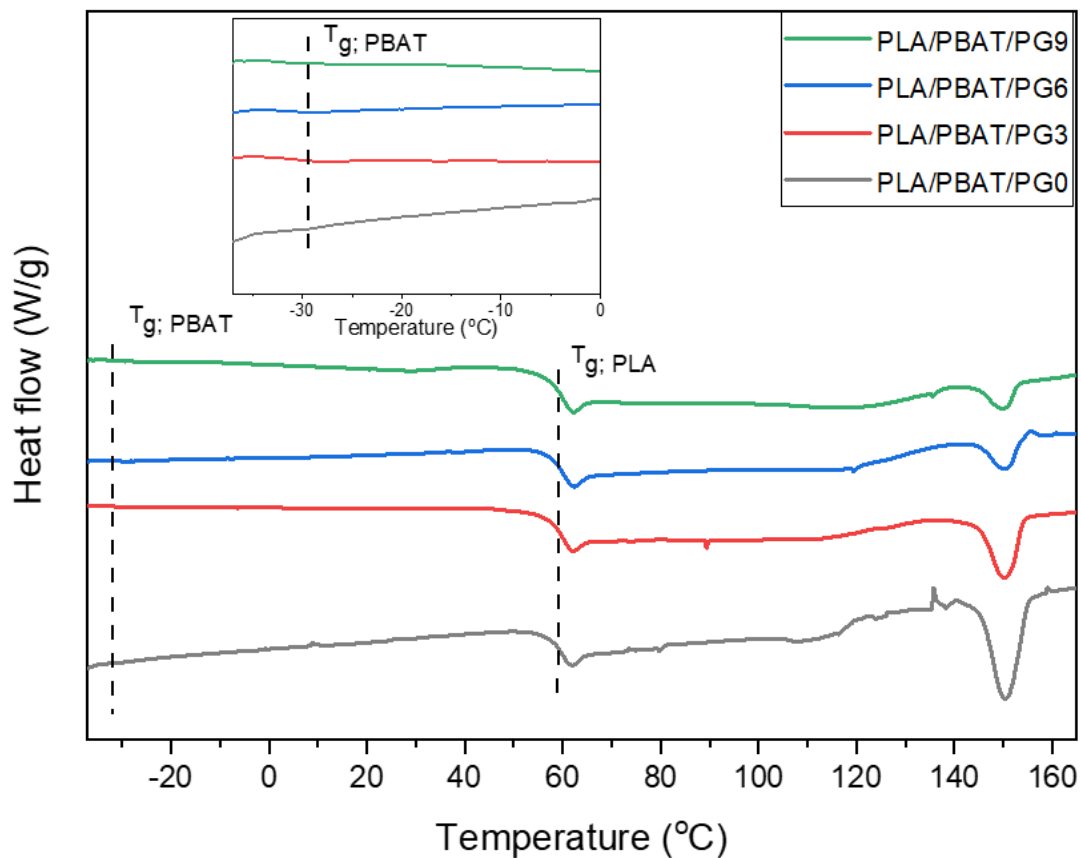
จากนั้นเพื่อยืนยันถึงความเข้ากันได้ที่เพิ่มขึ้นระหว่าง PLA และ PBAT เพิ่มเติม ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค DSC ในส่วนต่อไป

4.3 สมบัติทางความร้อนของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่ปริมาณการเติม PLA-g-GMA ในสัดส่วนต่าง ๆ

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่ปริมาณการเติม PLA-g-GMA ในสัดส่วนต่าง ๆ ด้วยเครื่อง DSC เพื่อยืนยันความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ PLA/PBAT ในเชิงทางความร้อน และเพื่อศึกษาผลของปริมาณ PLA-g-GMA ต่อสมบัติทางความร้อนและปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสม โดยจะทำการทดสอบในรูปแบบ Heat-cool-heat แล้ววิเคราะห์ข้อมูลจากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 โดยผลการทดสอบ DSC แสดงในรูปที่ 4.6 และตารางที่ 4.1 พบว่าพอลิเมอร์ผสมทุกสัดส่วนจะปรากฏอุณหภูมิ T_g 2 ตำแหน่ง ที่อุณหภูมิประมาณ -33 °C และ 59 °C ซึ่งเป็น T_g ที่ Transition ของ PBAT และ PLA ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lyu Y. และคณะ [8] และงานวิจัยของ Yoon S.K. และคณะ [51] ที่จะพบ T_g ของ PLA และ PBAT ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ได้กล่าวไว้ และสำหรับบางพอลิเมอร์ที่เกิด T_g ร่วมกับการเกิด Enthalpy relaxation (T_g with enthalpy relaxation) จะไม่คำนวณพิกที่ เกิด Enthalpy relaxation แล้วทำการวิเคราะห์และรายงานผล T_g ที่ Transition ของพอลิเมอร์ชนิดนั้น ๆ ยิ่งไปกว่านั้นจากผลการทดลอง พบว่าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง T_g ทั้งของ PLA และ PBAT บ่งบอกได้ว่าในระดับโมเลกุล PLA และ PBAT ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ในเชิงของการทดสอบ DSC [52, 53] นอกจากนี้ยังปรากฏพิก T_m ที่อุณหภูมิ 150 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิการหลอมผลึกของ PLA โดยปกติ PBAT จะมี T_m ที่ประมาณ 60 และ 120 °C แต่ T_m ของ PBAT จะอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับ T_{CC} ของ PLA (ประมาณ $110-140$ °C) [19, 54, 55] จึงทำให้การสังเกต T_m ของ PBAT ทำได้ยาก โดยจากผลการทดลองพบว่าการเติม PLA-g-GMA ไม่ได้ส่งผลต่อ T_g , T_{CC} และ T_m ของพอลิเมอร์ผสมอย่างมีนัยสำคัญ

ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อมีการเติม PLA-g-GMA เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณผลึก (degree of crystalline; X_c) มีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลจากการที่ PLA-g-GMA เกิดพันธะเคมีกับ PBAT และการเกี่ยวพันกันระหว่างส่วนของ PLA ใน PLA-g-GMA กับเมทริกซ์ PLA ซึ่งสิ่งอาจจะไปขัดขวางการเคลื่อนไหวเพื่อทำให้เกิดการจัดเรียงของสายโซ่เพื่อเกิดผลึกนั้นทำได้ยาก ส่งผลให้ปริมาณผลึกของ PLA มีค่าลดลง [8, 56] นอกจากนี้อาจเกิดจากความเข้ากันได้ที่ต่ำระหว่าง PLA และ PBAT เนื่องจาก

การเกิดอันตรกิริยาระหว่าง Compatibilizer กับสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้เกิดข้อจำกัดในการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ [47]



รูปที่ 4.6 DSC thermogram ของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่ปริมาณการเติม PLA-g-GMA ต่าง ๆ

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางความร้อนของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่ปริมาณการเติม PLA-g-GMA ต่าง ๆ

Sample	$T_{g; PBAT}$ (°C)	$T_{g; PLA}$ (°C)	$T_{CC; PLA}$ (°C)	$T_{m; PLA}$ (°C)	$X_{c, PLA}$ (%)
PLA/PBAT/PG0	-32.20	59.24	125.17	150.83	5.28
PLA/PBAT/PG3	-30.66	59.09	132.67	150.67	1.97
PLA/PBAT/PG6	-33.07	58.51	136.50	150.67	0.76
PLA/PBAT/PG9	-31.91	59.42	138.83	150.50	0.43

4.4 สมบัติการดึงยึดของ PLA/PBAT PLA-g-GMA ที่มีการเติม PLA-g-GMA ในสัดส่วนต่าง ๆ

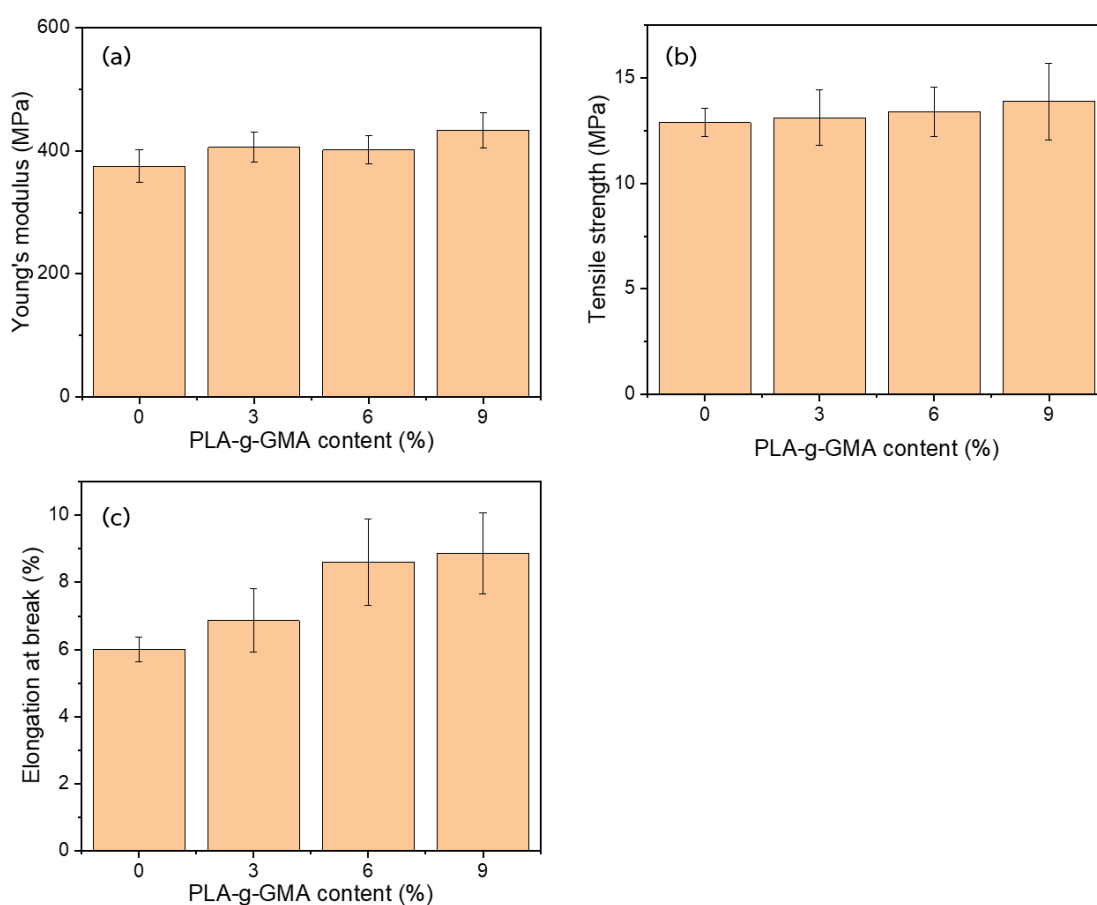
สมบัติการดึงยึดของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่มีการเติม PLA-g-GMA ในสัดส่วนต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.2 พบว่าการเติม PLA-g-GMA ในปริมาณมากขึ้น จะส่งผลให้ค่า Young's modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้น 15.47% จาก 375 MPa เป็น 433 MPa สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมและมีการเติม PLA-g-GMA ในปริมาณ 9 %wt ตามลำดับ เนื่องจาก PLA-g-GMA ทำหน้าที่เชื่อมประสานและลดแรงดึงผิวบริเวณพื้นผิวทั้งสองเฟส ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่าเฟส PLA และ PBAT เกิดการยึดติดกัน ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมี Modulus เพิ่มขึ้น [7, 57] ซึ่งสอดคล้องกับผล SEM

เมื่อพิจารณาค่า Tensile strength พบว่าการเติม PLA-g-GMA ส่งผลให้ค่า Tensile strength มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยมีค่าเพิ่มขึ้น 7.76% จาก 12.88 MPa เป็น 13.88 MPa สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมและมีการเติม PLA-g-GMA ในปริมาณ 9 %wt ตามลำดับ โดยการเพิ่มขึ้นของค่า Tensile strength จะเป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาที่ติระหว่างเฟสของ PLA และ PBAT โดยมี PLA-g-GMA ทำหน้าที่เป็น Compatibilizer โดยเกิดพันธะเคมีกับ PBAT และการเกี่ยวพันกับ PLA ซึ่งส่งเสริมการยึดติดที่ดีขึ้นบริเวณพื้นผิวทั้งสองเฟสของพอลิเมอร์ผสม โดยปริมาณของ PLA-g-GMA ที่มากขึ้นจะส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มของค่า Tensile strength ที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการปรับปรุงความสามารถในการถ่ายโอนความเค้น (stress transfer) ระหว่างเมทริกซ์และเฟสกระจายตัวที่ดีขึ้น [53, 56]

สำหรับค่า Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้น 47.67% จาก 6.00% เป็น 8.86% สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมและมีการเติม PLA-g-GMA ในปริมาณ 9 %wt ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาที่ติระหว่างหมู่ฟังก์ชันของ PLA-g-GMA กับสายโซ่ PBAT และ PLA ส่งผลให้ความยืดหยุ่น (flexibility) โดยรวมของพอลิเมอร์ผสมได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้น [52, 53] นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของค่า Elongation at break ยังเป็นผลจากสมบัติความเป็นอีลาสโตเมอร์ของ PLA-g-GMA ซึ่งส่งผลให้อนุภาคเกิดการยืดตัวออก [53] ดังภาพ SEM ที่กล่าวก่อนหน้านี้ จึงทำให้ค่า Elongation at break ของวัสดุเพิ่มขึ้น

จากผลการทดสอบการดึงยึด ทั้ง Modulus, Strength และ Elongation at break มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม PLA-g-GMA แสดงให้เห็นว่า PLA-g-GMA สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBAT โดยจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานระหว่างทั้งสองเฟสจาก

การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและการเกี่ยวพันในเชิงกายภาพ แต่เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นนี้ยังมีค่าน้อย ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ของ GMA ใน PLA-g-GMA ยังมีสัดส่วนที่น้อย (1.03% grafting) ซึ่งเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ที่เพิ่มขึ้นน่าจะส่งผลให้ความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ดีขึ้น และส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น [34]



รูปที่ 4.7 สมบัติการดึงยึดของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่ปริมาณการเติม PLA-g-GMA ในสัดส่วนต่าง ๆ (a) Young's modulus (b) Tensile strength และ (c) Elongation at break

ตารางที่ 4.2 สมบัติการดึงยึดของ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ที่ปริมาณการเติม PLA-g-GMA ใน สัดส่วนต่าง ๆ

Sample	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PLA/PBAT/PG0	375.27 ± 26.59	12.88 ± 0.67	6.00 ± 0.37
PLA/PBAT/PG3	405.54 ± 14.43	13.12 ± 1.31	6.86 ± 0.95
PLA/PBAT/PG6	401.65 ± 11.38	13.39 ± 1.16	8.60 ± 1.29
PLA/PBAT/PG9	433.51 ± 15.91	13.88 ± 1.83	8.86 ± 1.20

ดังนั้น เมื่อพิจารณาผลการทดลองข้างต้นทั้งสี่ฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติการดึงยึด พบว่าการเติม PLA-g-GMA ที่ปริมาณ 9%wt เป็นปริมาณที่เหมาะสมเพื่อจะนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของความเข้ากันได้ต่อสมบัติของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ในตอนที่ 2 เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมในสัดส่วนนี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเฟสกระจาย (PBAT) ในเมทริกซ์ของ PLA รวมถึงแสดงการปรับปรุงสมบัติการดึงยึดสูงสุด และมีปริมาณผลึกน้อยที่สุด ซึ่งสิ่งเหล่านี้บ่งบอกถึงการส่งเสริมความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของ PLA และ PBAT โดยมี PLA-g-GMA ทำหน้าที่เป็น Compatibilizer



ตอนที่ 2 ศึกษาผลของปริมาณ CNT ที่มีต่อสมบัติของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA

จากผลการทดลองในตอนต้นที่ 1 การศึกษาผลของปริมาณ PLA-g-GMA ที่มีต่อความเข้ากันได้ และสมบัติของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม PLA-g-GMA ในสัดส่วน 9%wt มีลักษณะสัญญาณวิทยา สมบัติการดึงยึด และสมบัติทางความร้อนที่เหมาะสม ดังนั้นในตอนต้นที่ 2 จึงเลือกใช้ PLA-g-GMA ในสัดส่วน 9%wt มาปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBAT เพื่อทำการศึกษาผลของปริมาณ CNT ที่มีต่อสมบัติของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA โดยจะทำการศึกษสมบัติต่าง ๆ ของคอมพอสิต ได้แก่ ลักษณะสัญญาณวิทยา โครงสร้างของ CNT ในคอมพอสิต ปริมาณผลึก สมบัติการดึงยึด สมบัติทางความร้อน เสถียรภาพทางความร้อน ความสามารถในการต้านทานไฟฟ้า และความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

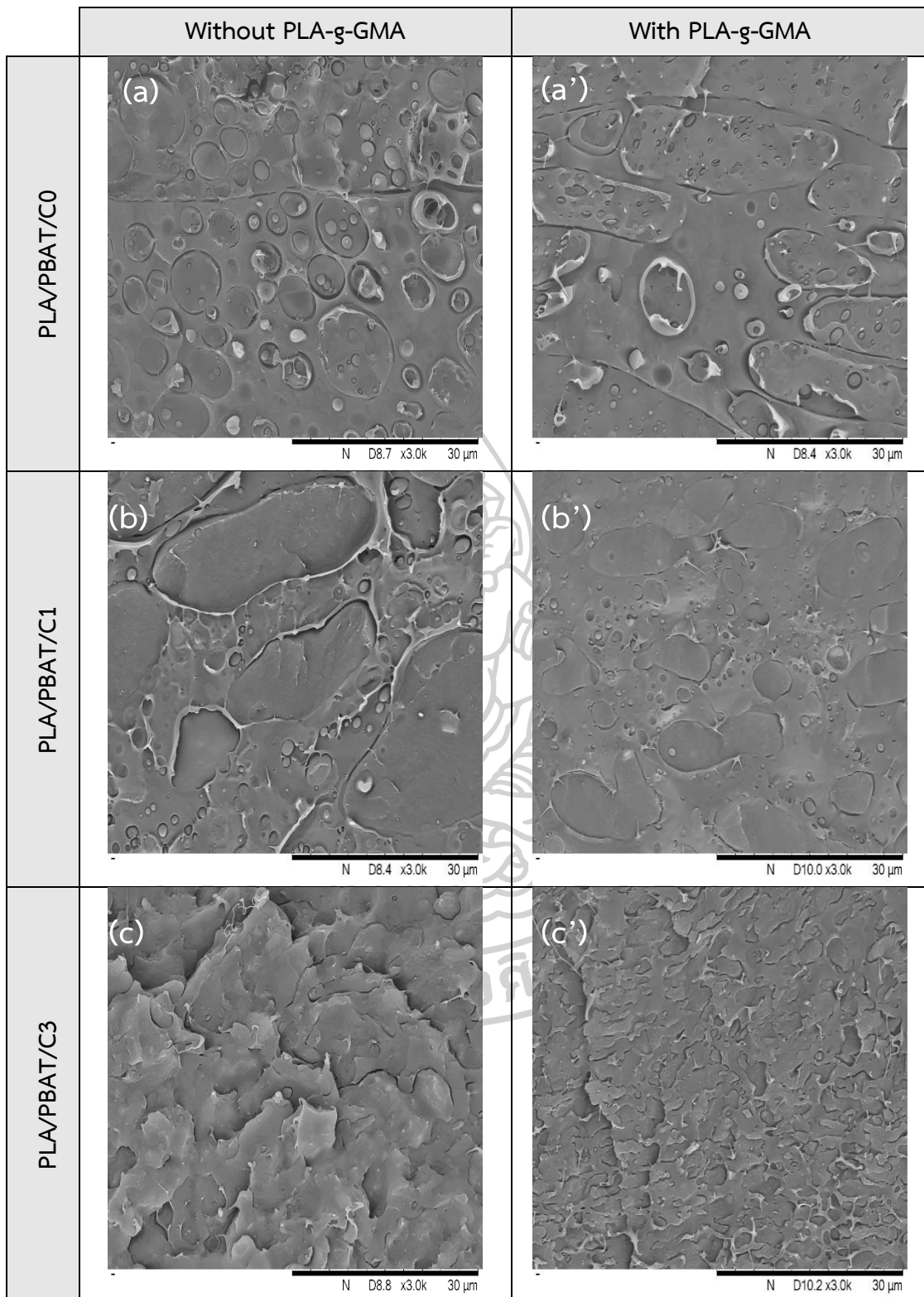
4.5 สัญญาณวิทยาของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA

การศึกษาสัญญาณวิทยาของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA เพื่อดูลักษณะการกระจายตัวของ CNT และความเข้ากันได้ของคอมพอสิต ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 3000 เท่า ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.8 โดยในรูปที่ 4.8(a-e) แสดงภาพ SEM คอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ที่ไม่มีการเติม PLA-g-GMA สำหรับพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT (PLA/PBAT/CO) พบว่าเฟสของ PBAT จะมีลักษณะเป็นทรงกลมกระจายตัวในเมทริกซ์ของ PLA ดังรูปที่ 4.8(a) เมื่อเติม CNT ที่ 1 phr (รูปที่ 4.8(b)) พบว่าเฟสของ PBAT จะเปลี่ยนรูปร่างเป็นทรงรีมากขึ้น แต่เมื่อเติม CNT มากขึ้น (รูปที่ 4.8(c-e)) พบว่าเฟสของ PBAT จะมีขนาดเล็กลงและกระจายตัวอยู่ใน PLA ได้ดีมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก Nano-bridge effect ของ CNT ที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของ PBAT และ PLA [58, 59] โดยกลไกการเกิด Nano-bridge ของคอมพอสิตนี้เกิดจากการที่ CNT ที่กระจายตัวอยู่ในเฟสของ PBAT และมีการยื่นออกมาจากเฟสของ PBAT ซึ่งมีลักษณะคล้ายเส้นผม จะเกิดการเคลื่อนที่ชนกันระหว่างเฟส PBAT ด้วยกันเองในระหว่างกระบวนการหลอมผสมหรือกระบวนการขึ้นรูป แล้วทำให้ CNT ส่วนที่ยื่นออกมาจากเฟส PBAT เกิดเป็นสะพานเชื่อมรอยระหว่างเฟส PLA และ PBAT อีกทั้งยังช่วยป้องกันการรวมกลุ่มกันของเฟส PBAT โดยรูปที่ 4.9 แสดงกลไกการเกิด Nano-bridge effect ของคอมพอสิต

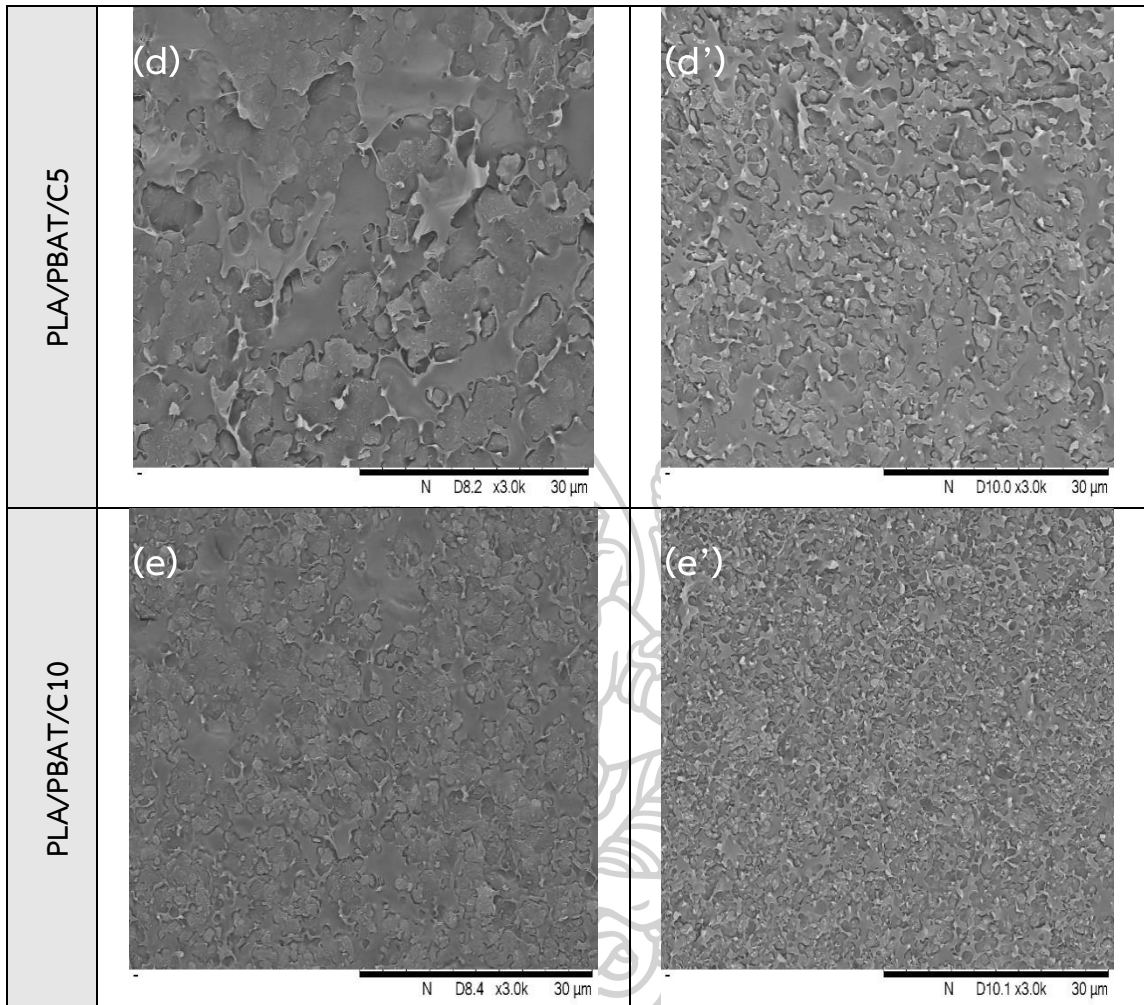
สิต PLA/PBAT/CNT [58] นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาคของ CNT ส่วนมากจะกระจายตัวอยู่ในเฟสของ PBAT เนื่องจาก CNT มีความเข้ากันได้กับหมู่อะโรมาติกของ PBAT มากกว่าหมู่อะลิฟาติกของ PLA จากการที่หมู่อะลิฟาติกจะมีแรงดึงผิวที่มากกว่าอะโรมาติก ซึ่งโดยทั่วไป CNT ชอบที่จะกระจายตัวอยู่ในเฟสที่มีแรงดึงผิวที่ต่ำกว่า [19, 60]

สัณฐานวิทยาของคอมพอสิตที่มีการเติม PLA-g-GMA แสดงดังรูปที่ 4.8(a'-e') พบว่าในกรณีไม่เติม CNT (PLA/PBAT/PG9/C0) เฟสของ PBAT จะมีลักษณะสัณฐานที่เปลี่ยนไปจากทรงกลมเป็นทรงรีมากขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA/PBAT/C0 (รูปที่ 4.8(a')) เมื่อทำการเติม CNT เพิ่มขึ้น พบว่าปริมาณ CNT ที่เพิ่มขึ้นจะส่งเสริมการกระจายตัวของ PBAT ใน PLA มากขึ้น และเฟสของ PBAT มีขนาดเล็กลงและการเสีรูปลดลง เนื่องจาก CNT ที่เชื่อมต่อระหว่างเฟส PBAT และ PLA จะช่วยในการต้านทานการเสีรูปร่างของเฟส PBAT [58] และเมื่อทำการเปรียบเทียบที่ปริมาณการเติม CNT เท่ากัน พบว่าขนาดของเฟส PBAT ในกรณีที่มีการเติม PLA-g-GMA จะมีขนาดเล็กกว่าและกระจายตัวในเมทริกซ์ PLA ได้ดีกว่ากรณีที่ไม่เติม PLA-g-GMA เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟส PBAT และ PLA-g-GMA ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ที่ปลายสายโซ่ของ PBAT และหมู่อีพอกไซด์ของ PLA-g-GMA ในกระบวนการผสม [59]

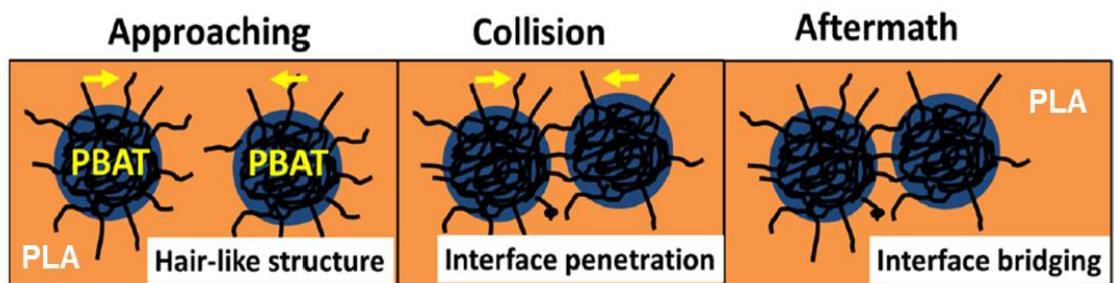
ซึ่งจากผลทางสัณฐานวิทยาสามารถกล่าวได้ว่า การเติม PLA-g-GMA และ CNT ลงในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT จะทำให้มีความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของ PLA และ PBAT ที่ดีขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Urquijo J. และคณะ [19] ได้ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ด้วยอัตราส่วนผสม PLA/PBAT ที่ 60/40 %wt พบว่าคอมพอสิตที่มีการเติม CNT จะทำให้เฟสของ PBAT เกิดการเปลี่ยนรูปร่างจากทรงกลมเป็นทรงรีที่มีการยืดออก อีกทั้งการเติม CNT ยังส่งเสริมการกระจายตัวของเฟส PBAT ในเมทริกซ์ PLA



รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ (a-e) ที่ไม่มีการเติม และ (a'-e') ที่มีการเติม PLA-g-GMA ด้วยกำลังขยาย 3000 เท่า



รูปที่ 4.8 (ต่อ)



รูปที่ 4.9 กลไกการเกิด Nano-bridge effect ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT [58]

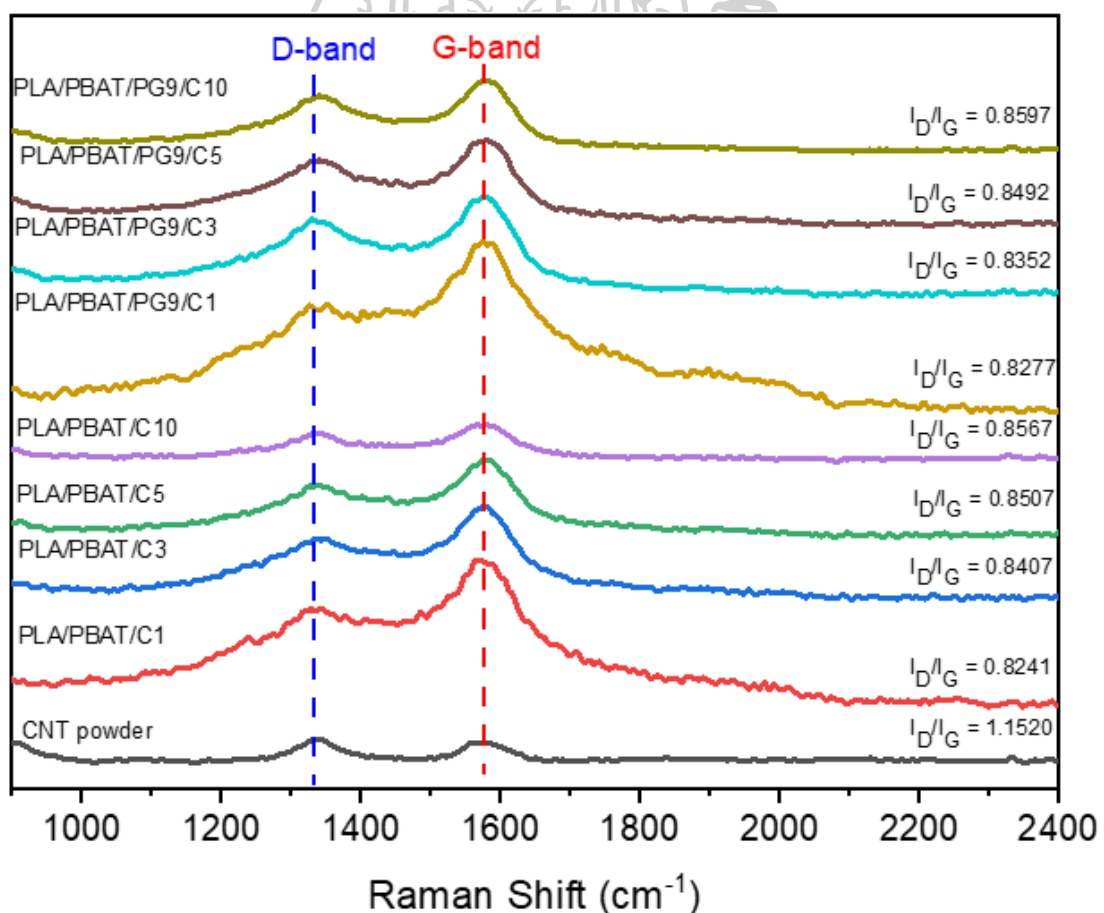
4.6 โครงสร้างของ CNT ในคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

เนื่องจากความสมบูรณ์ทางโครงสร้างของ CNT ที่ทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่นั้น จะส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของคอมพอสิต จึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างของ CNT ในคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณการเติม CNT ในสัดส่วนต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าทั้งผง CNT และคอมพอสิตทุกสัดส่วนผสมจะปรากฏพีก D-band ซึ่งเกิดจากโครงสร้างของ CNT ที่เป็นไฮบริดไดซ์คาร์บอน sp^3 แสดงถึงความไม่เป็นระเบียบของอะตอมคาร์บอนในชั้นแกรฟีน (ส่วนที่เป็นอสัณฐาน) หรือข้อบกพร่องของโครงสร้างในชั้นแกรฟีนที่ตำแหน่ง 1340 cm^{-1} และปรากฏพีก G-band ซึ่งเกิดจากโครงสร้างของ CNT ที่เป็นไฮบริดไดซ์คาร์บอน sp^2 แสดงถึงลักษณะที่เป็นระเบียบของโครงสร้างของชั้นแกรฟีน (ส่วนที่เป็นผลึก) ที่ตำแหน่ง 1580 cm^{-1} ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhou X. และคณะ [36] และงานวิจัยของ Liu L. และคณะ [61] ที่พบพีก D-band และ G-band ที่ตำแหน่งข้างต้น และได้รายงานว่าสมบัติการนำไฟฟ้าของ CNT จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างคาร์บอนที่เป็น sp^2

สำหรับความสมบูรณ์ของโครงสร้าง CNT สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความเข้มของพีก D-band และ G-band (I_D/I_G) โดยจากบทความของ Morelos-Gómez A. และคณะ [28] ได้กล่าวว่าค่า I_D/I_G จะบ่งบอกถึงปริมาณผลึกของ CNT ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ I_D/I_G จะบ่งบอกถึงข้อบกพร่องในโครงสร้างของ CNT ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ผลึกของ CNT เกิดได้ยากและทำให้สมบัติการนำไฟฟ้าของ CNT ลดลง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ผง CNT จะมีค่า I_D/I_G เท่ากับ 1.1520 ในขณะที่ทุกคอมพอสิตจะมีค่า I_D/I_G ต่ำกว่าผง CNT และจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ CNT เพิ่มขึ้น โดยการที่ CNT ในคอมพอสิตมีค่า I_D/I_G ต่ำกว่าผง CNT แสดงว่าโครงสร้างของ CNT ในคอมพอสิตมีความเป็นระเบียบมากขึ้นเมื่อเทียบกับผง CNT ซึ่งโดยทั่วไปข้อบกพร่องของ CNT มีความสัมพันธ์กับการเกิดการเชื่อมขวาง (crosslinking) การใช้ผนังร่วมกัน (wall-sharing) และลักษณะโครงสร้างที่เป็นกิ่ง (branching) ของ CNT [62] โดยเริ่มแรกนั้น CNT จะมีลักษณะแบบอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (bundle) ซึ่งจะมีการเกี่ยวพันและมีการใช้ผนังร่วมกัน แต่เมื่อได้รับแรงเฉือนในระหว่างกระบวนการผสมหรือการขึ้นรูปจะส่งผลให้ CNT ที่อยู่กันแบบ Bundle เกิดการแตกออก ทำให้ CNT เกิดการคลายตัว (uncoil) ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์พอลิเมอร์ และลดการใช้ผนังร่วมกัน [62, 63] ส่งผลให้โครงสร้างของ CNT ในคอมพอสิตมีความสมบูรณ์หรือเป็นระเบียบมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณการเติม CNT ในคอมพอสิตเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่า I_D/I_G มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ CNT อาจจะทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวในระหว่างกระบวนการหลอมผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้เป็นการเพิ่มแรงเฉือนในระหว่างกระบวนการหลอมผสมด้วย ซึ่งแรงเฉือนที่เกิดขึ้นนี้อาจจะทำให้โครงสร้างของ CNT ที่มีลักษณะคล้ายเชือก (rope structure) ในคอมพอสิตเกิดการแตกออก สั่นลง หรือทำให้เกิดความขรุขระที่พื้นผิวของ CNT [63-65]

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบคอมพอสิตที่ปริมาณ CNT เท่ากัน พบว่าตำแหน่งพีก D-band G-band และค่า I_D/I_G ของคอมพอสิตที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA ค่อนข้างคงที่ และเมื่อมีการปรับเปลี่ยนปริมาณของ CNT ค่า I_D/I_G ของคอมพอสิตที่มีการเติม PLA-g-GMA ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับคอมพอสิตที่ไม่มีการเติม PLA-g-GMA แสดงให้เห็นว่าการเติม PLA-g-GMA จะไม่ส่งผลต่อโครงสร้างของ CNT



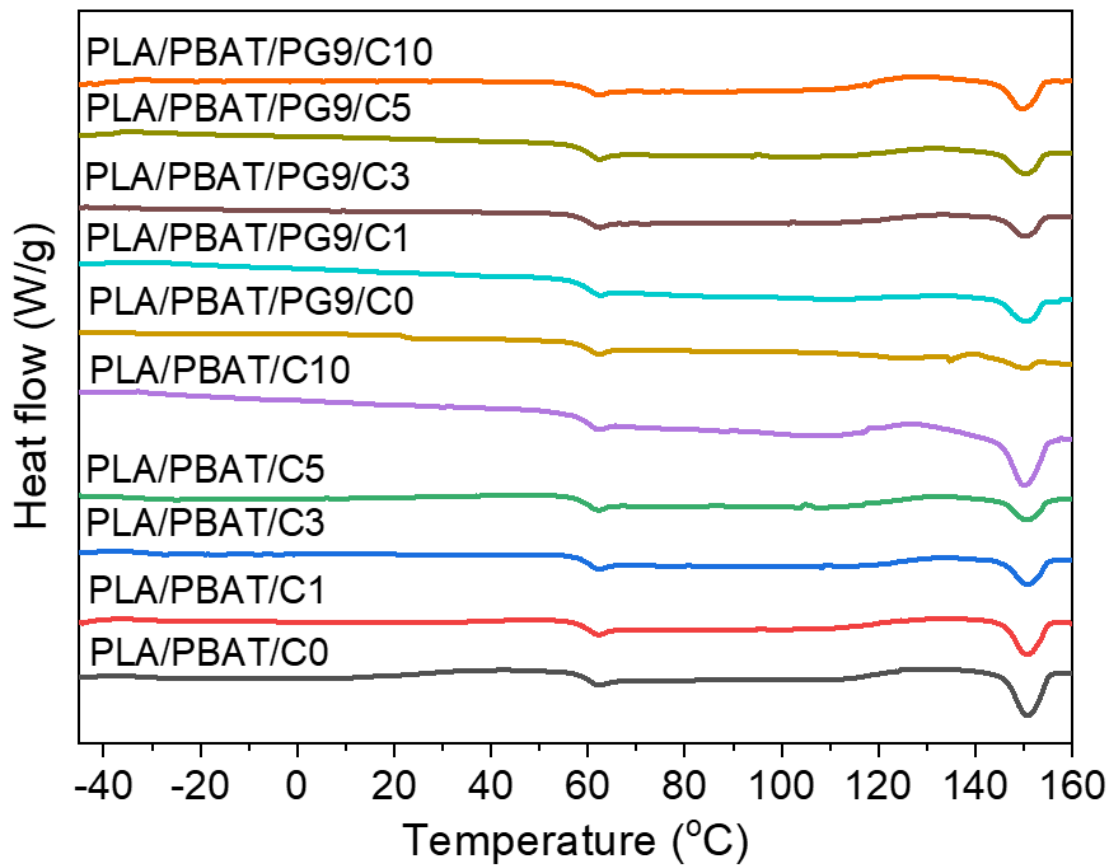
รูปที่ 4.10 Raman spectrum ของผง CNT และคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA

4.7 สมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตจะเห็นได้ว่าทั้ง CNT และ PLA-g-GMA จะส่งเสริมต่อการกระจายตัวของเฟส PBAT ในเฟสของ PLA แสดงถึงความเข้ากันได้ที่ดีขึ้นระหว่าง PLA และ PBAT จึงได้ทำการศึกษาผลของปริมาณ CNT และผลของการเติม PLA-g-GMA ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT เพื่อยืนยันถึงความเข้ากันได้ที่เพิ่มขึ้นของ PLA และ PBAT ซึ่งทดสอบด้วยเทคนิค DSC ในรูปแบบ Heat-cool-heat แล้วทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 โดยผลการทดสอบที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.3

จาก DSC thermogram พบว่าคอมพอสิตในทุกสัดส่วนจะปรากฏ T_g 2 ตำแหน่ง ที่ประมาณอุณหภูมิ -33 °C และ 58 °C ซึ่งสอดคล้องกับ T_g ของ PBAT และ PLA ตามลำดับ [19] ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าในระดับโมเลกุล PLA และ PBAT ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ในช่วงของการทดสอบ DSC นอกจากนี้ยังปรากฏพีก T_m ของ PLA ประมาณ 150 °C โดยจะไม่สามารถสังเกตเห็นพีก T_m ของ PBAT เนื่องจากพีก T_m ของ PBAT มีลักษณะเป็นพีกกว้างและซ้อนทับกับพีก T_{cc} ของ PLA ที่อุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ $110-140$ °C [19, 54, 55] จึงทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับผลึกของ PBAT ทำได้ยาก เมื่อพิจารณาการเติม CNT จะสังเกตเห็นว่าปริมาณ CNT จะไม่ส่งผลต่อ T_g , T_m และ T_{cc} ของคอมพอสิตทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA เช่นเดียวกันกับผลของการเติม PLA-g-GMA

เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกของ PLA ในคอมพอสิต พบว่ามีค่าลดลงตามปริมาณของ CNT และคอมพอสิตที่มีการเติม PLA-g-GMA จะมีปริมาณผลึกที่ต่ำกว่าคอมพอสิตที่ไม่เติม PLA-g-GMA เนื่องจากทั้ง CNT และ PLA-g-GMA จะไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่ ซึ่งจะไปจำกัดการเกิดผลึกของคอมพอสิต [47, 59]



รูปที่ 4.11 DSC thermogram ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA



ตารางที่ 4.3 สมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA

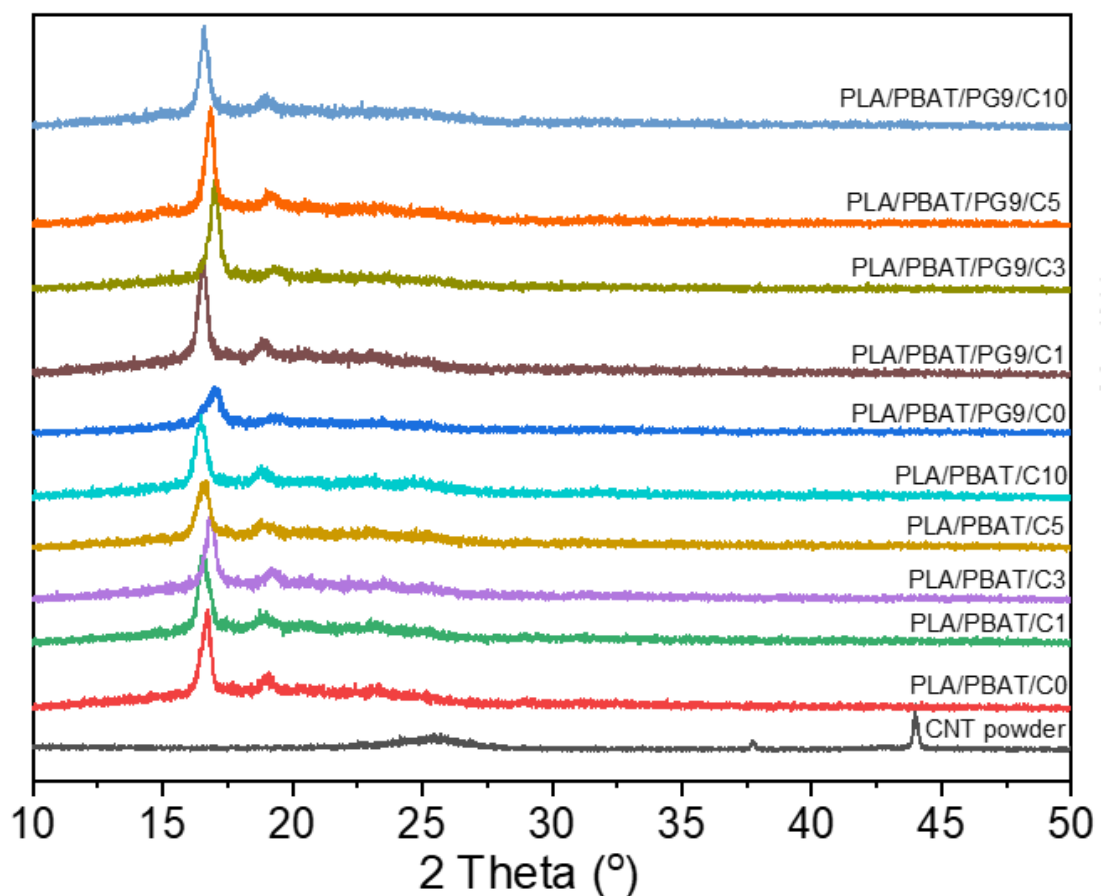
Sample	T _g ; PBAT (°C)	T _g ; PLA (°C)	T _{CC} ; PLA (°C)	T _m ; PLA (°C)	X _c ; PLA (%)
PLA/PBAT/C0	-32.20	59.24	125.17	150.83	5.28
PLA/PBAT/C1	-34.96	59.01	132.00	150.83	0.80
PLA/PBAT/C3	-31.32	59.20	120.50	150.83	0.52
PLA/PBAT/C5	-32.93	57.28	131.00	150.67	0.20
PLA/PBAT/C10	-31.96	57.79	127.67	150.17	0.07
PLA/PBAT/PG9/C0	-31.91	59.42	138.83	150.50	0.43
PLA/PBAT/PG9/C1	-32.94	58.45	133.33	150.50	0.84
PLA/PBAT/PG9/C3	-35.53	59.02	132.17	150.33	0.34
PLA/PBAT/PG9/C5	-31.72	59.56	131.00	150.50	0.04
PLA/PBAT/PG9/C10	-30.38	59.01	127.33	149.83	~ 0

4.8 โครงสร้างและปริมาณผลึกของ CNT และคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ในสัดส่วนต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA

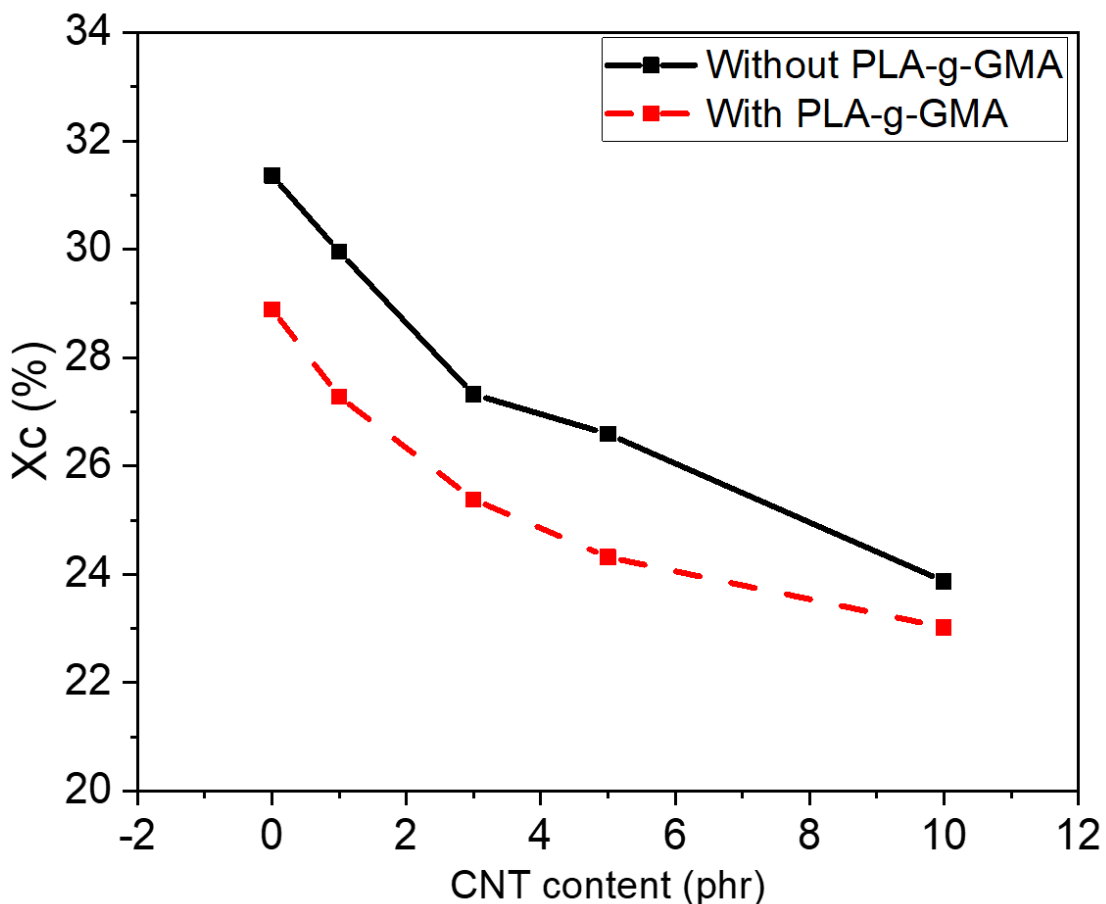
จากข้อมูล DSC ที่กล่าวข้างต้น จะสามารถวิเคราะห์ได้เพียงแค่ผลึกของ PLA แต่ไม่สามารถวิเคราะห์ปริมาณผลึกของ PBAT ได้ จึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างและปริมาณผลึกของ CNT และคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA ด้วยเทคนิค XRD โดยรูปที่ 4.12 แสดง XRD pattern ของผง CNT และคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT พบว่า CNT จะปรากฏพีก 2 ตำแหน่ง ที่ 26 และ 43 องศา ซึ่งแสดงถึงผลึกระนาบ (002) และ (100) ตามลำดับ [66] ในขณะที่พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT จะปรากฏพีกกว้างในช่วงประมาณ 12-26 องศา ซึ่งสอดคล้องกับส่วน Amorphous ของ PLA และปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 16.7 และ 19 องศา ซึ่งบ่งบอกถึงโครงสร้างผลึกของ PLA ในระนาบ (200)/(110) และ (203) ตามลำดับ [41, 55] สำหรับโครงสร้างผลึกของ PBAT ในระนาบ (110) (100) และ (111) จะปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 20.4 23 และ 25 องศา ตามลำดับ แต่จากผล XRD ที่ได้ จะสังเกตเห็นพีกเหล่านี้ได้ไม่ชัดเจน ซึ่งบ่งบอกว่า PBAT เกิดผลึกได้

ยาก [35, 55] อย่างไรก็ตามคอมพอสิตในทุกสัดส่วนจะไม่ปรากฏฟีกเอกลักษณะของ CNT เนื่องจากที่บริเวณพื้นผิวของตัวอย่างมีการกระจายตัวของ CNT น้อย [36]

เมื่อทำการคำนวณปริมาณผลึกของคอมพอสิต จาก XRD pattern จากพื้นที่ใต้กราฟ ได้ผลดังรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อมีการเติม CNT ในปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณผลึกของคอมพอสิตลดลง แสดงถึงการที่ CNT จะขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ และการจัดเรียงตัวของโครงผลึก (crystal lattice) [67] ยิ่งไปกว่านั้นคอมพอสิตที่มีการเติม PLA-g-GMA จะมีปริมาณผลึกของคอมพอสิตน้อยกว่ากรณีไม่มีการเติม PLA-g-GMA ทั้งนี้อาจเกิดจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่าง PLA-g-GMA กับ PBAT และการเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่ PLA-g-GMA กับ PLA ส่งผลให้เกิดข้อจำกัดในการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ [52, 53]



รูปที่ 4.12 XRD pattern ของผง CNT และคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA



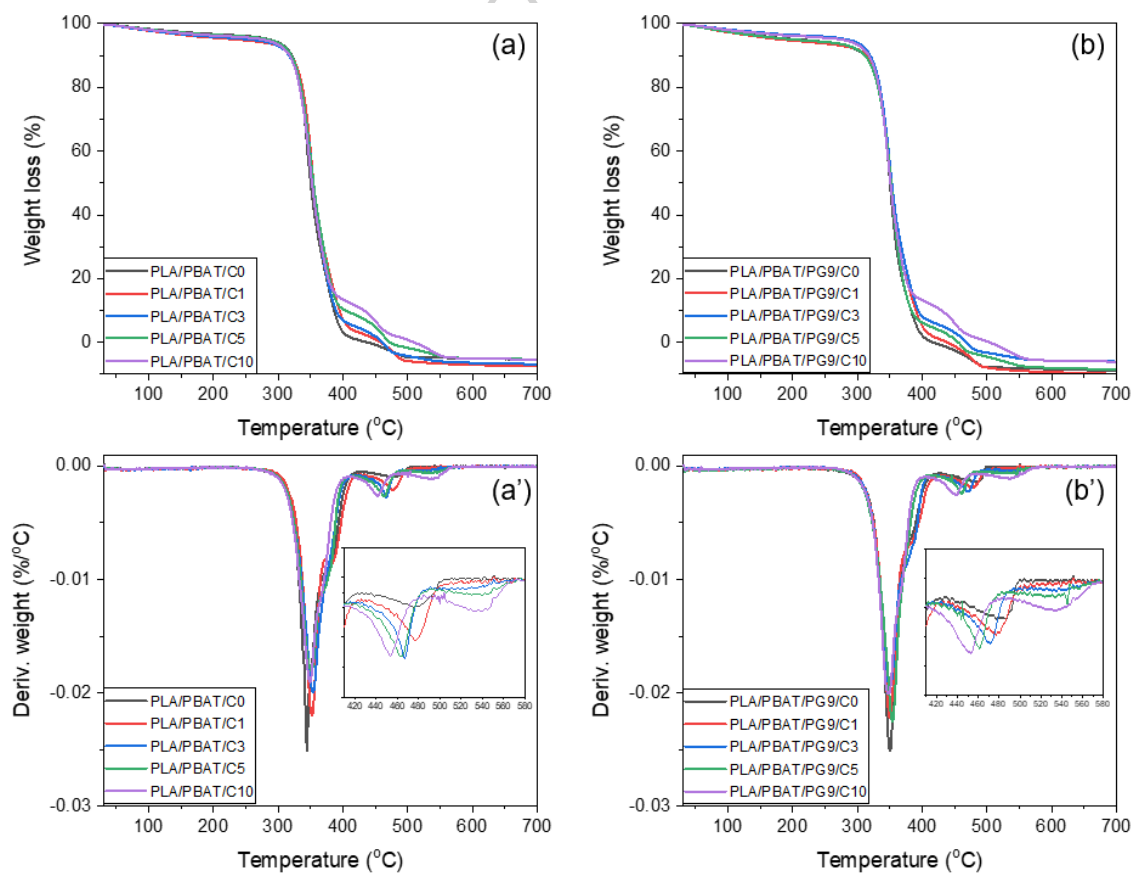
รูปที่ 4.13 ปริมาณผลึกของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA

4.9 เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA ด้วยเทคนิค TGA โดยทำการทดสอบภายใต้สภาวะออกซิเจน ในช่วงอุณหภูมิ 30 °C - 700 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 °C/min แสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่า ในกรณีของ PLA/PBAT/C0 และ PLA/PBAT/PG9/C0 จะมีการสลายตัว 3 ขั้นตอน โดยการสลายตัวขั้นแรกจะปรากฏที่อุณหภูมิประมาณ 349 °C (T_{d1}) ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของ PLA สำหรับขั้นที่สองและสามนั้นจะมีการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 385 °C (T_{d2}) และ 470 °C (T_{d3}) สอดคล้องกับอุณหภูมิการสลายตัวของ PBAT [68, 69] ในขณะที่คอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ในทุกสัดส่วนจะปรากฏขั้นตอนการสลายตัวเพิ่มอีกหนึ่งขั้นที่อุณหภูมิประมาณ 530 °C (T_{d4}) ซึ่งเป็นการสลายตัวของ

CNT นอกจากนี้ปริมาณของ CNT ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดการสลายตัวในชั้น T_{d3} ได้ไวและมีการสลายตัวในชั้นตอนนี้น่ามากขึ้น เนื่องจาก CNT ส่วนใหญ่จะมีการฝังตัวอยู่ในเฟส PBAT และจากการที่ CNT มีสมบัติการนำความร้อนสูง ส่งผลให้เมื่อมี CNT ปริมาณมากขึ้น จะมีการสะสมความร้อนในเฟสของ PBAT มากขึ้น ทำให้การสลายตัวของ PBAT เกิดได้เร็วขึ้น [70]

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างคอมพอสิตที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA ในสัดส่วนการเติม CNT ที่เท่ากัน พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวทั้งสี่ขั้นตอนของคอมพอสิตไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่า PLA-g-GMA จะไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต



รูปที่ 4.14 TGA และ DTG thermogram ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ (a,a') ไม่มีการเติม PLA-g-GMA และ (b,b') มีการเติม PLA-g-GMA

4.10 สมบัติการดึงยึดของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA

จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการเติม CNT และ PLA-g-GMA จะทำให้คอมพอสิตมีอันตรกิริยาที่บริเวณรอยต่อระหว่างเฟสมากขึ้น ซึ่งคาดว่าผลที่เกิดขึ้นจะช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอมพอสิต ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาสมบัติการดึงยึดของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA ด้วยเครื่อง UTM ตามมาตรฐาน ASTM D882 ที่อัตราการดึงยึด 12.5 mm/min โดยผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.4

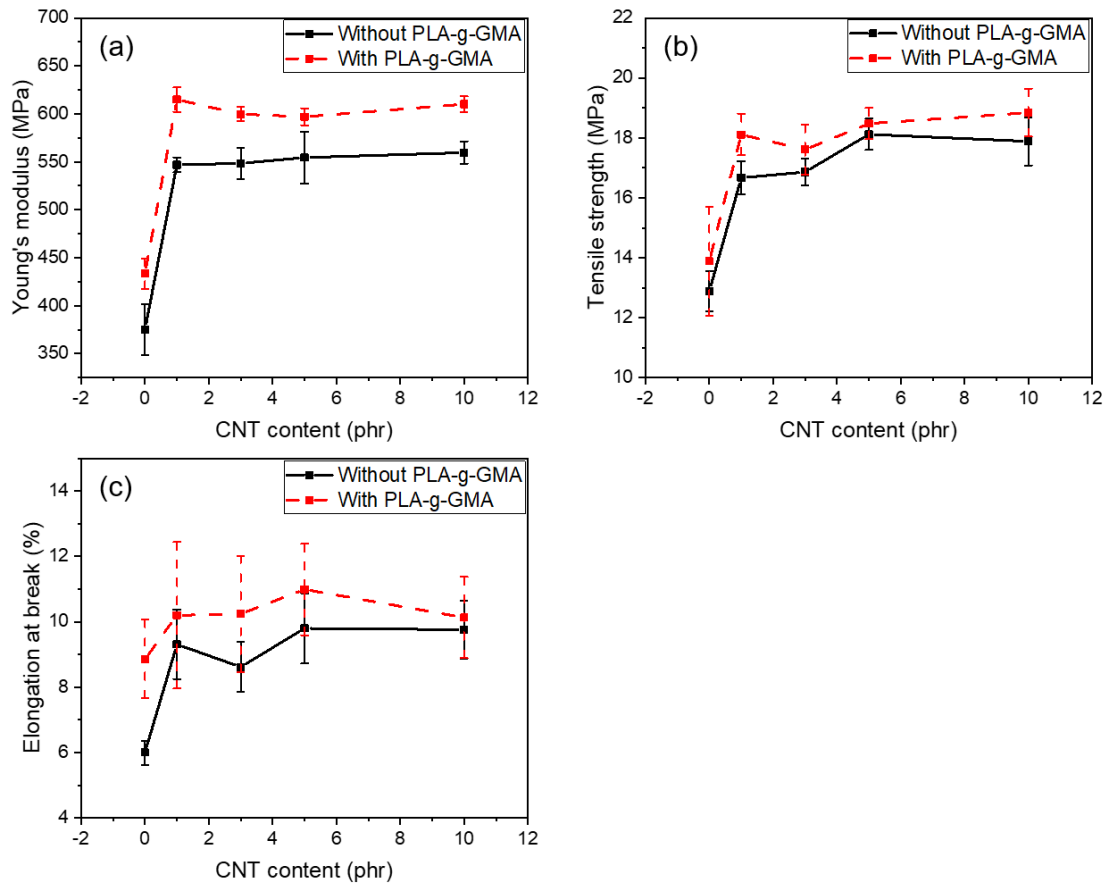
จากผลการทดสอบ พบว่าเมื่อทำการเติม CNT มากขึ้นในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT จะส่งผลให้ค่า Young's modulus ของคอมพอสิตเพิ่มขึ้นจาก 375 MPa เป็น 559 MPa เมื่อเปรียบเทียบระหว่างคอมพอสิตที่ไม่มีการเติม PLA-g-GMA ที่ปริมาณการเติม CNT 0 และ 10 phr ตามลำดับ เนื่องจาก CNT มี Tensile strength และ Modulus ที่สูง จึงสามารถทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงให้แก่คอมพอสิต [59] นอกจากนี้ผลของ Nano bridge effect ของ CNT ที่เชื่อมต่อระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ทั้งสอง ยังช่วยต้านทานการเสียรูปของเมทริกซ์พอลิเมอร์ [59, 66] เมื่อพิจารณาผลของการเติม PLA-g-GMA จะพบว่าคอมพอสิตจะมีค่า Young's modulus สูงกว่าคอมพอสิตที่ไม่มีการเติม PLA-g-GMA เนื่องจาก PLA-g-GMA ส่งเสริมความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBAT ได้เพิ่มขึ้นนอกเหนือจากอิทธิพลของ CNT เพียงอย่างเดียว ส่งผลให้ Young's modulus ของคอมพอสิตเพิ่มขึ้น [53, 59]

สำหรับค่า Tensile strength พบว่าการเติม CNT จะส่งผลให้ค่า Tensile strength เพิ่มขึ้นคล้ายคลึงกับ Young's modulus เนื่องจากการเสริมแรงของ CNT และการเกิด Nano bridge effect ของ CNT ช่วยในเพิ่มความสามารถในการยึดติดระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองและเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความเค้นจากเมทริกซ์พอลิเมอร์มายัง CNT ส่งผลให้คอมพอสิตมีความแข็งแรงมากขึ้น [66, 71] ในขณะเดียวกันการเติม PLA-g-GMA ก็ส่งผลต่อค่า Tensile strength ของคอมพอสิตเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเทียบกับกรณีไม่เติม PLA-g-GMA เนื่องจาก PLA-g-GMA จะเกิดอันตรกิริยากับ PLA และ PBAT บริเวณรอยต่อระหว่างของทั้งสองเฟส ทำให้บริเวณรอยต่อนี้ได้รับอิทธิพลที่เสริมกันจากทั้ง Nano bridge effect ของ CNT และการเกิดอันตรกิริยาของ PLA-g-GMA ส่งผลให้การถ่ายโอนความเค้นภายในโครงสร้างของคอมพอสิตที่มีการเติม PLA-g-GMA มีประสิทธิภาพมากกว่าคอมพอสิตที่ไม่มีการเติม PLA-g-GMA [53, 59]

เมื่อพิจารณาค่า Elongation at break จะพบว่า การเติม CNT จะทำให้ค่า Elongation at break เพิ่มขึ้น เนื่องจาก CNT จะเกิดอันตรกิริยากับ PLA และ PBAT บริเวณรอยต่อของทั้งสองเฟส ส่งผลให้การยึดติดระหว่างรอยต่อเพิ่มขึ้นและทำให้ PBAT เกิดการยึดตัวออก เฟส PBAT จึงสามารถแสดงความยืดหยุ่นได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น [19] โดยผลที่ได้จะมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ren F. และคณะ [72] ที่ได้ทำการศึกษาคอมพอสิต PLA₅₀ (PLLA/PDLA)@PLLA-MWCNT ซึ่งได้กล่าวว่าการกลไกหลักในการเพิ่มความเหนียวจะขึ้นอยู่กับ การมีอนุภาคเสริมแรง (particle reinforcement) การเปลี่ยนแปลงของรอยแตก (crack deflection) และการยึดตัวออกของอนุภาค (particle pullout) และโดยทั่วไปเมื่อเมทริกซ์ได้รับแรงภายนอกที่มากกว่าจุด Breaking strength จะทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็ก (microcrack) และรอยแตกที่เกิดขึ้นจะขยายตัวต่อไปภายในเมทริกซ์ จนเจอกับอนุภาคของเฟสกระจายตัวแล้วทำให้เส้นทางการขยายตัวของรอยแตกเปลี่ยนไป ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ CNT จะส่งเสริมการยึดติดระหว่างรอยต่อ PLA₅₀ และ PLLA ทำให้คอมพอสิตมีความแข็งแรงและความเหนียวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเติม PLA-g-GMA จะทำให้ค่า Elongation at break เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากการส่งเสริมความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBAT ส่งผลให้บริเวณรอยต่อของทั้งสองเฟสมีการยึดติดเพิ่มขึ้น ทำให้คอมพอสิตที่มีการเติม PLA-g-GMA ได้รับอิทธิพลจากทั้ง CNT และ PLA-g-GMA จึงทำให้ PBAT สามารถแสดงความเป็น Elasticity ได้มีประสิทธิภาพมากกว่าคอมพอสิตที่ไม่มีการเติม PLA-g-GMA [66, 71]

อย่างไรก็ตามจากผลที่ได้ พบว่าการเติม CNT ในปริมาณมากกว่า 1 phr จะไม่ส่งผลต่อค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากงานวิจัยของ Urquijo J. และคณะ [19] ได้กล่าวว่าการเพิ่มขึ้นของสมบัติการดึงยึดอย่างไม่มีนัยสำคัญ อาจเกิดจากอิทธิพลที่แตกต่างกัน 3 อิทธิพล ได้แก่ (1) การลดลงของปริมาณผลึกของ PLA ในคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT อย่างมีนัยสำคัญ (2) ระดับการกระจายตัวของ CNT ที่ต่ำในคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT เนื่องจากการเคลื่อนย้ายไปยังเฟสกระจายตัว PBAT และ (3) อาจเกิดจาก Aspect ration ของ CNT ที่ลดลง เนื่องจากได้รับแรงเฉือนได้ระหว่างกระบวนการผสมหรือกระบวนการขึ้นรูป

ดังนั้น จากผลการทดสอบที่ได้แสดงให้เห็นว่าสมบัติการดึงยึดของคอมพอสิตนั้นจะขึ้นอยู่กับ การมีอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างเฟสของคอมพอสิต ทำให้มีการยึดติดระหว่างเฟสที่ดี ซึ่งการเติม CNT และ PLA-g-GMA จะส่งเสริมการเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงและเพิ่มการยึดติดระหว่างเฟส ซึ่งสอดคล้องกับผลของ SEM ที่กล่าวในข้างต้น



รูปที่ 4.15 สมบัติการดึงยึดของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA (a) Young's modulus (b) Tensile strength และ (c) Elongation at break

ตารางที่ 4.4 สมบัติการดึงยึดของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม

Sample	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PLA/PBAT/C0	375.27 ± 26.59	12.88 ± 0.67	6.00 ± 0.37
PLA/PBAT/C1	546.79 ± 7.60	16.67 ± 0.55	9.31 ± 1.06
PLA/PBAT/C3	548.46 ± 16.11	16.86 ± 0.44	8.62 ± 0.76
PLA/PBAT/C5	554.39 ± 27.01	18.12 ± 0.52	9.80 ± 1.07
PLA/PBAT/C10	559.65 ± 11.63	17.88 ± 0.80	9.76 ± 0.89
PLA/PBAT/PG9/C0	433.51 ± 15.91	13.88 ± 1.83	8.86 ± 1.20
PLA/PBAT/PG9/C1	614.87 ± 12.77	18.11 ± 0.69	10.20 ± 2.24
PLA/PBAT/PG9/C3	599.83 ± 7.79	17.61 ± 0.83	10.24 ± 1.78
PLA/PBAT/PG9/C5	596.99 ± 8.94	18.48 ± 0.52	10.99 ± 1.40
PLA/PBAT/PG9/C10	610.12 ± 8.32	18.84 ± 0.80	10.13 ± 1.24

4.11 สมบัติความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA

โดยทั่วไปความสามารถในการนำไฟฟ้าของวัสดุจะมีด้วยกัน 2 แบบ แบบแรกจะเกิดจากเฟสเมทริกซ์ที่อยู่รอบ ๆ เฟสที่กระจายตัว (สารเติมแต่ง) และระยะห่างระหว่างอนุภาคตัวนำไฟฟ้ามีระยะที่มากกว่าระยะห่างของการกระโดดข้ามของอิเล็กตรอน ก่อให้เกิดปรากฏการทะลุผ่านอุโมงค์ (tunneling effect) แบบที่สองจะเกิดจากการสัมผัสกันของอนุภาคตัวนำไฟฟ้าเมื่อสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคตัวนำไฟฟ้าถึงค่าวิกฤต ณ จุดนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันในการนำไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้าอย่างกะทันหันนี้บ่งชี้ถึงช่วง Conductive percolation ของวัสดุ

สมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุคาร์บอนมักจะเกิดจากการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอน (electron transport) 2 ลักษณะ คือ การกระโดด (hopping) และการเคลื่อนย้าย (migration) ในระบบแบบสององค์ประกอบที่มีอนุภาคคาร์บอนเป็นอนุภาคตัวนำไฟฟ้าและมีเมทริกซ์พอลิเมอร์เป็นเฟสต่อเนื่อง เมื่ออนุภาคเกิดการสัมผัสกันก็จะก่อให้เกิดการนำกระแสไฟฟ้าทั่วทั้งระบบผ่านการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอน ในทางกลับกันถ้าอนุภาคไม่มีการสัมผัสกันแต่ระยะห่างระหว่างอนุภาคข้างเคียงใกล้เคียงกัน

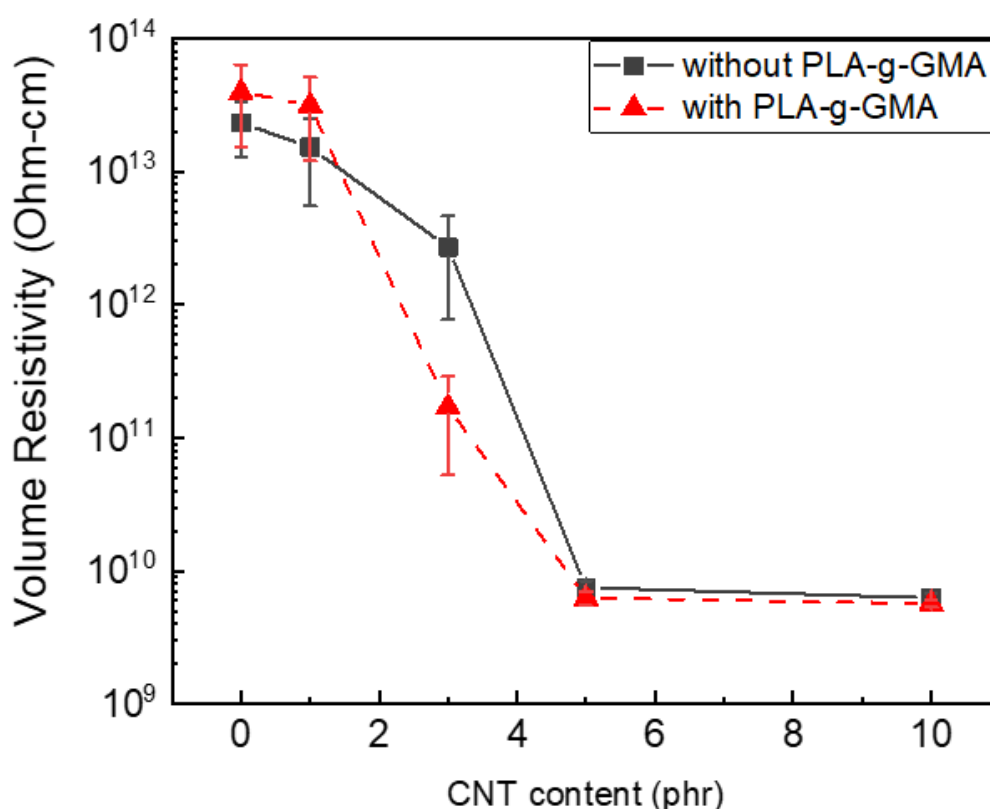
มากพอ อิเล็กตรอนสามารถกระโดดจากอนุภาคหนึ่งไปยังอีกอนุภาคหนึ่งได้จากสนามไฟฟ้าระหว่างอนุภาคตัวนำไฟฟ้า [73]

ความต้านทานไฟฟ้าของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA แสดงดังรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.5 พบว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ PLA/PBAT/PLA-g-GMA จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้า เท่ากับ 2.32×10^{13} และ 3.94×10^{13} ohm-cm ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงของวัสดุที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้า แต่เมื่อมีการเติม CNT จะส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของคอมพอสิตที่เติม CNT 10 phr ลดลงเป็น $< 6.29 \times 10^9$ และ $< 5.69 \times 10^9$ ohm-cm สำหรับกรณีไม่เติมและเติม PLA-g-GMA ตามลำดับ แสดงถึงการส่งเสริมความสามารถการนำไฟฟ้าของ CNT เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ CNT ทำให้ขนาดเฟสของ PBAT เล็กลงและสามารถกระจายตัวใน PLA ได้ดี ส่งผลให้เกิดการเชื่อมกันระหว่าง CNT เพิ่มขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิด Nano-bridge effect แล้วช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนและทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของคอมพอสิตลดลง [19, 58] อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยของ Pang H. และคณะ [74] ได้รายงานว่าวัสดุตัวนำไฟฟ้าจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรต่ำกว่า 10^6 ohm-cm วัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้าจะมีค่าความต้านทานในช่วง 10^6 - 10^{11} ohm-cm และวัสดุฉนวนไฟฟ้ามีค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรมากกว่า 10^{11} ohm-cm ดังนั้นจากรายงานดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่มีปริมาณ CNT 10 phr ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA เป็นวัสดุกึ่งตัวนำไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kashi และคณะ [73] ได้ศึกษาคอมพอสิต PLA/graphene nanoparticle (GNP) และ PBAT/GNP พบว่าการนำไฟฟ้าของ PLA/GNP และ PBAT/GNP ในกรณีที่ไม่เติม GNP มีค่าประมาณ 10^{-14} และ 10^{-11} S/m ตามลำดับ แต่เมื่อมีการเติม GNP ในปริมาณ 15 %wt ค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิต PLA/GNP และ PBAT/GNP จะเพิ่มขึ้นถึง 10^{-1} และ 10^{-5} S/m ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าแม้จะมีการเติม GNP ในปริมาณที่มากกว่าช่วง Percolation threshold ค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิต PBAT/GNP มีอัตราการเพิ่มขึ้นน้อยกว่าคอมพอสิต PLA/GNP ดังรูปที่ 4.17 สิ่งนี้อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้คอมพอสิต PLA/PBAT/CNT มีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูง แม้จะมีการเติม CNT ในปริมาณ 10 phr เนื่องจาก CNT ส่วนใหญ่จะฝังตัวอยู่ในเฟสของ PBAT

เมื่อพิจารณาปริมาณการเติม PLA-g-GMA พบว่าคอมพอสิตที่มีปริมาณการเติม CNT 3 phr จะเริ่มมีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วงกึ่งตัวนำไฟฟ้า ในขณะที่คอมพอสิตที่ไม่มีการเติม PLA-g-GMA ต้องใช้ CNT ปริมาณ 5 phr ถึงมีค่าความต้านทานไฟฟ้าในช่วงกึ่งตัวนำไฟฟ้า เนื่องจาก

PLA-g-GMA ช่วยส่งเสริมให้ PBAT สามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ PLA ได้ดี ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างอนุภาคตัวนำไฟฟ้า (CNT) แคบลง อิเล็กตรอนจึงสามารถเกิดการกระโดดหรือเคลื่อนย้ายได้ง่ายกว่ากรณีที่ไม่เติม PLA-g-GMA [73] อย่างไรก็ตามที่ปริมาณการเติม CNT ต่ำกว่า 3 phr คอมพอสิตที่มีการเติม PLA-g-GMA จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าที่สูงกว่ากรณีที่ไม่เติม PLA-g-GMA เนื่องจากลักษณะสัณฐานวิทยาของ PBAT เกิดการยึดออกและมีขนาดใหญ่ ทำให้การเชื่อมกันระหว่างอนุภาค CNT เพื่อทำการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนเกิดได้ยาก จึงทำให้ประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของคอมพอสิตลดลง [75]

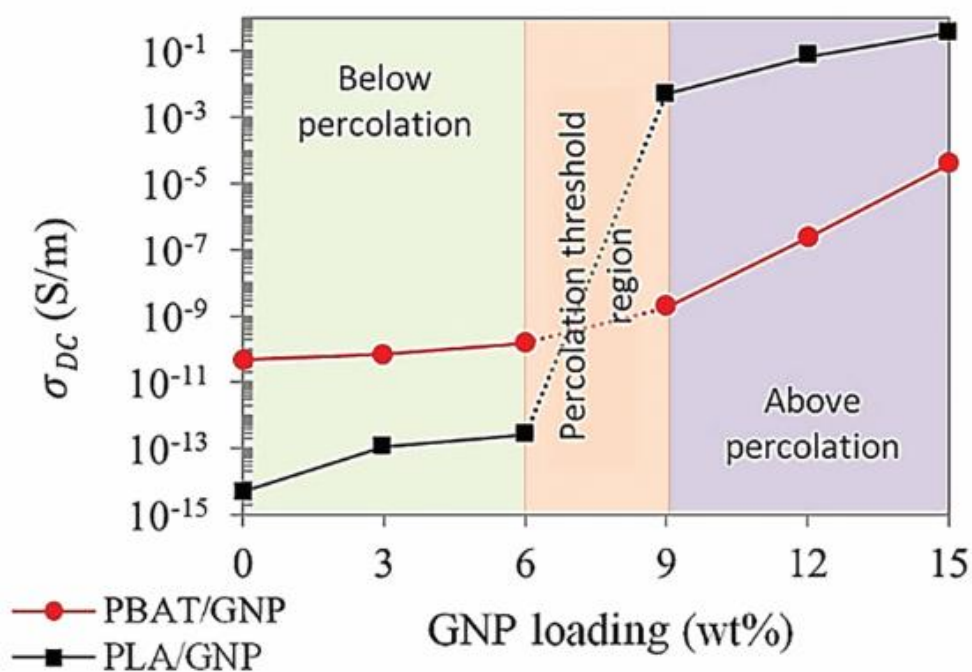
อย่างไรก็ตามเนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือในการทดสอบที่สามารถวัดความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรได้ต่ำสุดที่ 1.00×10^7 ohm ทำให้คอมพอสิตที่มีการเติม CNT ในปริมาณ 5 และ 10 phr ไม่สามารถที่จะวิเคราะห์ความแตกต่างของสภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรของคอมพอสิตได้ (ดังตารางที่ ก.2)



รูปที่ 4.16 สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA

ตารางที่ 4.5 ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA

Sample	Volume resistivity (ohm-cm)	
	Without PLA-g-GMA	With PLA-g-GMA
PLA/PBAT/C0	$2.32 \pm 1.03 \times 10^{13}$	$3.94 \pm 2.40 \times 10^{13}$
PLA/PBAT/C1	$1.51 \pm 0.96 \times 10^{13}$	$3.13 \pm 1.93 \times 10^{13}$
PLA/PBAT/C3	$2.70 \pm 1.93 \times 10^{12}$	$1.70 \pm 1.17 \times 10^{11}$
PLA/PBAT/C5	$< 7.48 \pm 0.95 \times 10^9$	$< 6.23 \pm 0.74 \times 10^9$
PLA/PBAT/C10	$< 6.29 \pm 0.45 \times 10^9$	$< 5.69 \pm 0.37 \times 10^9$



รูปที่ 4.17 ค่าการนำไฟฟ้าของคอมพอสิต PLA/GNP และ PBAT/GNP ที่ปริมาณการเติม GNP ต่าง ๆ [73]

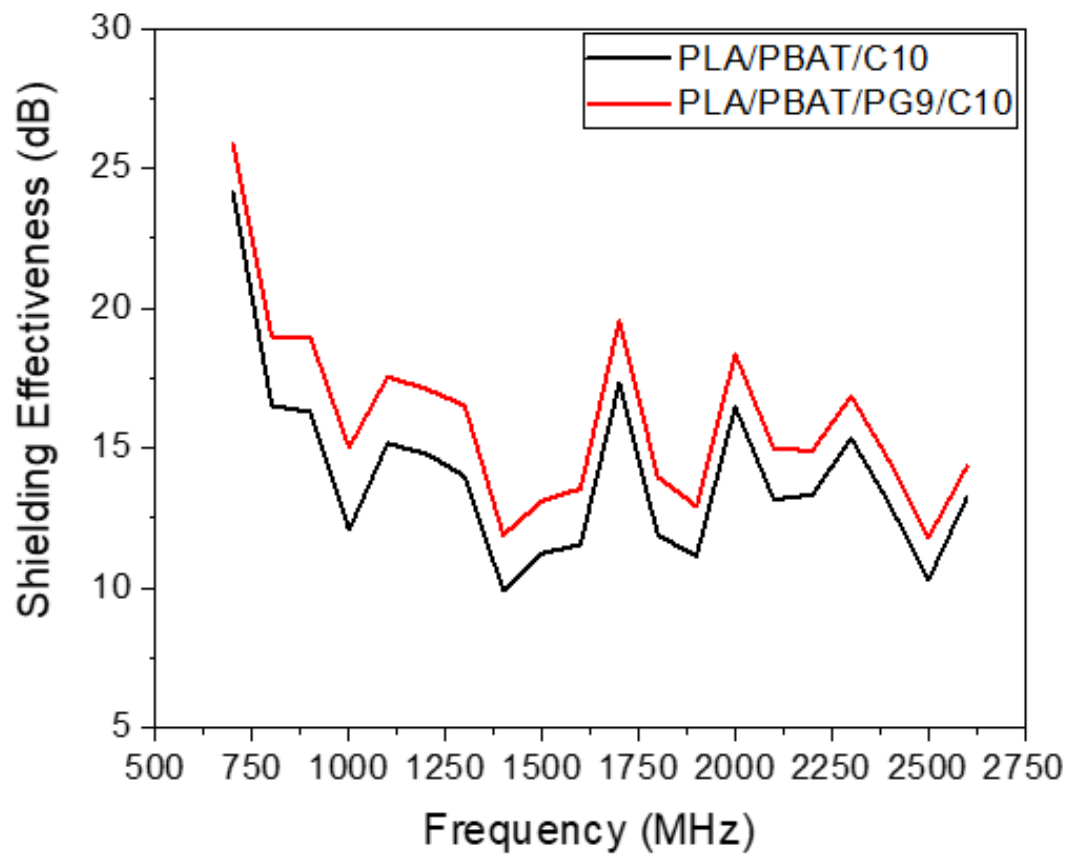
4.12 สมบัติการป้องกันการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT

EMI SE ของวัสดุป้องกันสามารถหาได้จากอัตราส่วนลอการิทึมระหว่างพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบ (incident power; P_i) และพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทะลุผ่าน (transmission power; P_T) และมีหน่วยเป็น เดซิเบล (dB) ซึ่ง EMI SE จะขึ้นอยู่กับสมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติไดอิเล็กตริก ความหนาของวัสดุ และช่วงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่วัสดุได้รับ นอกจากนี้จากกลไกการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า EMI SE สามารถหาได้จากผลรวมของกลไกการป้องกันแบบสะท้อน (SE_R) ดูดกลืน (SE_A) และการสะท้อนภายในวัสดุ (SE_M) โดยกลไกหลักในการป้องกัน EMI คือ กลไกแบบสะท้อนและแบบดูดกลืน โดย SE_R จะเกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบกับอิเล็กตรอนอิสระบนพื้นผิวของวัสดุ ในขณะที่ SE_A จะเกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับความเป็นขั้วทางไฟฟ้าของวัสดุหรือความแข็งแรงของโครงข่ายการนำไฟฟ้า (conductive network) และเมื่อ EMI SE มีค่าสูงกว่า 10 dB กลไกการป้องกันแบบสะท้อนกันภายในวัสดุสามารถที่จะไม่นำมาพิจารณาได้ [4, 76]

สำหรับพอลิเมอร์คอมพอสิต ประสิทธิภาพการป้องกันจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำไฟฟ้า การกระจายตัว อัตราส่วนระหว่างความยาวและความกว้าง (aspect ratio) และปริมาณ CNT ในคอมพอสิต โดยความสามารถในการนำไฟฟ้าและโครงข่ายเครือข่ายจะเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อ EMI SE ซึ่งวัสดุป้องกันในเชิงพาณิชย์จะต้องมีค่า EMI SE อย่างน้อย 20 dB หรือมีการทะลุผ่านของคลื่นเท่ากับ 1% [76]

รูปที่ 4.18 แสดง EMI SE ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT 10 phr ในช่วงความถี่ 700-2600 MHz พบว่า EMI SE ของคอมพอสิตที่มีการเติม PLA-g-GMA จะสูงกว่ากรณีที่ไม่มีการเติม PLA-g-GMA โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 11-26 dB และ 9-24 dB ตามลำดับ เนื่องจาก PLA-g-GMA ส่งเสริมการกระจายตัวของเฟส PBAT ใน PLA ส่งผลให้ CNT สามารถเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของ PLA และ PBAT แล้วเกิดโครงข่ายเครือข่ายระหว่าง CNT-CNT มากขึ้น จึงทำให้คอมพอสิตที่มีการเติม PLA-g-GMA มีความสมบูรณ์ของโครงข่ายนำไฟฟ้ามากกว่าคอมพอสิตที่ไม่เติม PLA-g-GMA ส่งผลให้สามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี [77-79]

อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองที่ได้จะพบว่าค่า EMI SE ของคอมพอสิตจะมีค่าต่ำกว่า 20 dB ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานเป็นวัสดุป้องกัน EMI ในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากคอมพอสิตมีความต้านทานทางไฟฟ้าเชิงปริมาตรสูง แม้จะมีการเติม CNT ปริมาณ 10 phr



รูปที่ 4.18 EMI SE ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณการเติม CNT 10 phr ในช่วงความถี่ 700-2600 MHz



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBAT โดยใช้ PLA-g-GMA ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ จากนั้นสกัดส่วนการเติม PLA-g-GMA ที่ดีจะถูกนำมาใช้ในการศึกษาผลของความเข้ากันได้และผลของปริมาณ CNT ที่มีต่อสมบัติของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT โดยผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังนี้

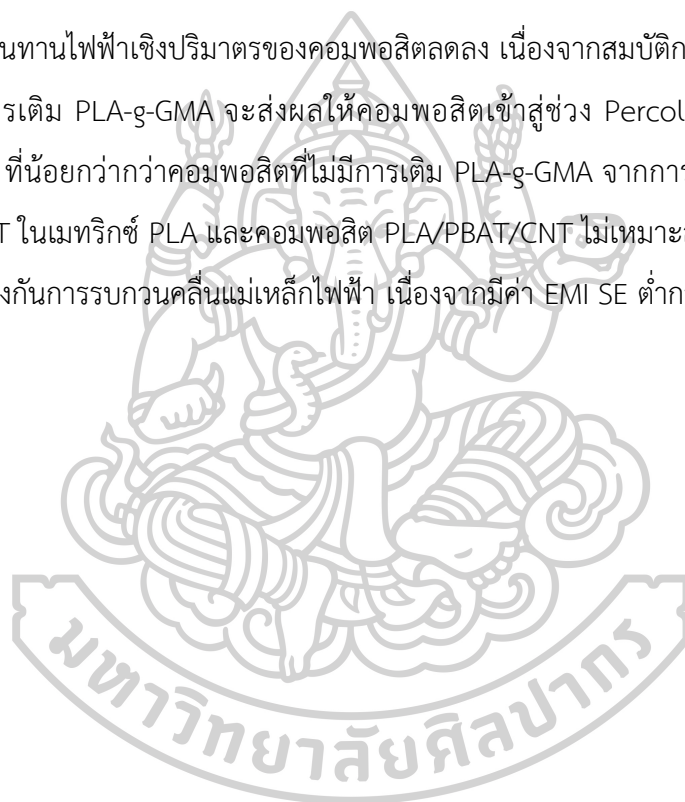
5.1.1 การศึกษาผลของปริมาณ PLA-g-GMA ที่มีต่อพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT พบว่าการเติม PLA-g-GMA สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBAT เนื่องจากช่องว่างระหว่างรอยต่อของเฟส PLA และ PBAT มีขนาดเล็กลง แล้วส่งผลให้เกิดการปรับปรุงสมบัติการดึงยึดของพอลิเมอร์ผสมให้ดีขึ้น โดยการเติม PLA-g-GMA จะไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม แต่อย่างไรก็ตาม PLA-g-GMA จะไปขัดขวางการเคลื่อนไหวยของสายโซ่พอลิเมอร์ส่งผลให้ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมลดลง

เมื่อพิจารณาลักษณะสัณฐานวิทยา สมบัติการดึงยึด และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT พบว่าการเติม PLA-g-GMA ที่ปริมาณ 9%wt เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดในการจะนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของความเข้ากันได้ต่อสมบัติของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมในสัดส่วนนี้ จะมีขนาดของช่องว่างระหว่างรอยต่อของเฟส PLA และ PBAT เล็กที่สุด มีสมบัติการดึงยึดสูง และมีปริมาณผลึกน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับการเติม PLA-g-GMA ในสัดส่วนอื่น ๆ ซึ่งสิ่งเหล่านี้บ่งบอกถึงความเข้ากันได้ที่เพิ่มขึ้นระหว่าง PLA และ PBAT

5.1.2 การศึกษาผลของปริมาณ CNT ที่มีต่อสมบัติของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ทั้งที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA พบว่า CNT ส่วนใหญ่จะฝังตัวอยู่ในเฟสของ PBAT โดยการเติม CNT ส่งเสริมการกระจายตัวของเฟส PBAT ในเมทริกซ์ PLA และยังช่วยปรับปรุงสมบัติการดึงยึดของคอมพอสิต จากการเกิดอันตรกิริยากันระหว่าง CNT และสายโซ่พอลิเมอร์ทั้ง PLA และ PBAT อย่างไรก็ตามจากข้อมูล Raman และ XRD พบว่าปริมาณ CNT ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณผลึกของคอมพอสิตลดลงและโครงสร้างของ CNT เกิดข้อบกพร่องมากขึ้น เนื่องจากแรงเฉือนที่สูงในระหว่างกระบวนการหลอมผสม นอกจากนี้จากการที่ CNT มีสมบัติการนำความร้อนที่ดี ส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของ PBAT ที่อยู่ในคอมพอสิตลดลง แต่ไม่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต

5.1.3 การศึกษาผลของการเติม PLA-g-GMA ที่มีต่อสมบัติของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT พบว่าคอมพอสิตที่มีการเติม PLA-g-GMA จะทำให้เฟสของ PBAT สามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ PLA ได้ดีกว่าคอมพอสิตที่ไม่มีการเติม PLA-g-GMA บ่งบอกถึงความเข้ากันได้ที่เพิ่มขึ้นระหว่าง PLA และ PBAT ส่งผลให้สมบัติการดักยึดของคอมพอสิตได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามการเติม PLA-g-GMA จะส่งผลให้ปริมาณผลึกของคอมพอสิตลดลง แต่การเติม PLA-g-GMA จะไม่ส่งผลต่อโครงสร้างของ CNT สมบัติทางความร้อน และเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต

สำหรับสมบัติการนำไฟฟ้าของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT พบว่าการเติม CNT เพิ่มขึ้น จะทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรของคอมพอสิตลดลง เนื่องจากสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีของ CNT นอกจากนี้การเติม PLA-g-GMA จะส่งผลให้คอมพอสิตเข้าสู่ช่วง Percolation threshold ได้ในปริมาณ CNT ที่น้อยกว่ากว่าคอมพอสิตที่ไม่มีการเติม PLA-g-GMA จากการส่งเสริมการกระจายตัวของเฟส PBAT ในเมทริกซ์ PLA และคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ไม่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ ในด้านการป้องกันการรบกวนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากมีค่า EMI SE ต่ำกว่า 20 dB



5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 อาจทำการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง PLA และ PBAT ที่มีต่อการกระจายตัวของ CNT และการนำไฟฟ้าของคอมพอสิต

5.2.2 อาจเพิ่มการศึกษาการกระจายตัวของ CNT ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope; TEM) เพื่อให้เห็นการกระจายตัวของ CNT ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

5.2.3 อาจทำการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวของแผ่นซีทให้มีความขรุขระ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

5.2.4 สภาวะในการขึ้นรูปแผ่นซีทคอมพอสิตด้วยเครื่องเครื่อง Compression molding ควรปรับเปลี่ยนตามความเหมาะสม



รายการอ้างอิง

1. González M., Mokry G., de Nicolás M., Baselga J., and Pozuelo J., *Carbon Nanotube Composites as Electromagnetic Shielding Materials in GHz Range, Carbon Nanotubes - Current Progress of their Polymer Composites*. 2016. p. 297-321.
2. Yu B., Zhao Z., Fu S., Meng L., Liu Y., Chen F., Wang K., and Fu Q., *Fabrication of PLA/CNC/CNT conductive composites for high electromagnetic interference shielding based on Pickering emulsions method*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019. 125: p. 105558-105570.
3. Al-Saleh M.H. and Sundararaj U., *Electrically conductive carbon nanofiber/polyethylene composite: effect of melt mixing conditions*. *Polymers for Advanced Technologies*, 2011. 22(2): p. 246-253.
4. Ramoa S.D.A.S., Barra G.M.O., Merlini C., Livi S., Soares B.G., and Pegoretti A., *Electromagnetic interference shielding effectiveness and microwave absorption properties of thermoplastic polyurethane/montmorillonite-polypyrrole nanocomposites*. *Polymers for Advanced Technologies*, 2018. 29(5): p. 1377-1384.
5. Harada M., Ohya T., Iida K., Hayashi H., Hirano K., and Fukuda H., *Increased impact strength of biodegradable poly(lactic acid)/poly(butylene succinate) blend composites by using isocyanate as a reactive processing agent*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007. 106(3): p. 1813-1820.
6. Çoban O., Bora M.Ö., Kutluk T., and Özkoç G., *Mechanical and thermal properties of volcanic particle filled PLA/PBAT composites*. *Polymer Composites*, 2018. 39(S3): p. E1500-E1511.
7. Kumar M., Mohanty S., Nayak S.K., and Rahail Parvaiz M., *Effect of glycidyl methacrylate (GMA) on the thermal, mechanical and morphological property of biodegradable PLA/PBAT blend and its nanocomposites*. *Bioresour Technol*, 2010. 101(21): p. 8406-15.
8. Lyu Y., Chen Y., Lin Z., Zhang J., and Shi X., *Manipulating phase structure of*

- biodegradable PLA/PBAT system: Effects on dynamic rheological responses and 3D printing.* Composites Science and Technology, 2020. 200: p. 108399-108414.
9. Soares B.G., Cordeiro E., Maia J., Pereira E.C.L., and Silva A.A., *The effect of the noncovalent functionalization of CNT by ionic liquid on electrical conductivity and electromagnetic interference shielding effectiveness of semi-biodegradable polypropylene/poly(lactic acid) composites.* Polymer Composites, 2019. 41(1): p. 82-93.
 10. Thayara C., Paloma P., Wagner M. P., Daniela B., and Carla D., *Electrical and thermal properties of PLA/CNT composite films.* Revista Materia, 2017. 22: p. E11863-E11870.
 11. Mat Desa M.S.Z., Hassan A., and Arsad A., *The Influence of Carbon Nanotubes Contents on Electrical and Flammability Properties of Poly(Lactic Acid)/Multiwalled Carbon Nanotubes Nanocomposites.* Solid State Phenomena, 2017. 268: p. 365-369.
 12. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. รายละเอียดข้อมูลพลาสติกชีวภาพ ประเภท พอลิแลคติกแอซิด (Poly(Lactic Acid)) Available from: http://asp.plastics.or.th:8001/files/article_file/20180624235102u.pdf.
 13. อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล, พอลิแลคติกแอซิด : พอลิเอสเทอร์ จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้, วิศวกรรมสาร มก. 2554. p. 99-110.
 14. สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทรายกระทรวงอุตสาหกรรม. *Poly(lactic acid) (PLA).* [23 ธันวาคม 2554]; Available from: <http://www.ocsb.go.th/upload/bioindustry/fileupload/9757-9874.pdf>.
 15. Supachok T. and Jatuphorn W., *Mechanical properties of Poly(lactic acid) Composites Reinforced with Microfibrillated Cellulose Prepared Using High Speed Blending.* Materials and Minerals, 2014. 24(2): p. 55-60.
 16. วรศักดิ์ เพชรโรทัย and นีรนุช ภู่อันต, พฤติกรรมและจลนศาสตร์การเกิดผลึกของพอลิแลคไทด์ผ่านกระบวนการก่อผลึกแบบเนื้อผสมและการเสริมสภาพพลาสติก, วารสารวิทยาศาสตร์ มช. . 2559. p. 458-474.
 17. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. บทที่ 9 รายละเอียดข้อมูลพลาสติกชีวภาพประเภทพอลิবিທີសီအိုတီເဖ-ໂຄ-ເທຣຟາເລ. Available from:

- http://asp.plastics.or.th:8001/files/article_file/20180624234830u.pdf.
18. สมจิตต ตั้งชัยวัฒนา. พอลิเมอร์ผสม (*Polymer Blend*) Available from: www.dss.go.th/images/st-article/cp_5_2548_polymer_blend.pdf.
 19. Urquijo J., Aranburu N., Dagr eou S., Guerrica-Echevarr a G., and Eguiaz abal J.I., *CNT-induced morphology and its effect on properties in PLA/PBAT-based nanocomposites*. *European Polymer Journal*, 2017. 93: p. 545-555.
 20. ปิตุพร พิมพาเพชร. การนำไฟฟ้าของวัสดุ. [19 พฤษภาคม]; Available from: <https://www.trueplookpanya.com/learning/detail/33332>.
 21. สมพร เหล่าทองสาร. การนำไฟฟ้า. [19 พฤษภาคม]; Available from: <https://www.slideshare.net/somporndb/conductivity-13933943>.
 22. อรพรรณ ไวแพน. การเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าผ่านตัวกลาง. [19 พฤษภาคม]; Available from: <https://orapanwaipan.wordpress.com/เกี่ยวกับ/ฟิสิกส์-4/ไฟฟ้ากระแส/การเคลื่อนที่ของประจุ/>.
 23. สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาการเรียนรู้. พันธะโลหะ-*metallic bond*. [19 พฤษภาคม]; Available from: www.il.mahidol.ac.th/e-media/ap-chemistry1/chemical_bonding/metallic.htm.
 24. L. D., *Intelligent Macromolecules for Smart Devices: From Material Synthesis to device Application*. 2004: p. 43-46.
 25. อภิชาติ ด่านวิทยากุล. ท่อนาโนคาร์บอน. [25 พฤษภาคม]; Available from: https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/253_13-18.pdf.
 26. Ribeiro B., Botelho E.C., Costa M.L., and Bandeira C.F., *Carbon nanotube buckypaper reinforced polymer composites: a review*. *Pol meros*, 2017. 27(3): p. 247-255.
 27. Kondo Y., Takayanagi K., and Ohnishi H., *Suspended Gold Nanowires: Ballistic Transport of Electrons*. *JSAP Int.*, 2001. 3: p. 3-8.
 28. Morelos-G omez A., Trist an L opez F., Cruz-Silva R., Vega D a-az S.M., and Terrones M., *Modified Carbon Nanotubes*, *Springer Handbook of Nanomaterials*. 2013. p. 189-232.
 29. การรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า. [13 พฤษภาคม]; Available from: https://www.oocities.org/wit_ja/emc.html.
 30. ดร.วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์. ปัญหาการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์. [13

พฤษภาคม]; Available from:

https://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/tn220A_p45_48.pdf.

31. Wang Y., Fan Z.-W., Zhang H., Guo J., Yan D.-X., Wang S., Dai K., and Li Z.-M., *3D-printing of segregated carbon nanotube/poly(lactic acid) composite with enhanced electromagnetic interference shielding and mechanical performance*. *Materials & Design*, 2021. 197: p. 109222-109229.
32. Liying Z., Shuguang B., and Ming L., *Lightweight Electromagnetic Interference Shielding Materials and Their Mechanisms*. *Electromagnetic Materials and Devices*. 2018.
33. Sriseubsai W., Tippayakraisorn A., and Lim J.W., *Robust Design of PC/ABS Filled with Nano Carbon Black for Electromagnetic Shielding Effectiveness and Surface Resistivity*. *Processes*, 2020. 8(5).
34. Thanh C.N., Chaiwat R., and Yupaporn R., *The Study on the Grafting of Glycidyl Methacrylate onto Poly(lactic acid) in an Internal Mixer*. *Walailak J Sci & Tech*, 2016. 13(12): p. 1037-1046.
35. Arruda L.C., Magaton M., Bretas R.E.S., and Ueki M.M., *Influence of chain extender on mechanical, thermal and morphological properties of blown films of PLA/PBAT blends*. *Polymer Testing*, 2015. 43: p. 27-37.
36. Zhou X., Deng J., Fang C., Lei W., Song Y., Zhang Z., Huang Z., and Li Y., *Additive manufacturing of CNTs/PLA composites and the correlation between microstructure and functional properties*. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021. 60: p. 27-34.
37. Liu J., Jiang H., and Chen L., *Grafting of Glycidyl Methacrylate onto Poly(lactide) and Properties of PLA/Starch Blends Compatibilized by the Grafted Copolymer*. *Journal of Polymers and the Environment*, 2012. 20(3): p. 810-816.
38. Harrane A., Belaouedj M.A., Meghabar R., and Belbachir M., *Bulk polycondensation of lactic acid by Maghnite-H+ a non-toxic catalyst*. *Journal of Polymer Research*, 2012. 19(2).
39. Thanh N.C., Ruksakulpiwat C., and Ruksakulpiwat Y., *Effect of Melt Mixing Time in Internal Mixer on Mechanical Properties and Crystallization Behavior of Glycidyl Methacrylate Grafted Poly (Lactic Acid)*. *Journal of Materials Science*

- and Chemical Engineering, 2015. 03(07): p. 102-107.
40. Shah P.N., Kim N., Huang Z., Jayamanna M., Kokil A., Pine A., Kaltsas J., Jahngen E., Ryan D.K., Yoon S., Kovar R.F., and Lee Y., *Environmentally benign synthesis of vinyl ester resin from biowaste glycerin*. RSC Advances, 2015. 5(48): p. 38673-38679.
 41. Kangwanwatthanasiri P., Suppakarn N., Ruksakulpiwat C., and Ruksakulpiwat Y., *Glycidyl Methacrylate Grafted Polylactic Acid: Morphological Properties and Crystallization Behavior*. Macromolecular Symposia, 2015. 354(1): p. 237-243.
 42. Li R., Wu L., and Li B.-G., *Poly (L-lactide)/PEG-*mb*-PBAT blends with highly improved toughness and balanced performance*. European Polymer Journal, 2018. 100: p. 178-186.
 43. Kashani Rahimi S., Aeinehvand R., Kim K., and Otaigbe J.U., *Structure and Biocompatibility of Bioabsorbable Nanocomposites of Aliphatic-Aromatic Copolyester and Cellulose Nanocrystals*. Biomacromolecules, 2017. 18(7): p. 2179-2194.
 44. Wan J., Zhao J., Gan B., Li C., Molina-Aldareguia J., Zhao Y., Pan Y.-T., and Wang D.-Y., *Ultrastiff Biobased Epoxy Resin with High T_g and Low Permittivity: From Synthesis to Properties*. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2016. 4(5): p. 2869-2880.
 45. McEwan K.A., Slavin S., Tunnah E., and Haddleton D.M., *Dual-functional materials via CCTP and selective orthogonal thiol-Michael addition/epoxide ring opening reactions*. Polymer Chemistry, 2013. 4(8).
 46. Stuparu M.C. and Khan A., *Sequential Thiol-Epoxy and Esterification Reactions: A Facile Route to Bifunctional Homopolymer Sequences, Multi-Component and Sequential Reactions in Polymer Synthesis*. 2014. p. 87-103.
 47. Zhang K., Nagarajan V., Misra M., and Mohanty A.K., *Supertoughened renewable PLA reactive multiphase blends system: phase morphology and performance*. ACS Appl Mater Interfaces, 2014. 6(15): p. 12436-48.
 48. Daneshvar M. and Masoomi M., *Synthesis and application of MDPE-g-GMA as reactive compatibilizer in blends of MDPE/PET and MDPE/PA6*. Journal of Applied Polymer Science, 2012. 124(3): p. 2048-2054.

49. Dos Santos Filho E.A., Luna C.B.B., Siqueira D.D., Ferreira E., and Araujo E.M., *Tailoring Poly(lactic acid) (PLA) Properties: Effect of the Impact Modifiers EE-g-GMA and POE-g-GMA*. *Polymers (Basel)*, 2021. 14(1).
50. Shi Q., Chen C., Gao L., Jiao L., Xu H., and Guo W., *Physical and degradation properties of binary or ternary blends composed of poly (lactic acid), thermoplastic starch and GMA grafted POE*. *Polymer Degradation and Stability*, 2011. 96(1): p. 175-182.
51. Yoon S.-K. and Chung D.-J., *In Vivo Degradation Studies of PGA-PLA Block Copolymer and Their Histochemical Analysis for Spinal-Fixing Application*. *Polymers*, 2022. 14(16).
52. Ferri J.M., Garcia-Garcia D., Rayon E., Samper M.D., and Balart R., *Compatibilization and Characterization of Polylactide and Biopolyethylene Binary Blends by Non-Reactive and Reactive Compatibilization Approaches*. *Polymers (Basel)*, 2020. 12(6).
53. Ferreira E.d.S.B., Luna C.B.B., Siqueira D.D., dos Santos Filho E.A., Araújo E.M., and Wellen R.M.R., *Production of Eco-Sustainable Materials: Compatibilizing Action in Poly (Lactic Acid)/High-Density Biopolyethylene Bioblends*. *Sustainability*, 2021. 13(21).
54. Quero E., Müller A.J., Signori F., Coltelli M.-B., and Bronco S., *Isothermal Cold-Crystallization of PLA/PBAT Blends With and Without the Addition of Acetyl Tributyl Citrate*. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 2012. 213(1): p. 36-48.
55. Xiao H., Lu W., and Yeh J.-T., *Crystallization behavior of fully biodegradable poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009. 112(6): p. 3754-3763.
56. Ting G., Zhu D., Lu Y., and Lu S., *Effect of PLA-g-GMA on the Thermal, Rheological and Physical Behavior of PLA/PBAT Blends*. *Polymer Science, Series A*, 2019. 61(3): p. 317-324.
57. Yin Z., Zhang Y., Zhang X., and Yin J., *Effects of the compatibilizer PP-g-GMA on morphology and mechanical properties of PP/PC blends*. *Polymer*, 1998. 39(3): p. 547-551.
58. Jalali Dil E., Arjmand M., Otero Navas I., Sundararaj U., and Favis B.D., *Interface*

- Bridging of Multiwalled Carbon Nanotubes in Polylactic Acid/Poly(butylene adipate-co-terephthalate): Morphology, Rheology, and Electrical Conductivity.* *Macromolecules*, 2020. 53(22): p. 10267-10277.
59. Shang M., Gao Z., Cheng H., and Shentu B., *Comparative Study of Poly(butylene terephthalate)/Carbon Nanotube Nanocomposites with Non-reactive and Reactive Elastomers: Morphology and Properties.* *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020. 59(32): p. 14306-14314.
60. Ko S.W., Hong M.K., Park B.J., Gupta R.K., Choi H.J., and Bhattacharya S.N., *Morphological and rheological characterization of multi-walled carbon nanotube/PLA/PBAT blend nanocomposites.* *Polymer Bulletin*, 2009. 63(1): p. 125-134.
61. Liu L., Ma P.-C., Xu M., Khan S.U., and Kim J.-K., *Strain-sensitive Raman spectroscopy and electrical resistance of carbon nanotube-coated glass fibre sensors.* *Composites Science and Technology*, 2012. 72(13): p. 1548-1555.
62. Arif M.F., Kumar S., Gupta T.K., and Varadarajan K.M., *Strong linear-piezoresistive response of carbon nanostructures reinforced hyperelastic polymer nanocomposites.* *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018. 113: p. 141-149.
63. Verma P., Bansala T., Chauhan S.S., Kumar D., Deveci S., and Kumar S., *Electromagnetic interference shielding performance of carbon nanostructure reinforced, 3D printed polymer composites.* *Journal of Materials Science*, 2021. 56(20): p. 11769-11788.
64. Verma P., Saini P., Malik R.S., and Choudhary V., *Excellent electromagnetic interference shielding and mechanical properties of high loading carbon-nanotubes/polymer composites designed using melt recirculation equipped twin-screw extruder.* *Carbon*, 2015. 89: p. 308-317.
65. Chipara D.M., Macossay J., Ybarra A.V.R., Chipara A.C., Eubanks T.M., and Chipara M., *Raman spectroscopy of polystyrene nanofibers—Multiwalled carbon nanotubes composites.* *Applied Surface Science*, 2013. 275: p. 23-27.
66. Nie P., Min C., Song H.-J., Chen X., Zhang Z., and Zhao K., *Preparation and Tribological Properties of Polyimide/Carboxyl-Functionalized Multi-walled*

- Carbon Nanotube Nanocomposite Films Under Seawater Lubrication*. Tribology Letters, 2015. 58(1).
67. Wei X., Cui W., Zheng K., Wang J., Hu J., and Zhou H., *Bimodal Cellular Structure Evolution in PBAT Foams Incorporated by Carbon Nanotubes and Graphene Nanosheets*. Journal of Polymers and the Environment, 2022. 30(7): p. 2785-2799.
68. Hadj-Hamou A.S., Matassi S., Abderrahmane H., and Yahiaoui F., *Effect of cloisite 30B on the thermal and tensile behavior of poly(butylene adipate-co-terephthalate)/poly(vinyl chloride) nanoblends*. Polymer Bulletin, 2014. 71(6): p. 1483-1503.
69. Xiang S., Feng L., Bian X., Li G., and Chen X., *Evaluation of PLA content in PLA/PBAT blends using TGA*. Polymer Testing, 2020. 81.
70. Ciecierska E., Boczkowska A., Kurzydłowski K.J., Rosca I.D., and Van Hoa S., *The effect of carbon nanotubes on epoxy matrix nanocomposites*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2012. 111(2): p. 1019-1024.
71. Azizi S., Azizi M., and Sabetzadeh M., *The Role of Multiwalled Carbon Nanotubes in the Mechanical, Thermal, Rheological, and Electrical Properties of PP/PLA/MWCNTs Nanocomposites*. Journal of Composites Science, 2019. 3(3).
72. Ren F., Li Z., Xu L., Sun Z., Ren P., Yan D., and Li Z., *Large-scale preparation of segregated PLA/carbon nanotube composite with high efficient electromagnetic interference shielding and favourable mechanical properties*. Composites Part B: Engineering, 2018. 155: p. 405-413.
73. Kashi S., Gupta R.K., Kao N., Hadigheh S.A., and Bhattacharya S.N., *Influence of graphene nanoplatelet incorporation and dispersion state on thermal, mechanical and electrical properties of biodegradable matrices*. Journal of Materials Science & Technology, 2018. 34(6): p. 1026-1034.
74. Pang H., Xu L., Yan D.-X., and Li Z.-M., *Conductive polymer composites with segregated structures*. Progress in Polymer Science, 2014. 39(11): p. 1908-1933.
75. Abbasi Moud A., Javadi A., Nazockdast H., Fathi A., and Altstaedt V., *Effect of dispersion and selective localization of carbon nanotubes on rheology and electrical conductivity of polyamide 6 (PA6), Polypropylene (PP), and PA6/PP*

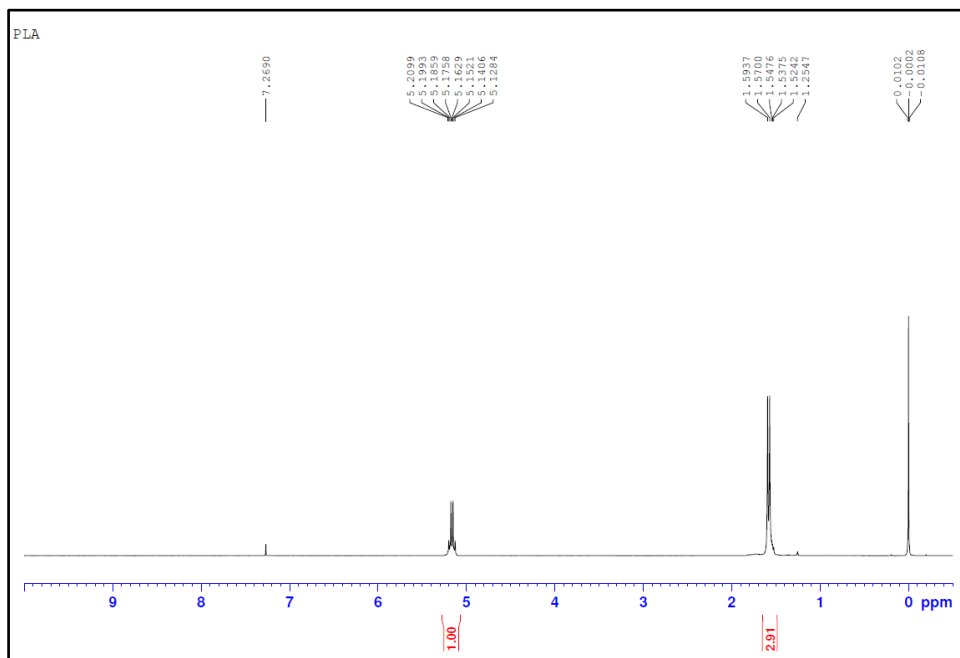
- nanocomposites*. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2015. 53(5): p. 368-378.
76. Poothanari M.A., Abraham J., Kalarikkal N., and Thomas S., *Excellent Electromagnetic Interference Shielding and High Electrical Conductivity of Compatibilized Polycarbonate/Polypropylene Carbon Nanotube Blend Nanocomposites*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018. 57(12): p. 4287-4297.
77. Xu P., Huang B., Tang R., Wang Z., Tu J., and Ding Y., *Improved mechanical and EMI shielding properties of PLA/PCL composites by controlling distribution of PIL-modified CNTs*. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2022. 5(2): p. 991-1002.
78. Han I.-S., Lee Y.K., Lee H.S., Yoon H.G., and Kim W.N., *Effects of multi-walled carbon nanotube (MWCNT) dispersion and compatibilizer on the electrical and rheological properties of polycarbonate/poly(acrylonitrile-butadiene-styrene)/MWCNT composites*. Journal of Materials Science, 2014. 49(13): p. 4522-4529.
79. Wang Zhenfeng, Yan Tong, Tu Jiaying, Cheng Rui, Xu Pei, and Yunsheng D., *Improving Flame Retardant and EMI Shielding Properties of PLA/PCL Composites Using Catalytic Imidazolium Modified CNTs and Ammonium Polyphosphate*. Materials Science, 2022.



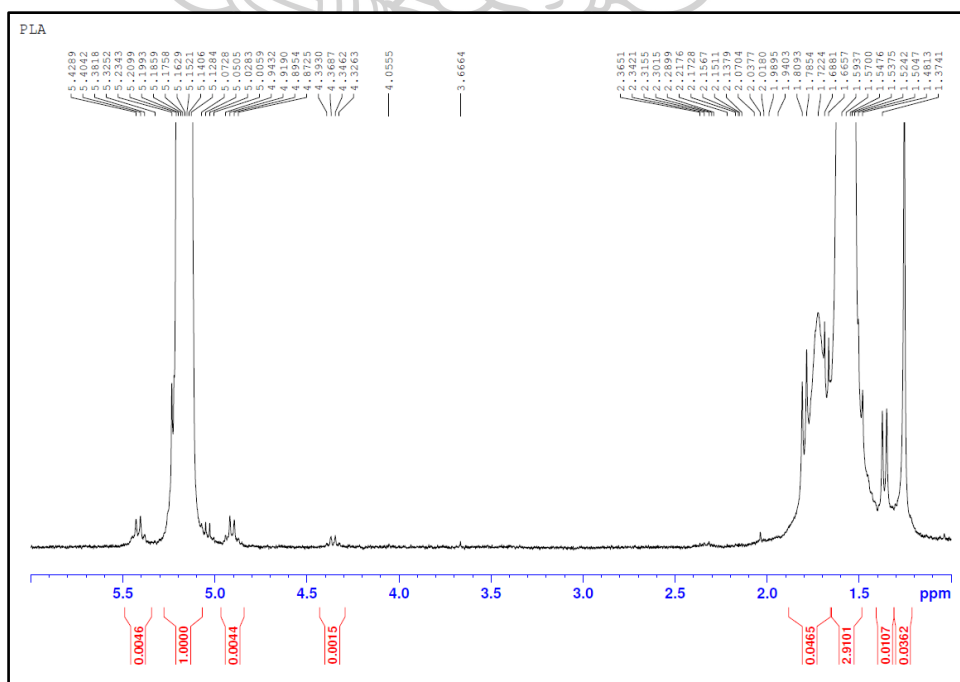
ภาคผนวก ก
ข้อมูลและผลการทดลองต่าง ๆ

ตอนที่ 1 การศึกษาผลของปริมาณ PLA-g-GMA ที่มีต่อพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA

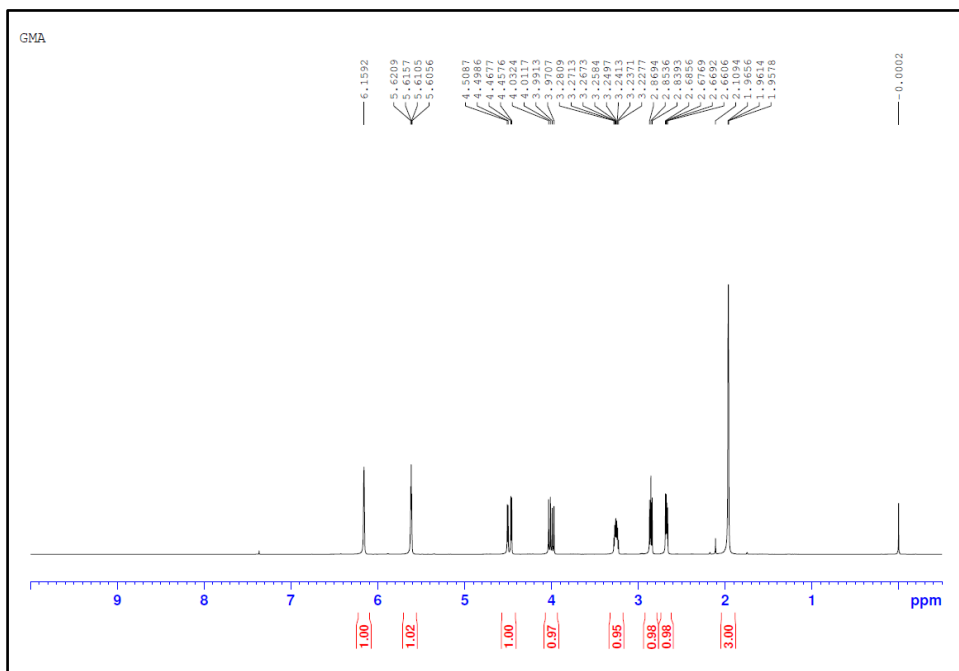
ก.1 ผลการทดสอบ NMR ของ PLA GMA และ PLA-g-GMA



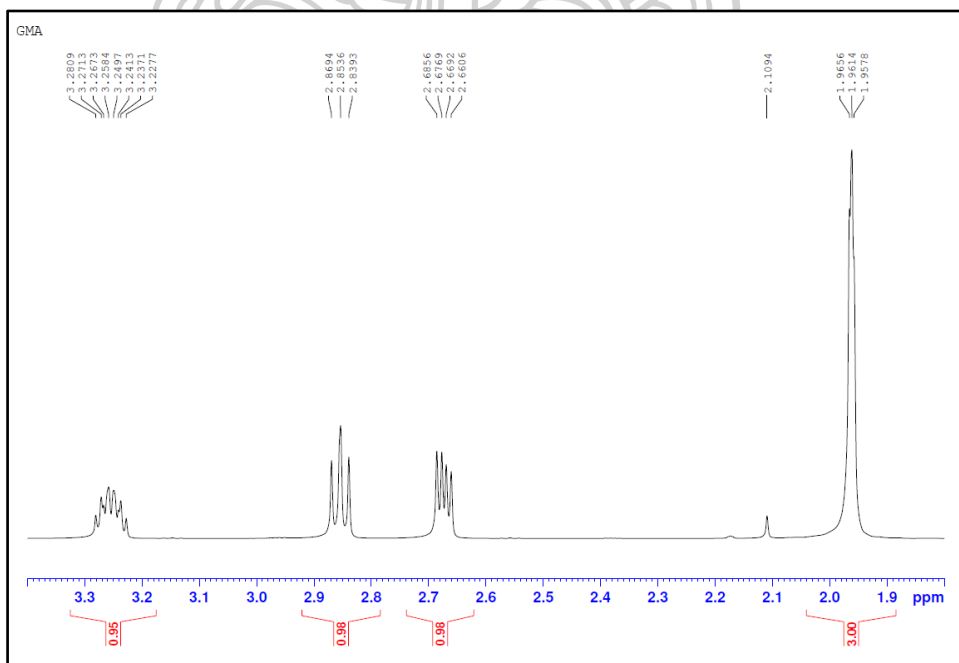
รูปที่ ก.1 สเปกตรัม NMR ของ PLA บริสุทธิ์ในช่วง 0-10 ppm



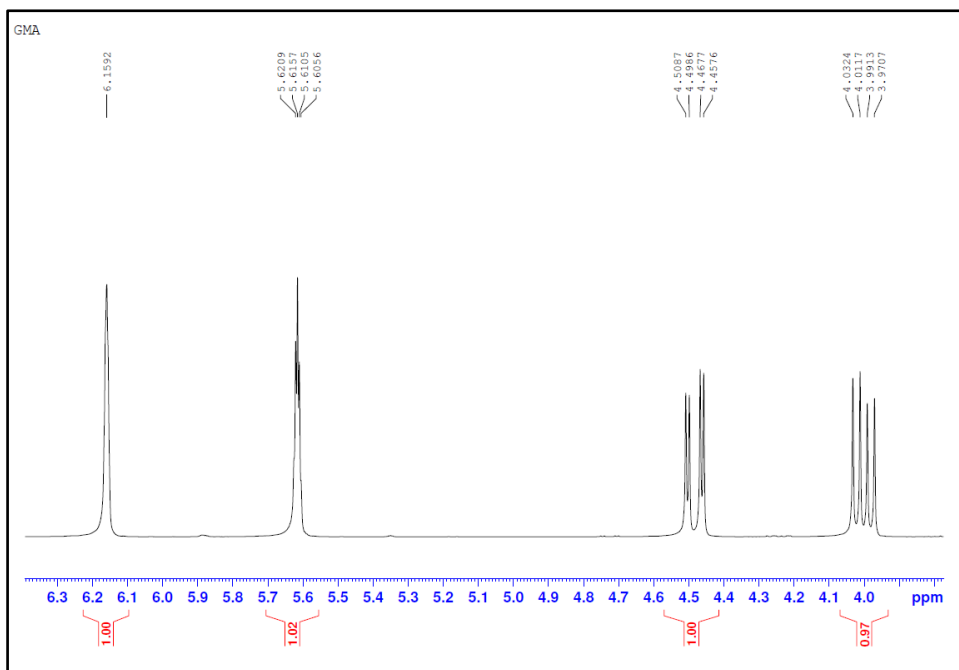
รูปที่ ก.2 สเปกตรัม NMR ของ PLA บริสุทธิ์ในช่วง 1-6 ppm



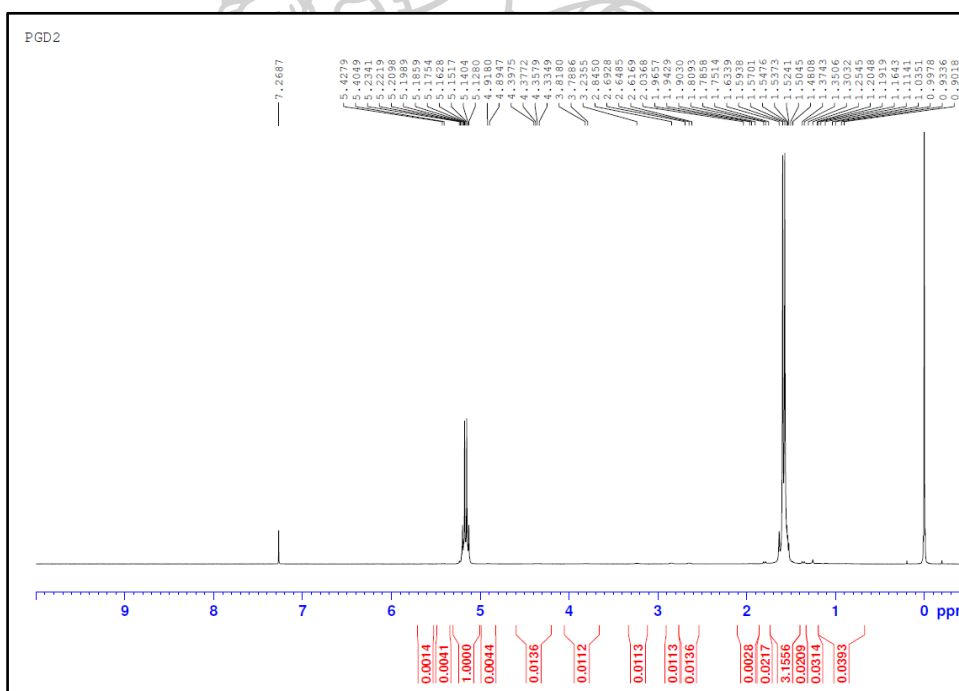
รูปที่ ก.3 สเปกตรัม NMR ของ GMA บริสุทธิ์ในช่วง 0-10 ppm



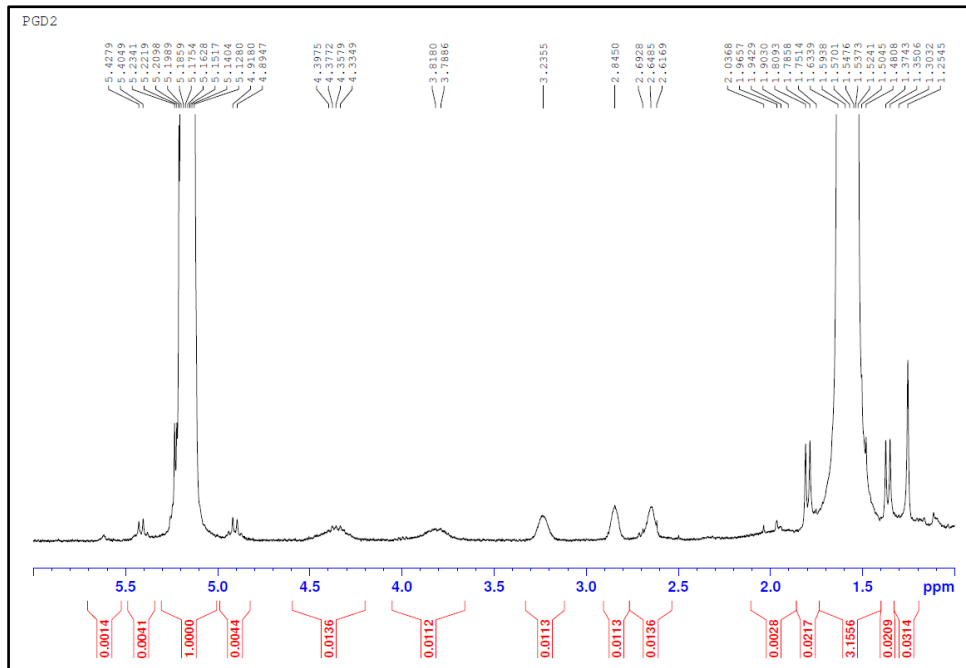
รูปที่ ก.4 สเปกตรัม NMR ของ GMA บริสุทธิ์ในช่วง 1.8-3.4 ppm



รูปที่ ก.5 สเปกตรัม NMR ของ GMA บริสุทธิ์ในช่วง 3.8-6.4 ppm

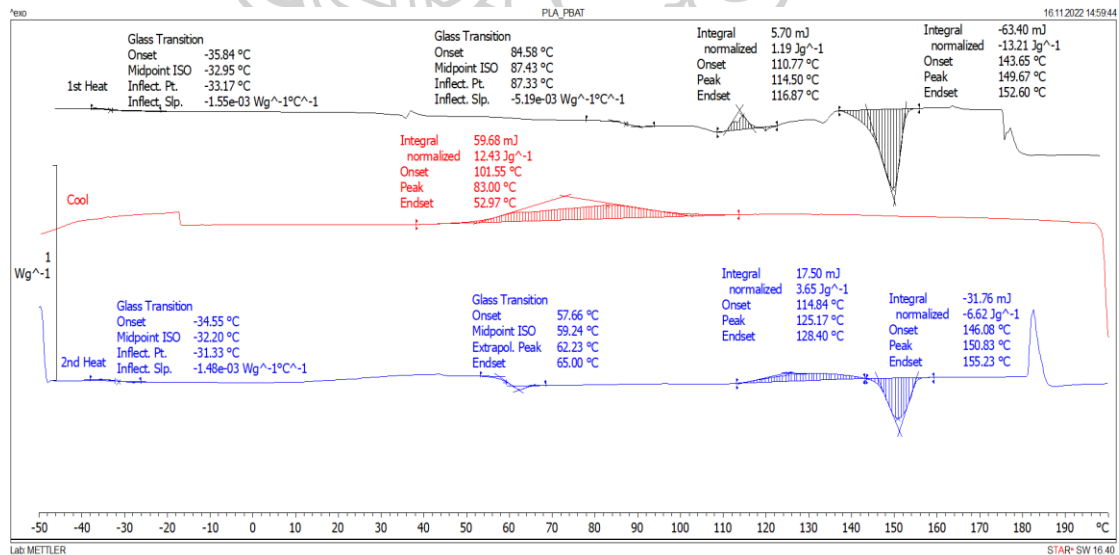


รูปที่ ก.6 สเปกตรัม NMR ของ PLA-g-GMA ในช่วง 0-10 ppm

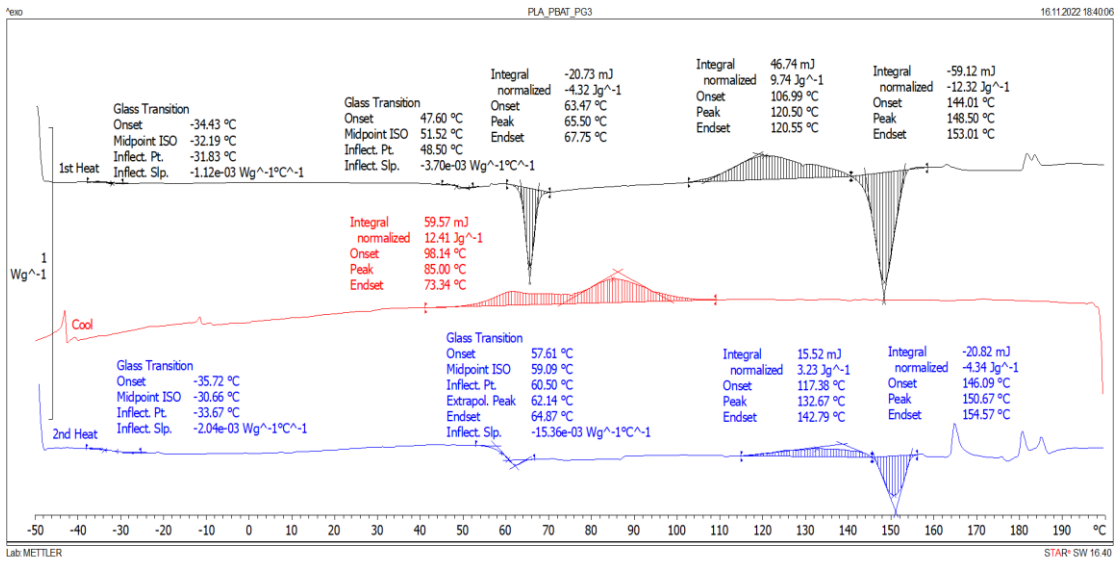


รูปที่ ก.7 สเปกตรัม NMR ของ PLA-g-GMA ในช่วง 1-6 ppm

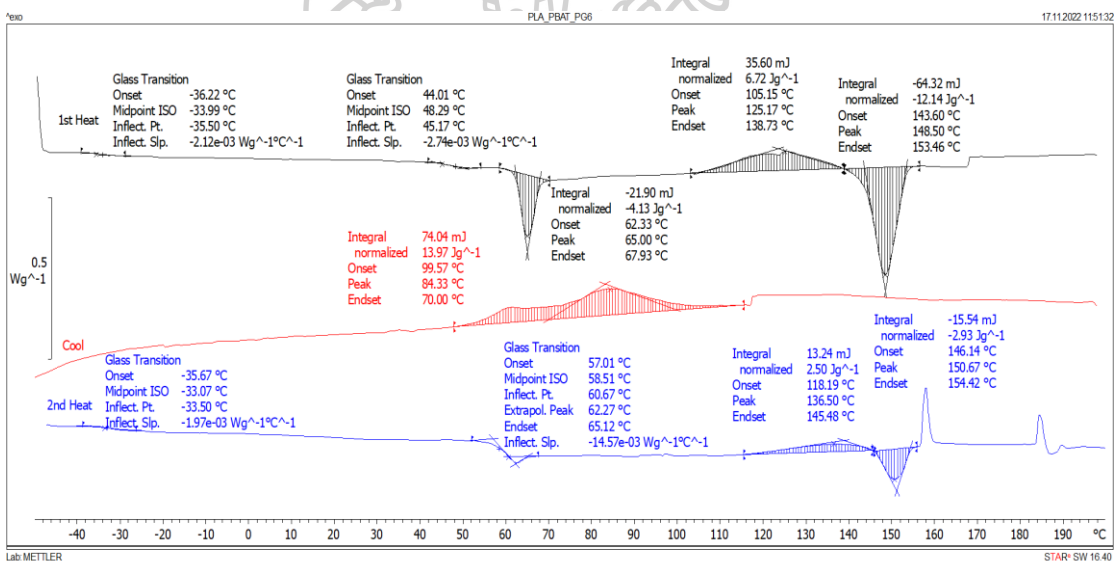
ก.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ PLA/PBAT/PLA-g-GMA ในสัดส่วน PLA-g-GMA ต่าง ๆ



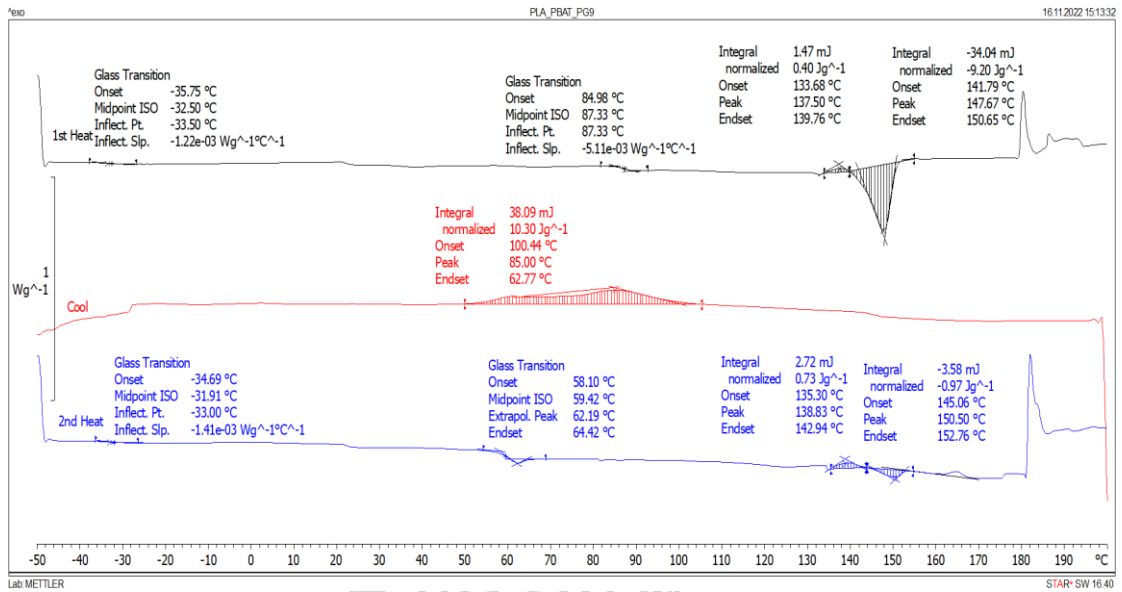
รูปที่ ก.8 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT



รูปที่ ก.9 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม PLA-g-GMA 3 %wt



รูปที่ ก.10 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม PLA-g-GMA 6 %wt

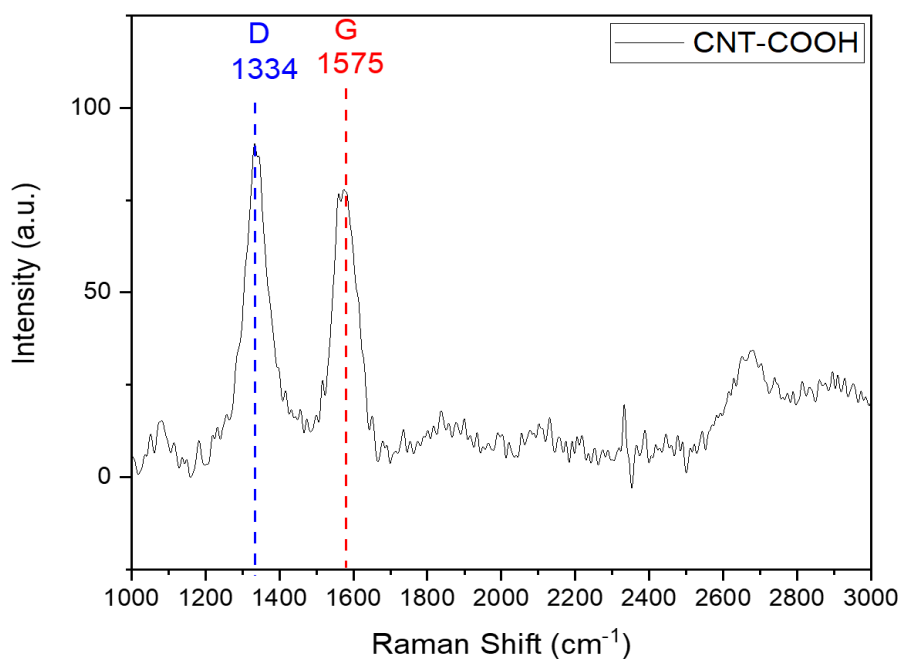


รูปที่ ก.11 DSC thermogram ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม PLA-g-GMA 9 %wt



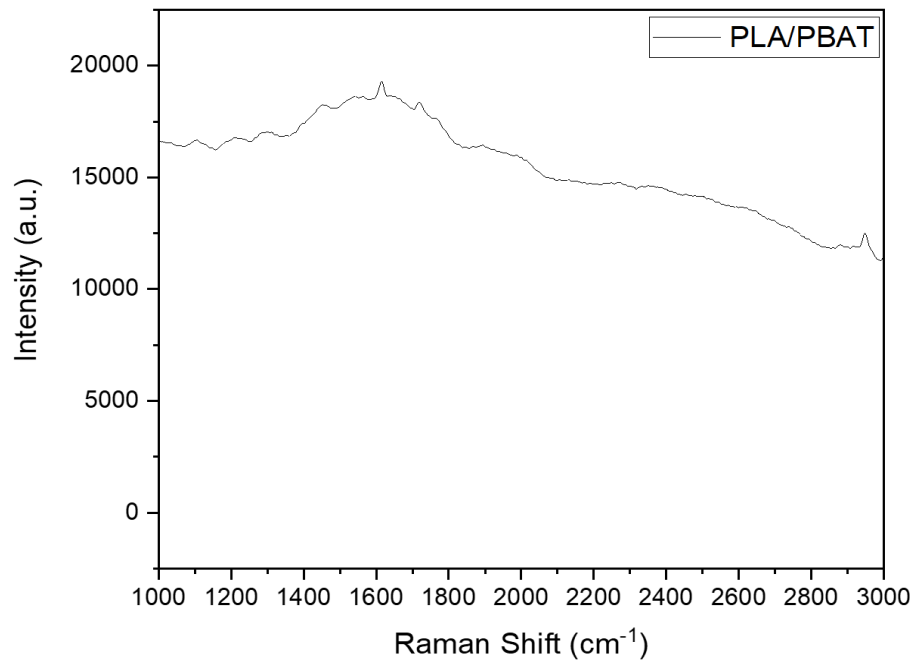
ตอนที่ 2 การศึกษาผลของปริมาณ CNT ที่มีต่อสมบัติ ของคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT/CNT ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ

ก.3 ผลการทดสอบ Raman Spectroscopy ของคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT/CNT ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ

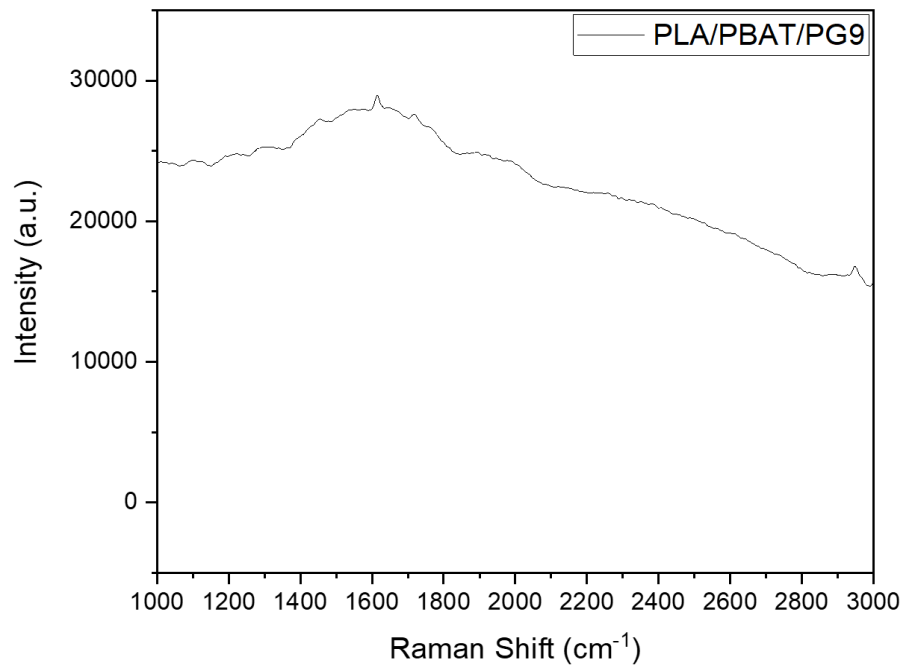


รูปที่ ก.12 สเปกตรัม Raman ของ CNT-COOH บริสุทธิ์

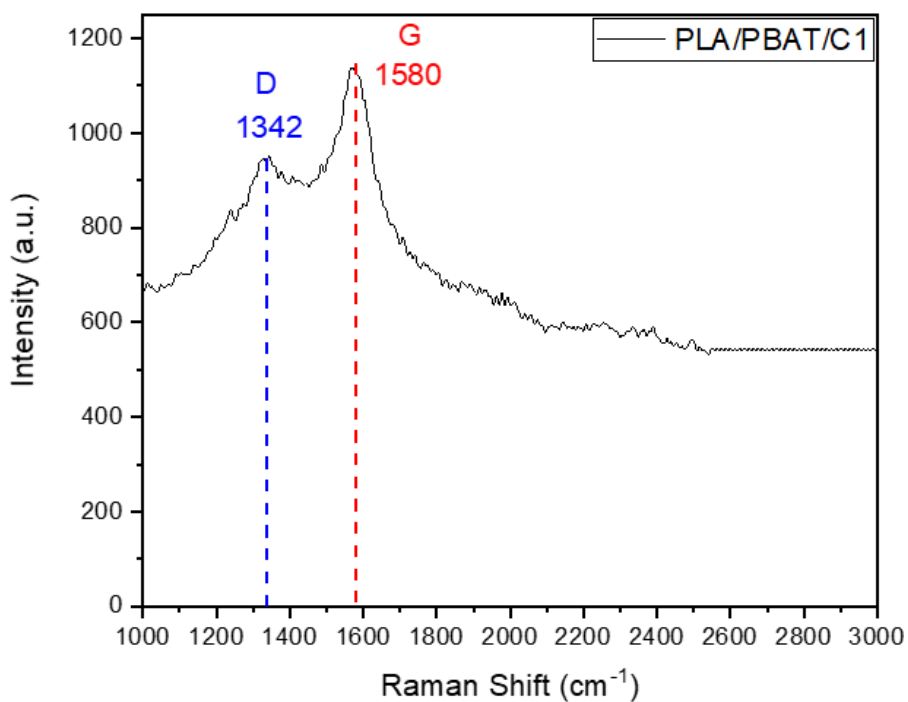




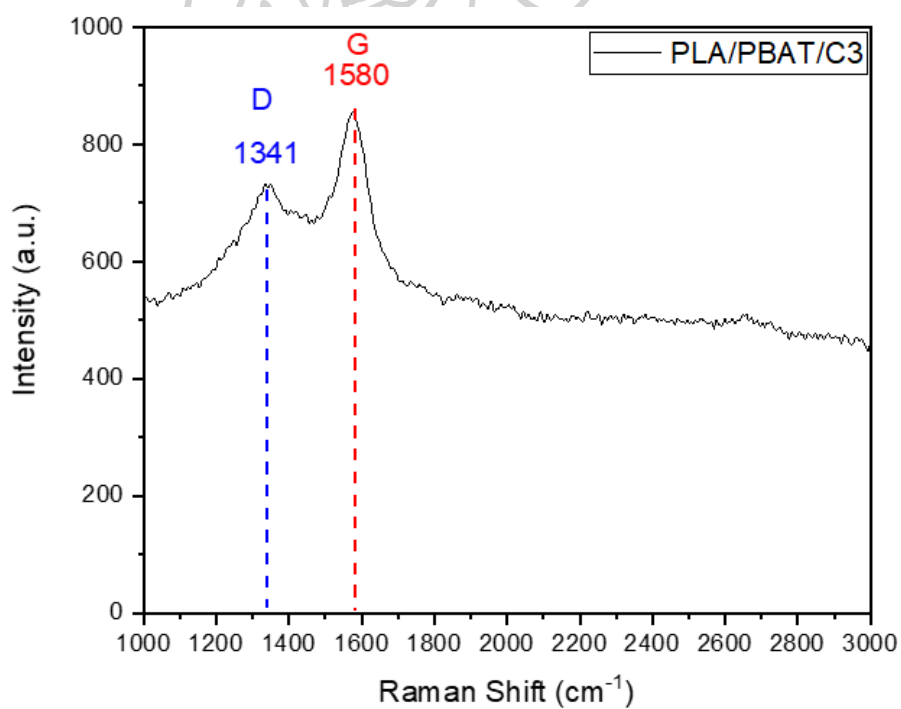
รูปที่ ก.13 สเปกตรัม Raman ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT



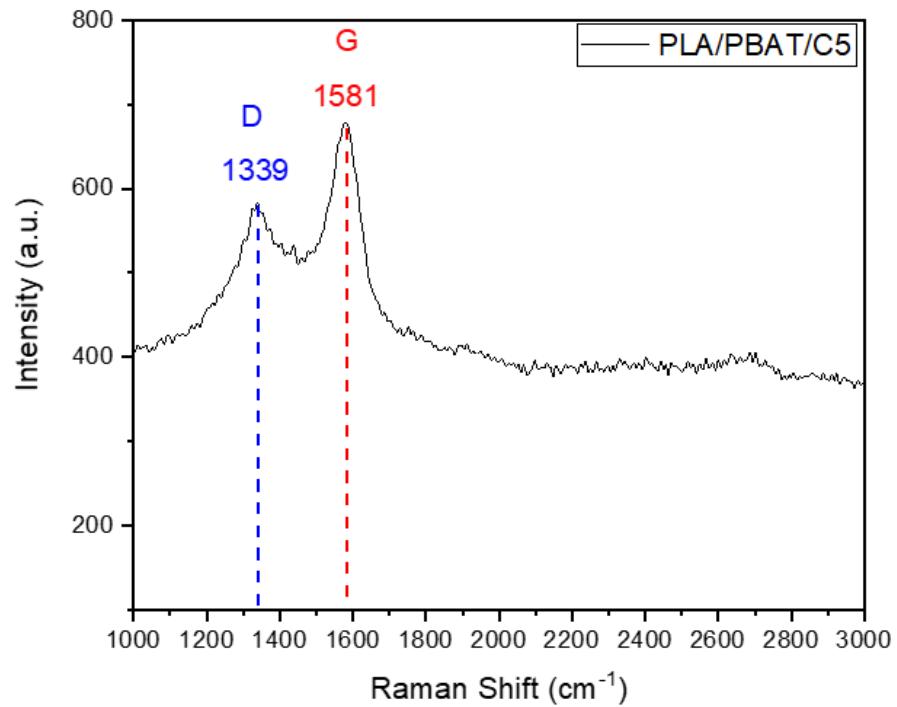
รูปที่ ก.14 สเปกตรัม Raman ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA



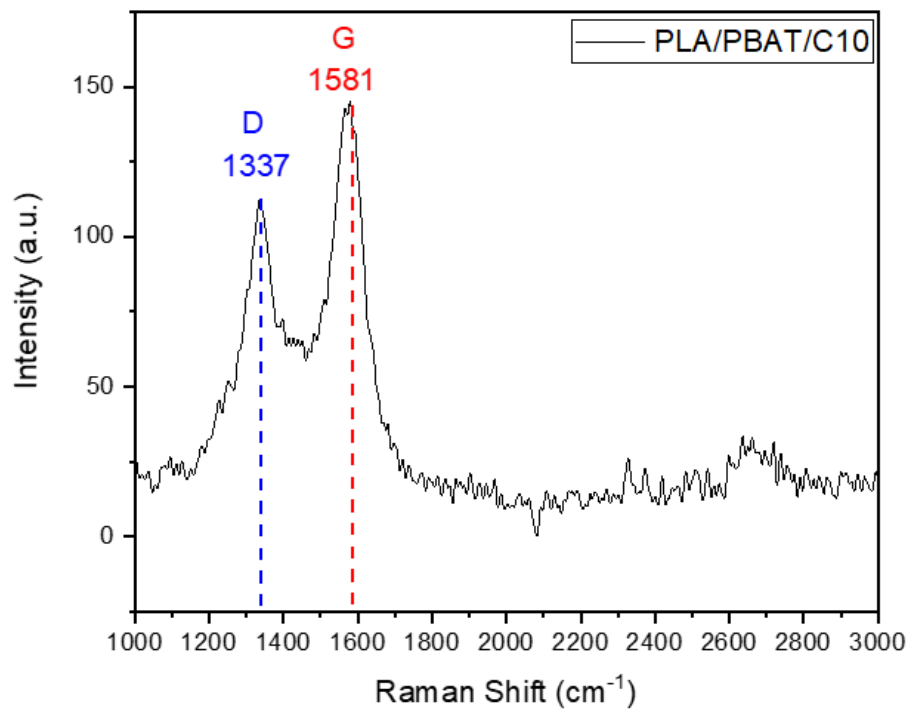
รูปที่ ก.15 สเปกตรัม Raman ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT 1 phr



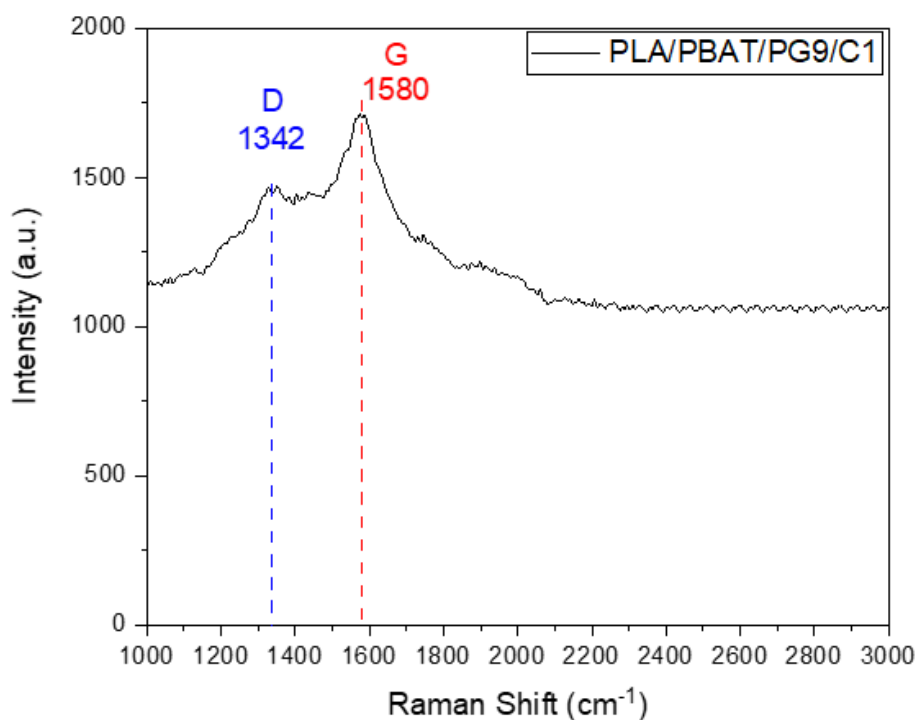
รูปที่ ก.16 สเปกตรัม Raman ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT 3 phr



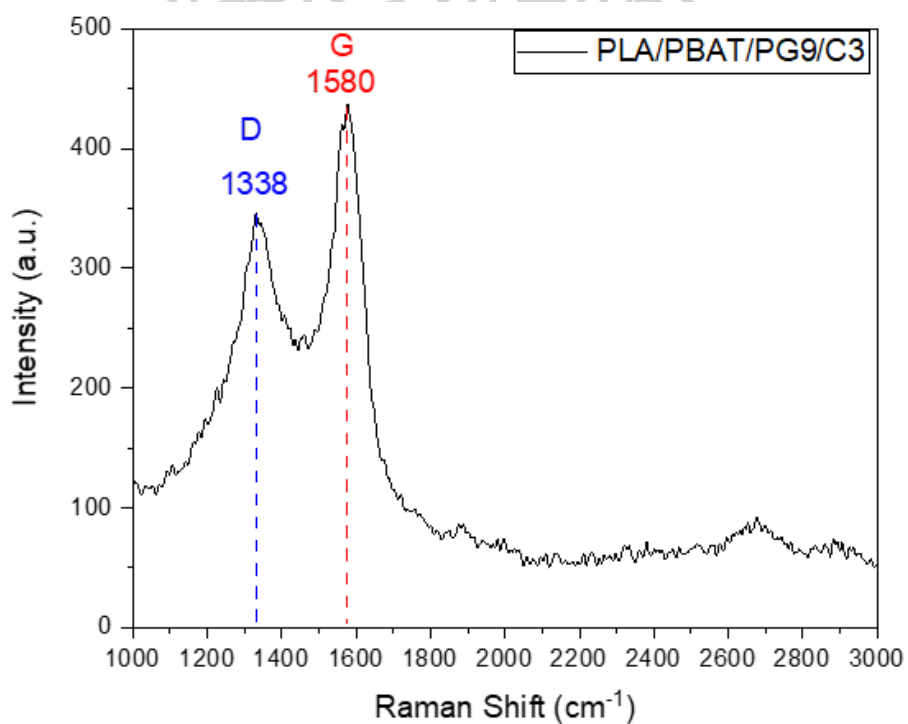
รูปที่ ก.17 สเปกตรัม Raman ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT 5 phr



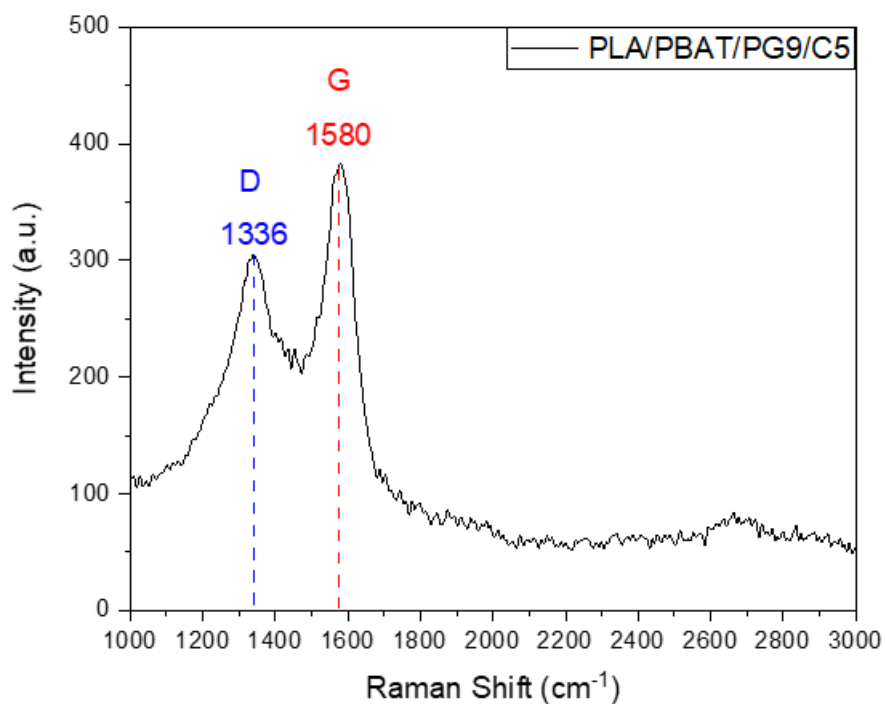
รูปที่ ก.18 สเปกตรัม Raman ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT 10 phr



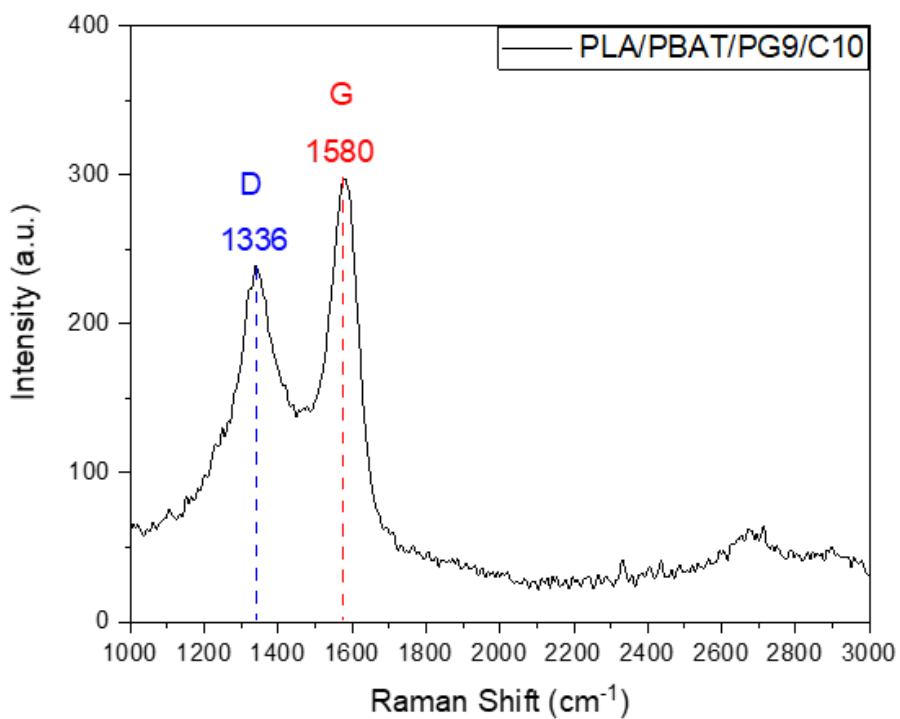
รูปที่ ก.19 สเปกตรัม Raman ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่มีการเติม PLA-g-GMA และ ปริมาณ CNT 1 phr



รูปที่ ก.20 สเปกตรัม Raman ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่มีการเติม PLA-g-GMA และ ปริมาณ CNT 3 phr

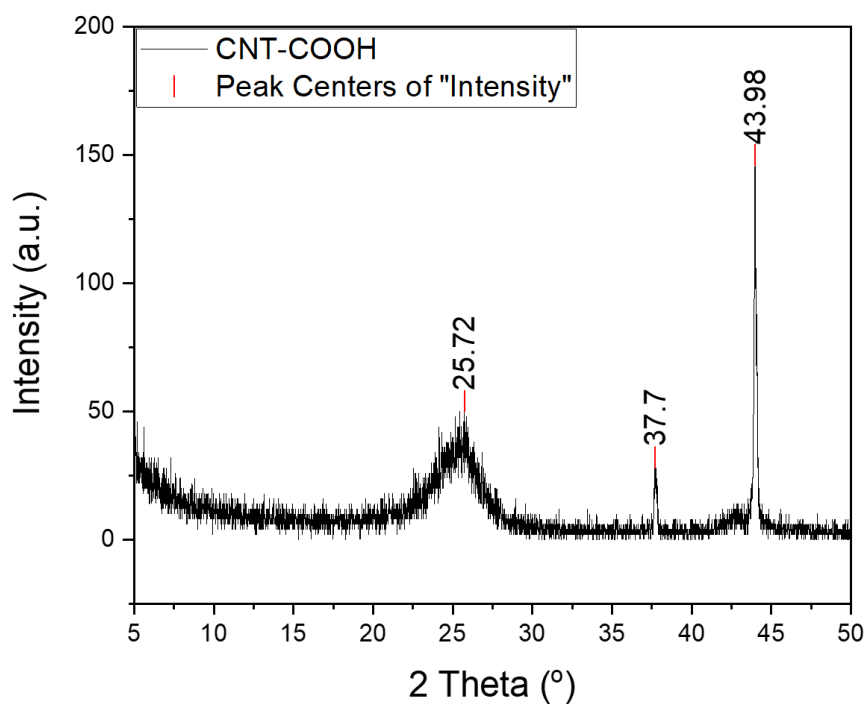


รูปที่ ก.21 สเปกตรัม Raman ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่มีการเติม PLA-g-GMA และ ปริมาณ CNT 5 phr

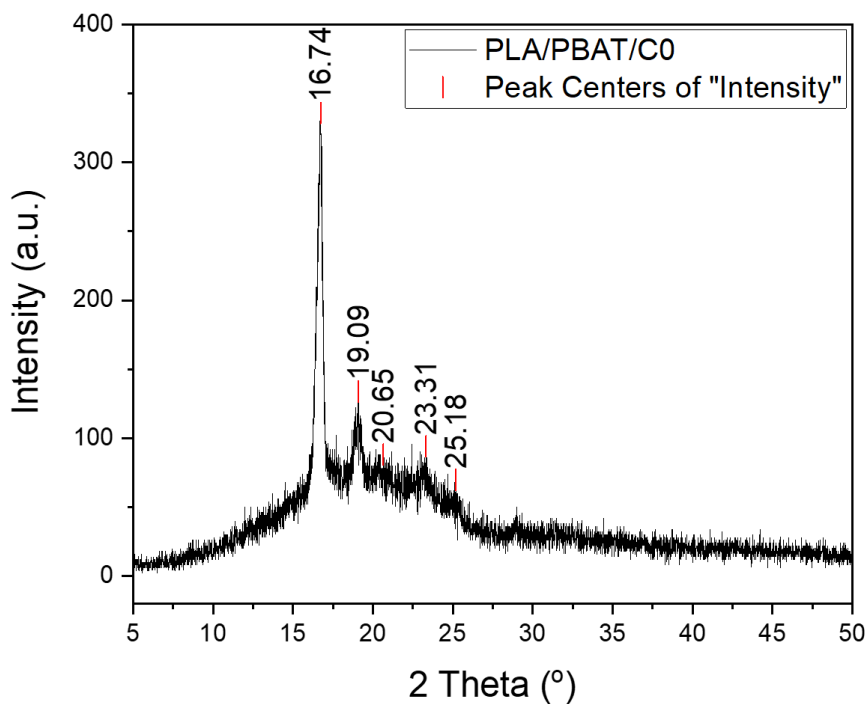


รูปที่ ก.22 สเปกตรัม Raman ของคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่มีการเติม PLA-g-GMA และ ปริมาณ CNT 10 phr

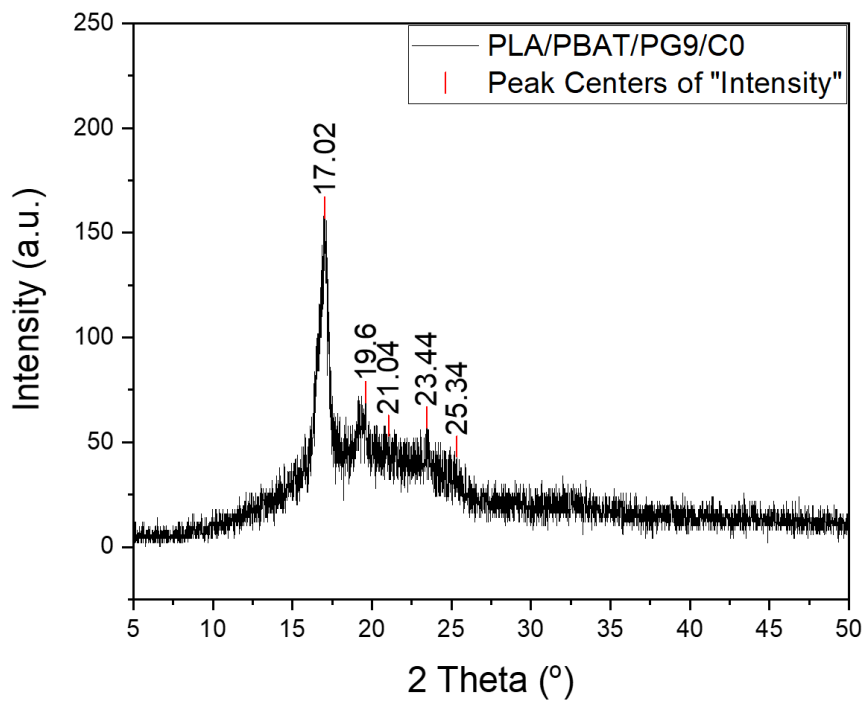
ก.4 ผลการทดลอง X-ray diffractometry ของคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT/CNT ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ



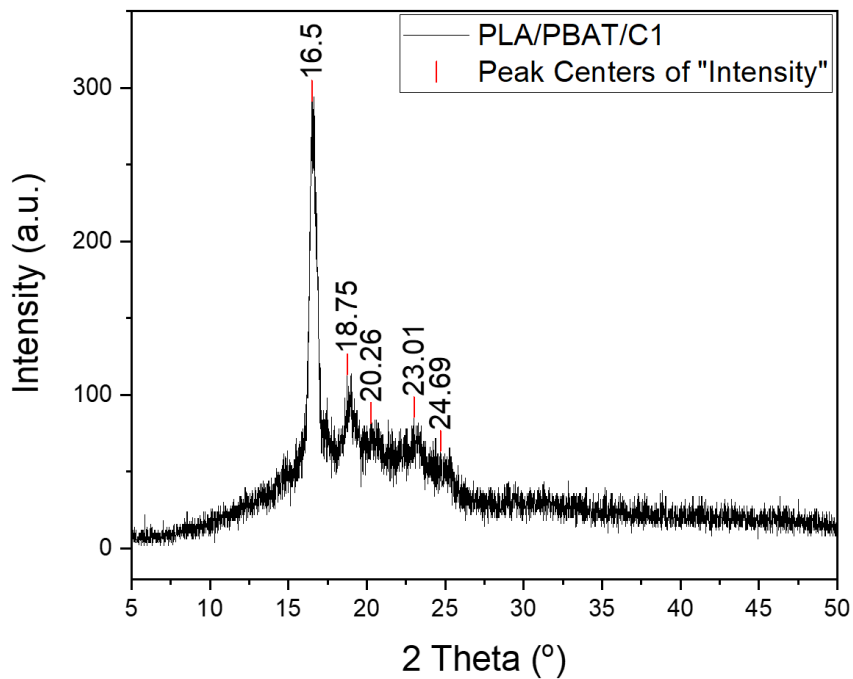
รูปที่ ก.23 XRD pattern ของ CNT บริสุทธิ์



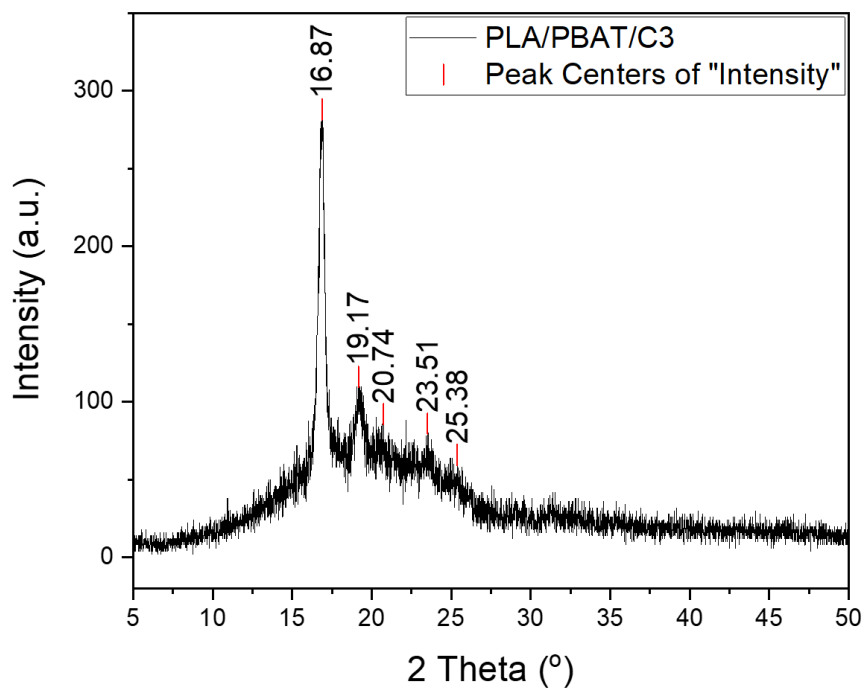
รูปที่ ก.24 XRD pattern ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/C0



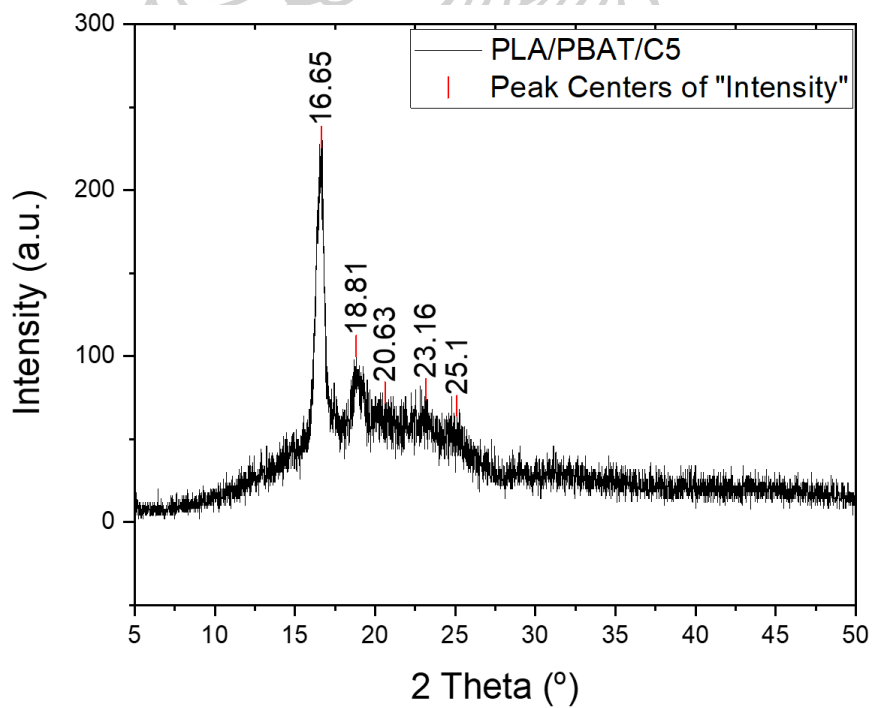
รูปที่ ก.25 XRD pattern ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA



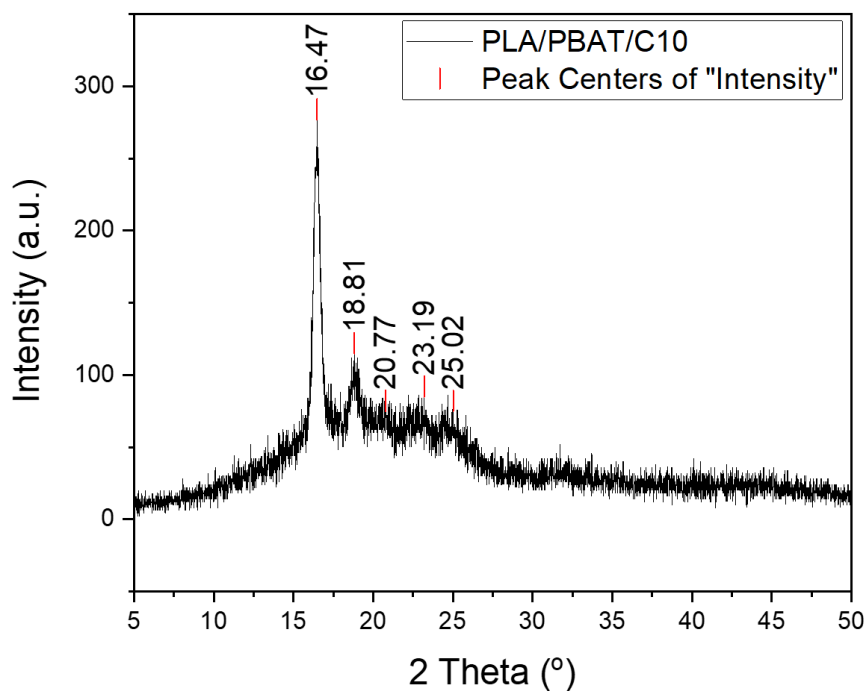
รูปที่ ก.26 XRD pattern ของคอมพอสิต PLA/PBAT/C1



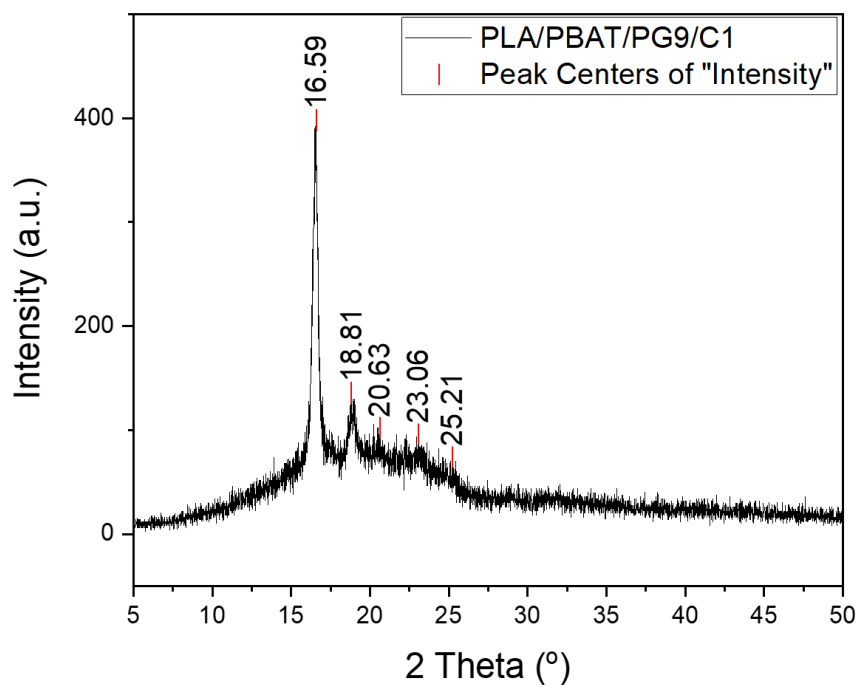
รูปที่ ก.27 XRD pattern ของคอมพอสิต PLA/PBAT/C3



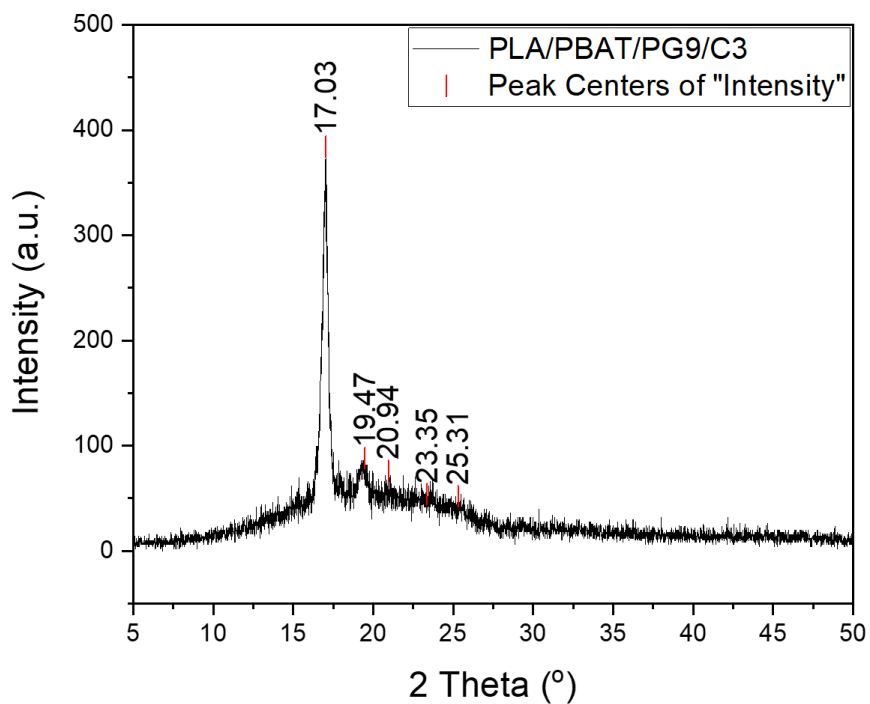
รูปที่ ก.28 XRD pattern ของคอมพอสิต PLA/PBAT/C5



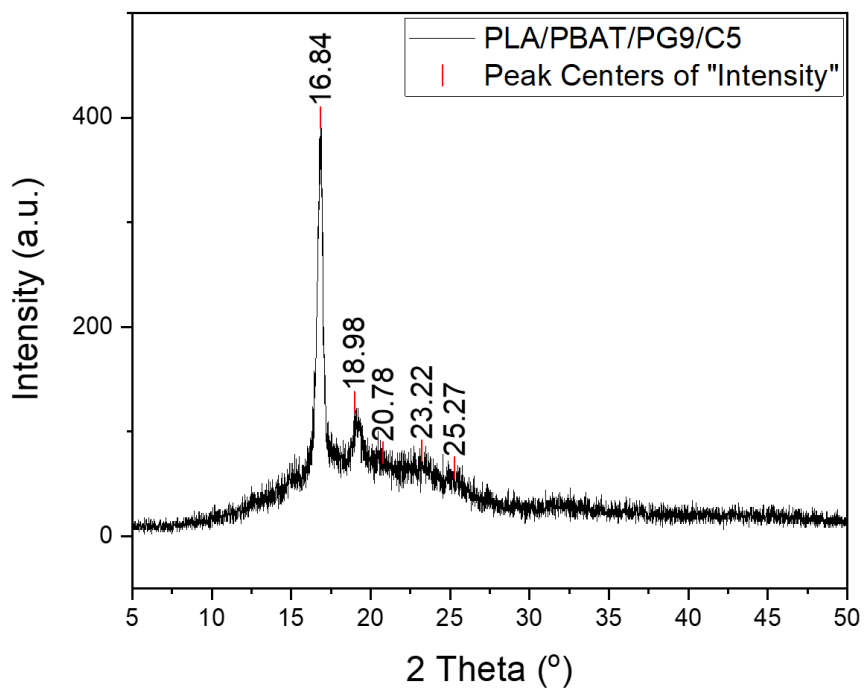
รูปที่ ก.29 XRD pattern ของคอมพอสิต PLA/PBAT/C10



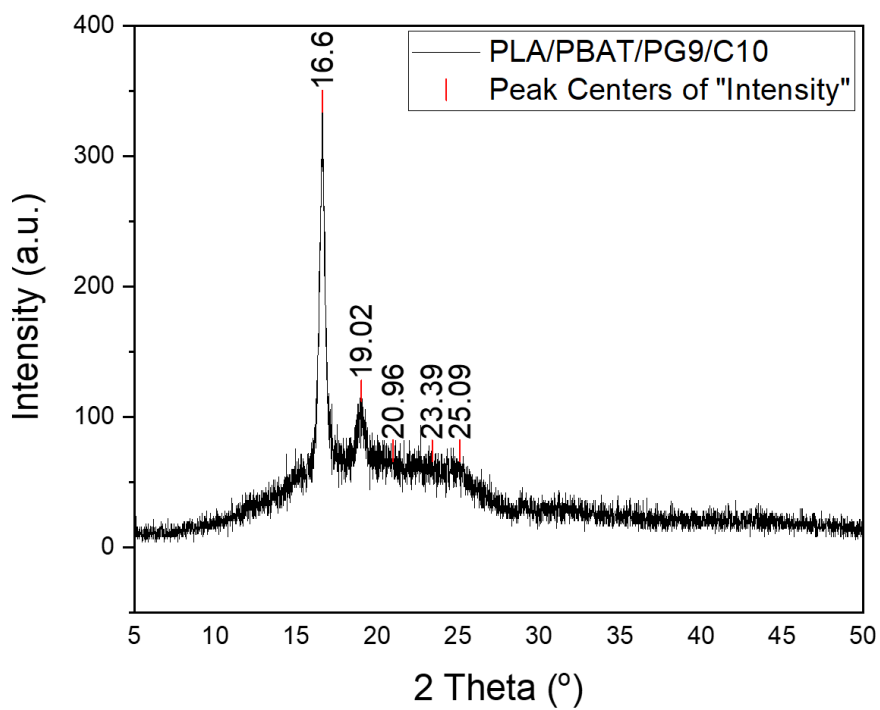
รูปที่ ก.30 XRD pattern ของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C1



รูปที่ ๓.๓๑ XRD pattern ของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C3



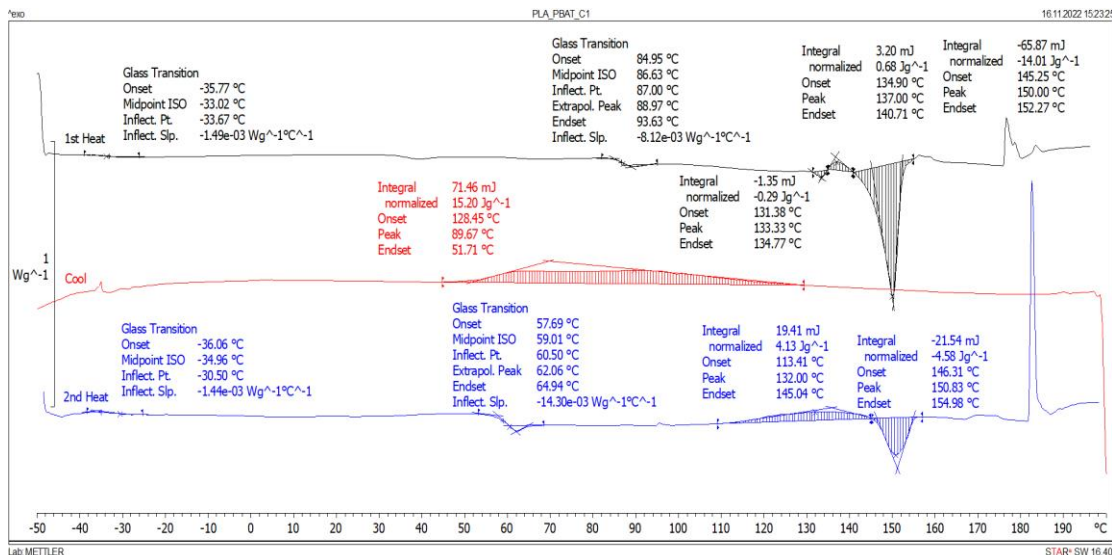
รูปที่ ๓.๓๒ XRD pattern ของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C5



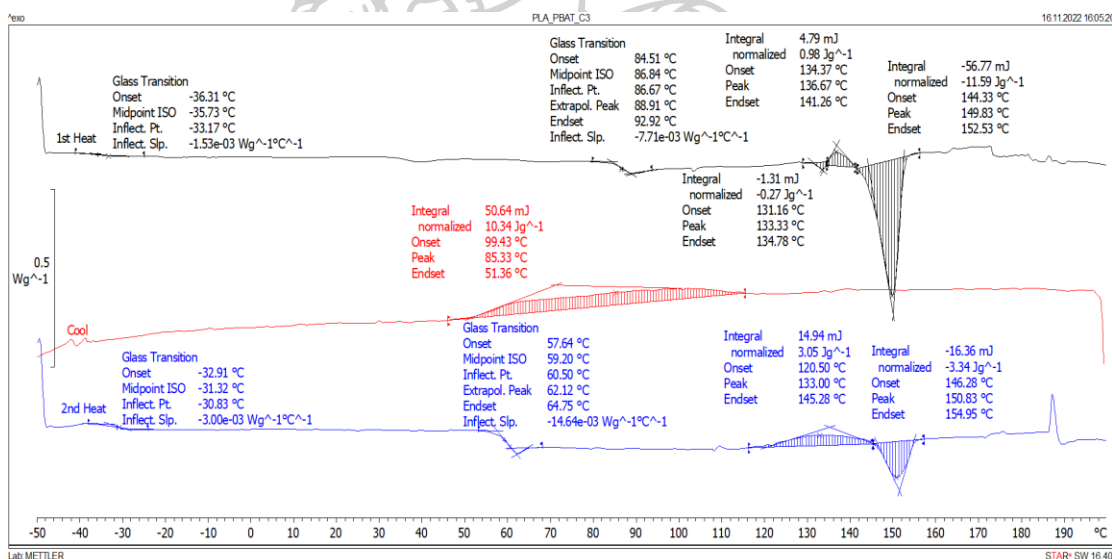
รูปที่ ก.33 XRD pattern ของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C10



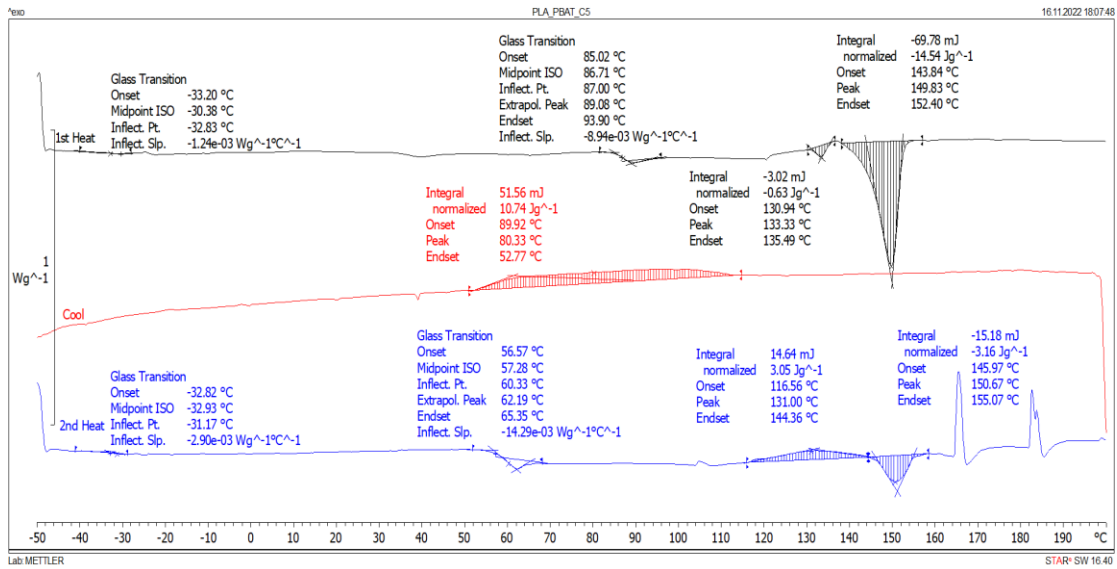
ก.5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT/CNT ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ



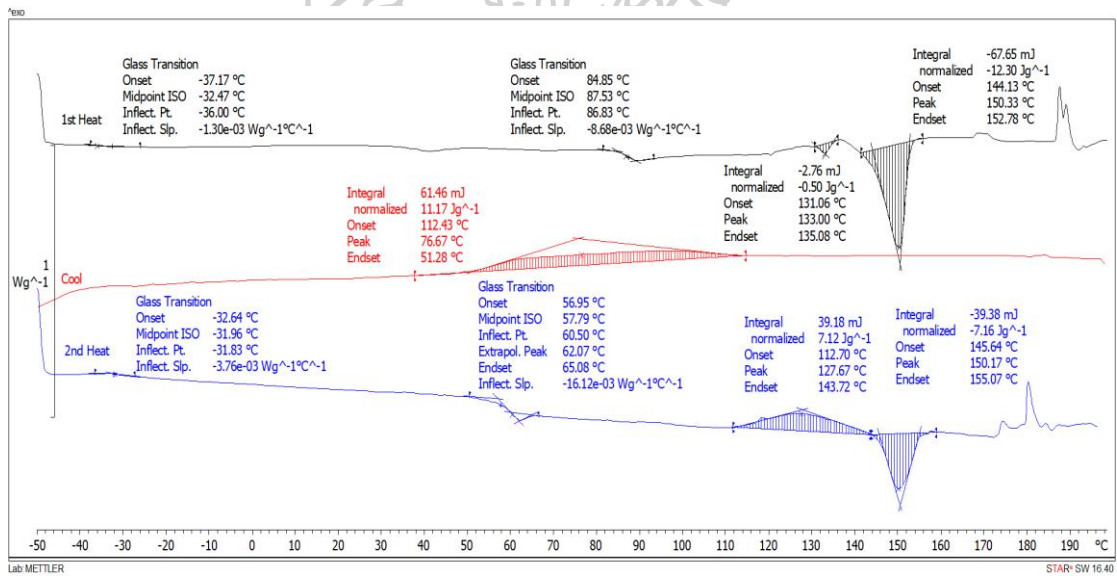
รูปที่ ก.34 DSC thermogram ของคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT/C1



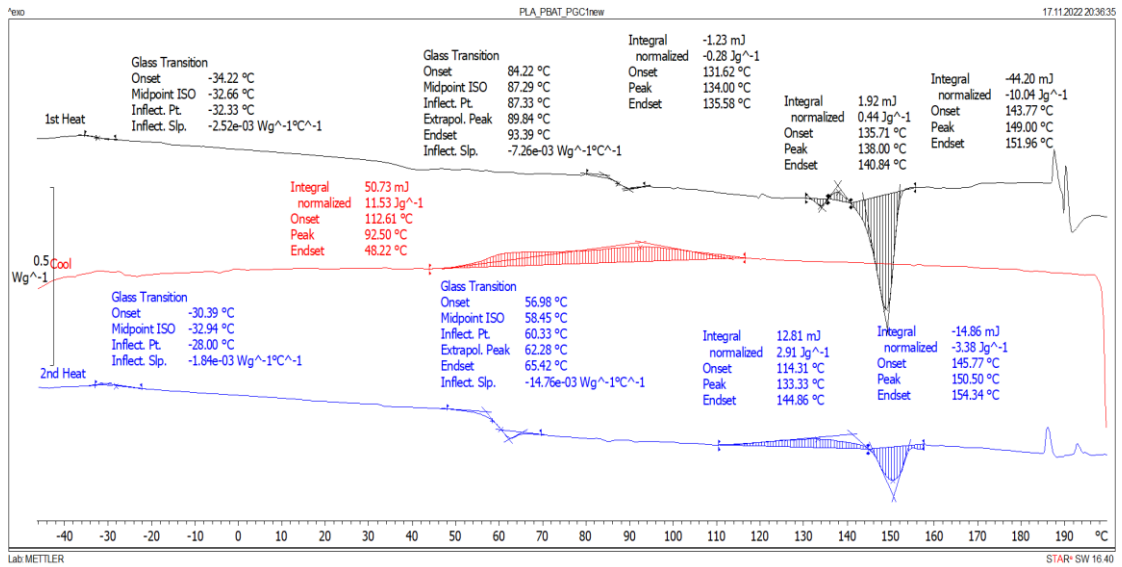
รูปที่ ก.35 DSC thermogram ของคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT/C3



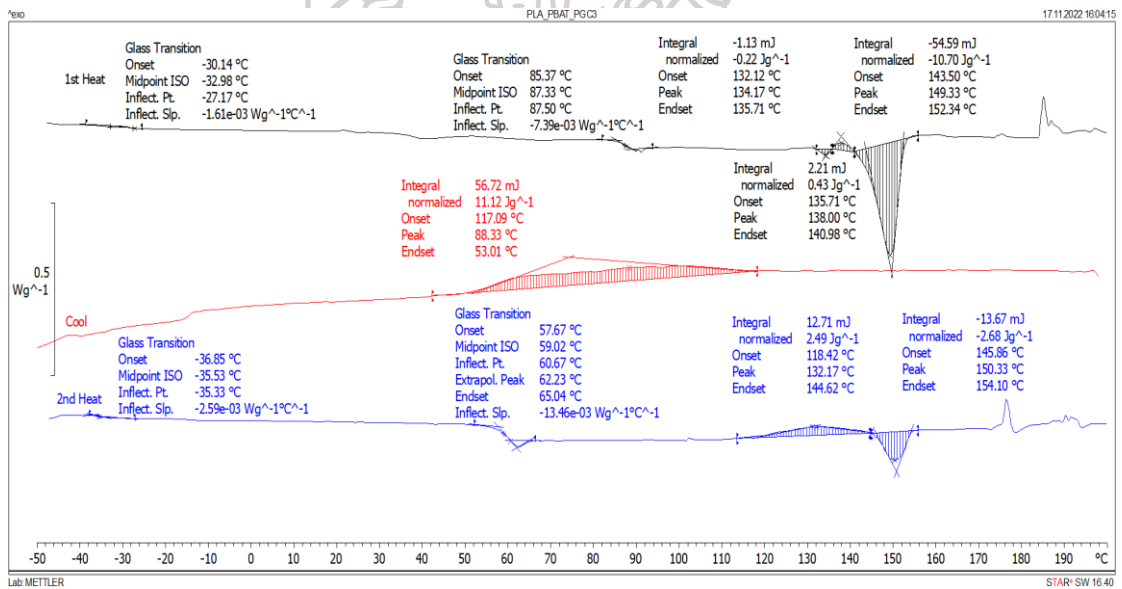
รูปที่ ก.36 DSC thermogram ของคอมพอสิต PLA/PBAT/C5



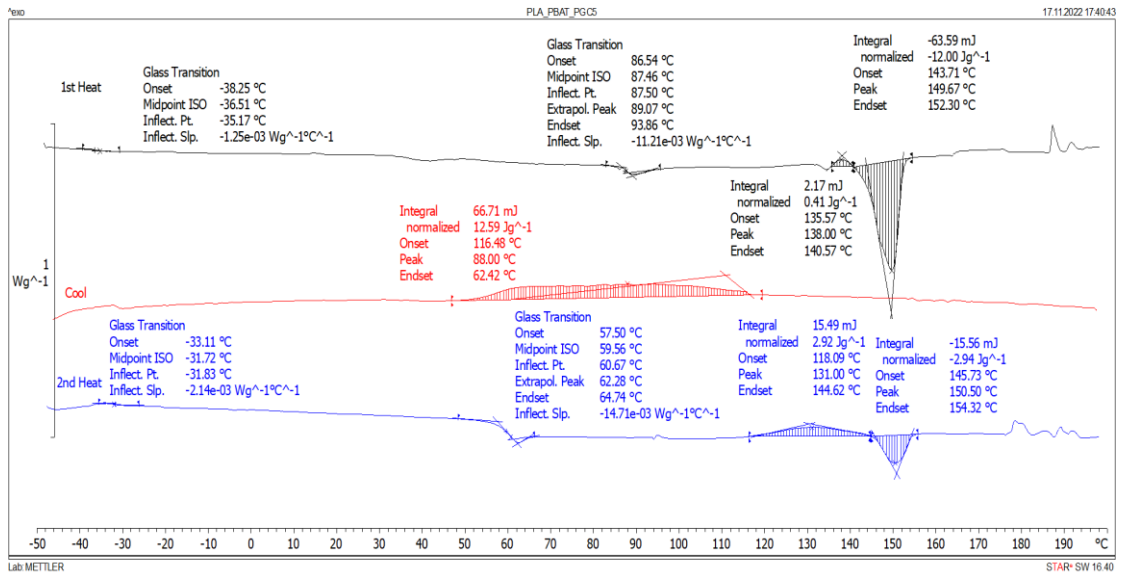
รูปที่ ก.37 DSC thermogram ของคอมพอสิต PLA/PBAT/C10



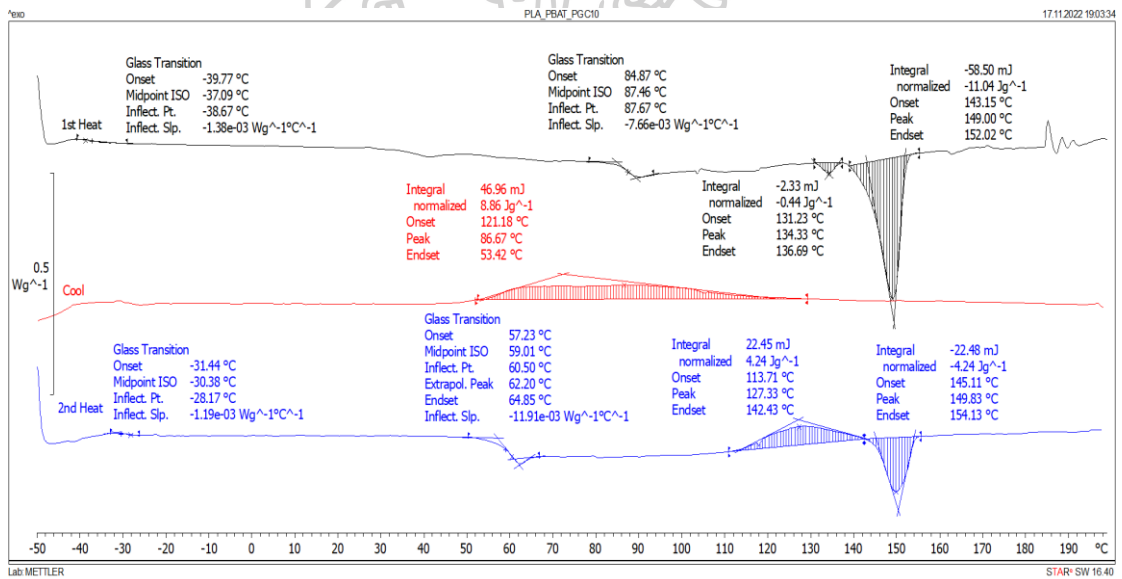
รูปที่ ก.38 DSC thermogram ของคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT/PG9/C1



รูปที่ ก.39 DSC thermogram ของคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT/PG9/C3

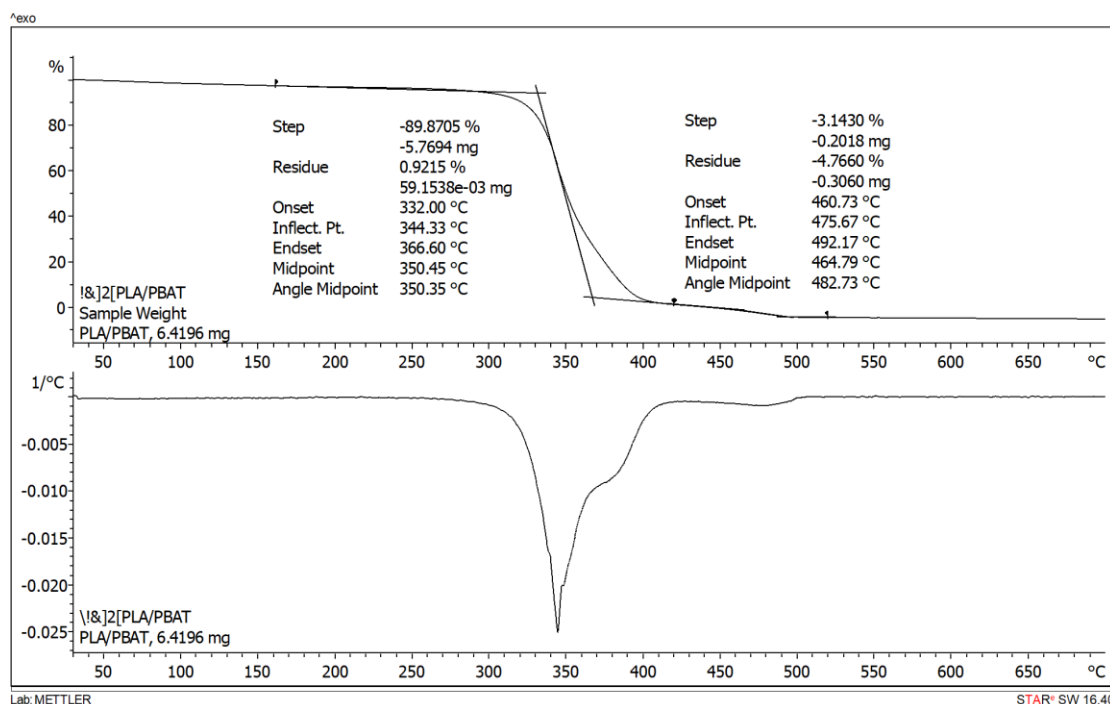


รูปที่ ก.40 DSC thermogram ของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C5

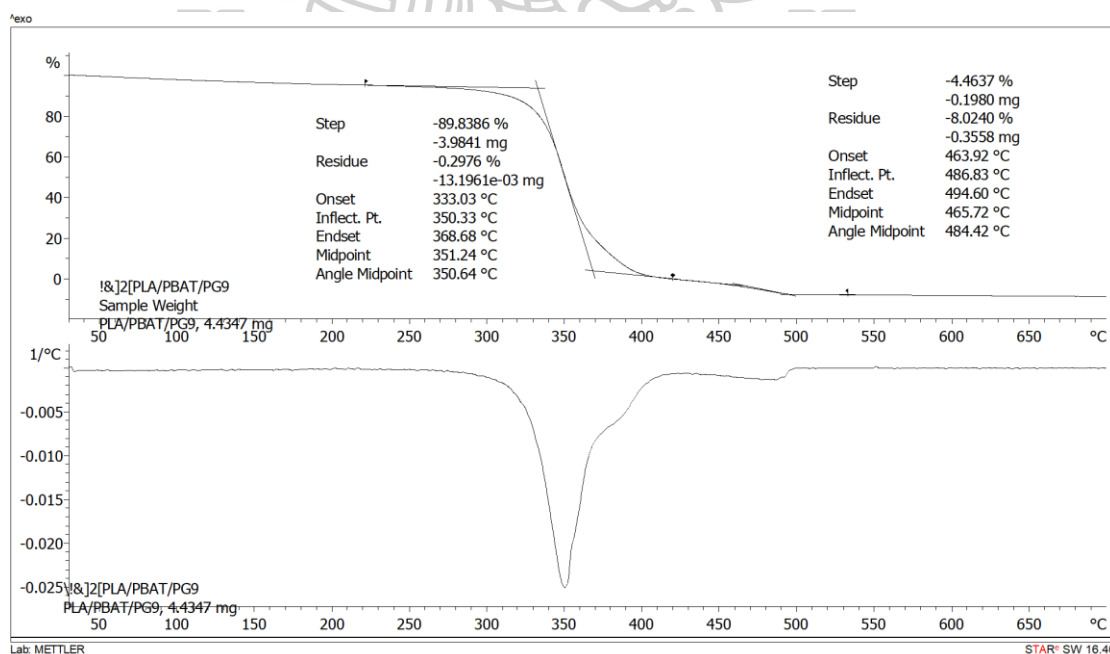


รูปที่ ก.41 DSC thermogram ของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C10

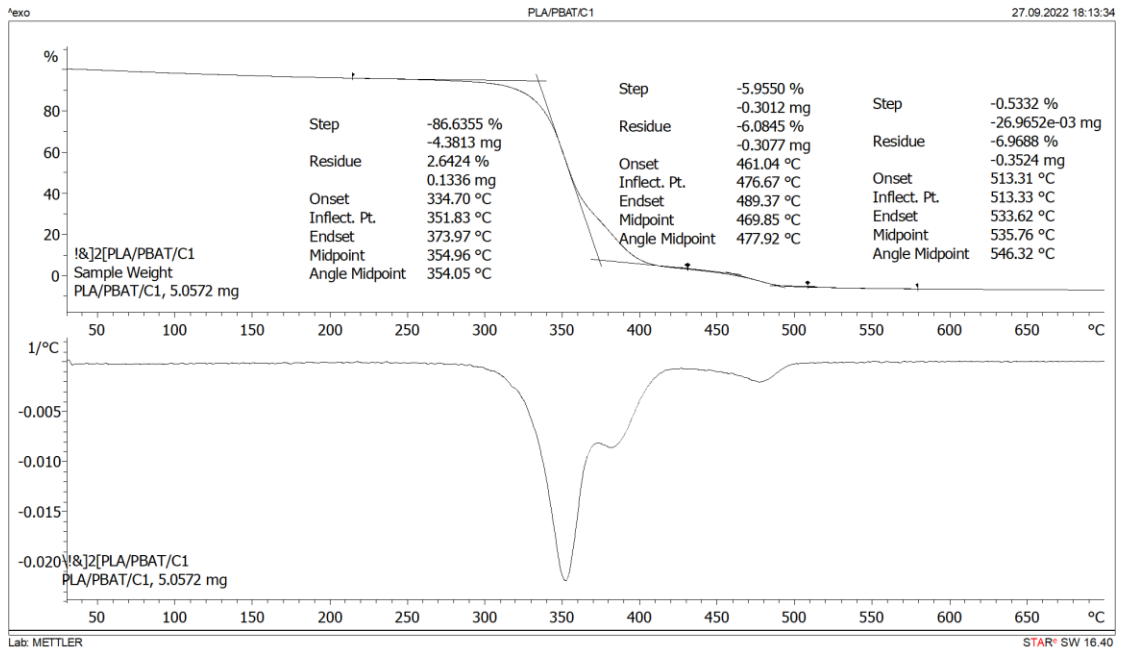
ก.7 ผลการทดลองเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอลิิต PLA/PBAT/CNT ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ



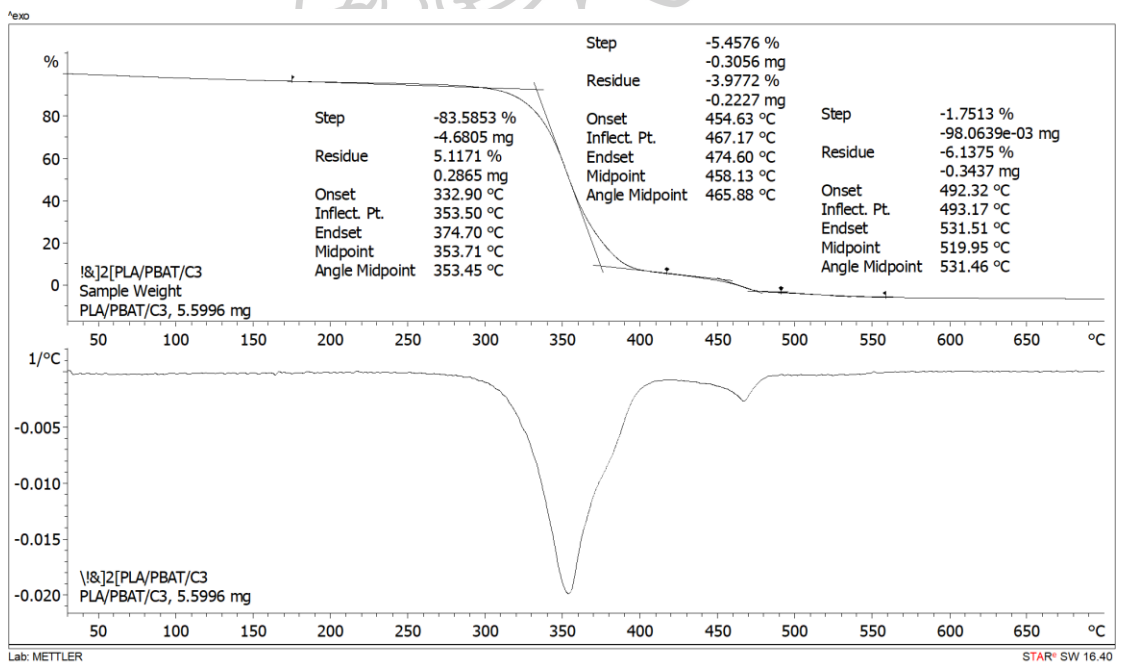
รูปที่ ก.42 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT



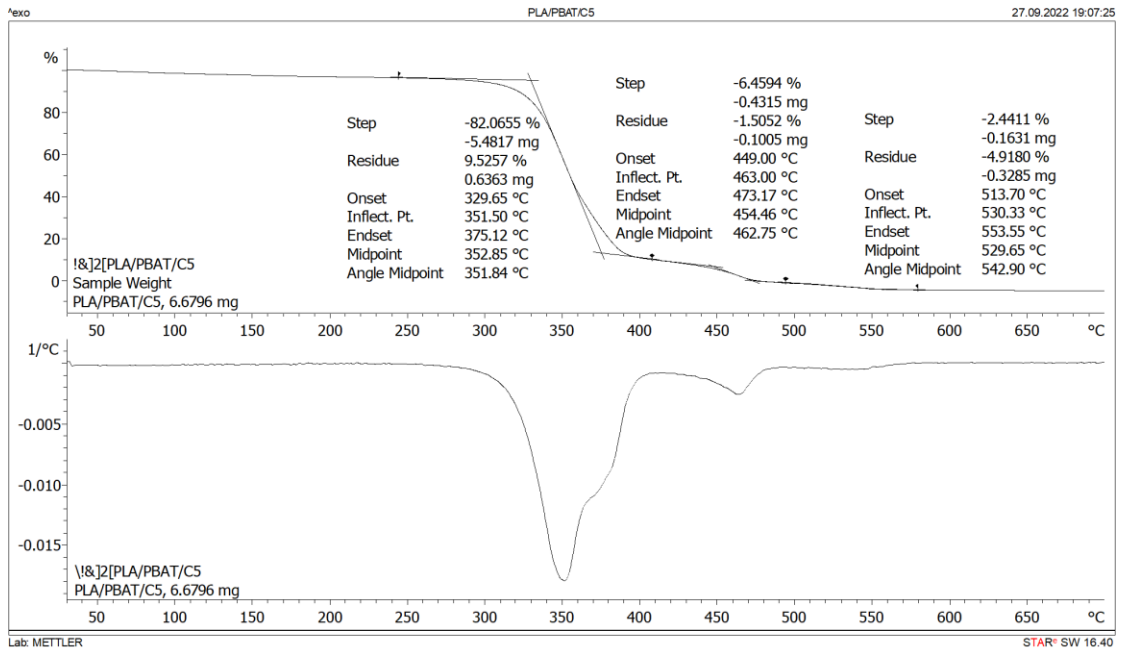
รูปที่ ก.43 เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/PLA-g-GMA



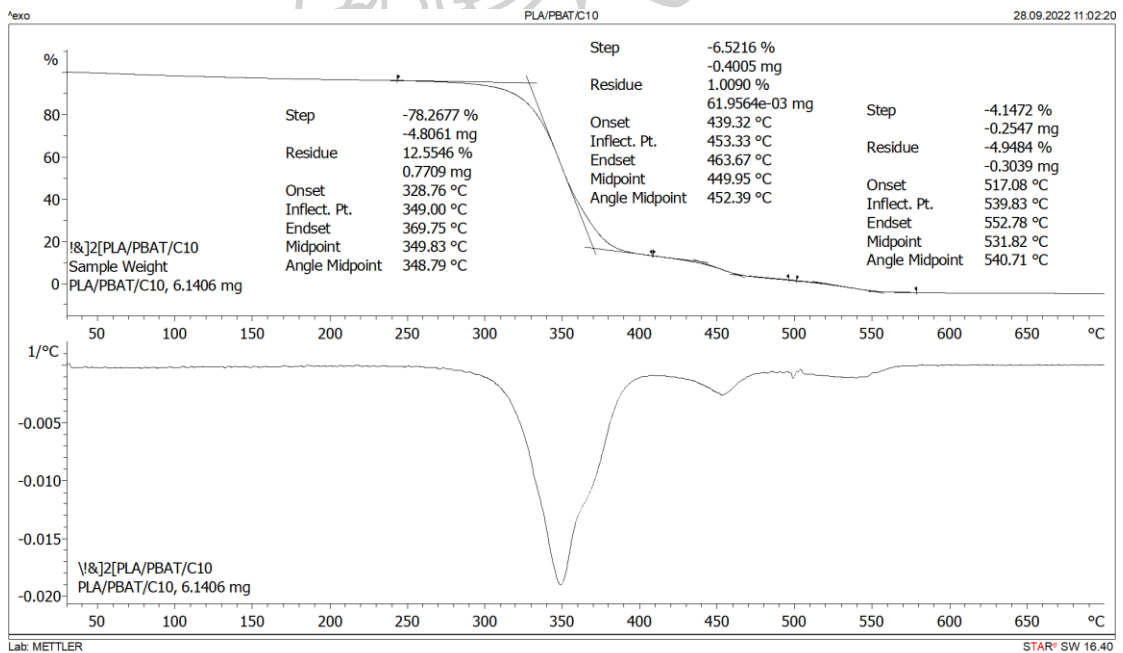
รูปที่ ก.44 เกลียวกราฟทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/C1



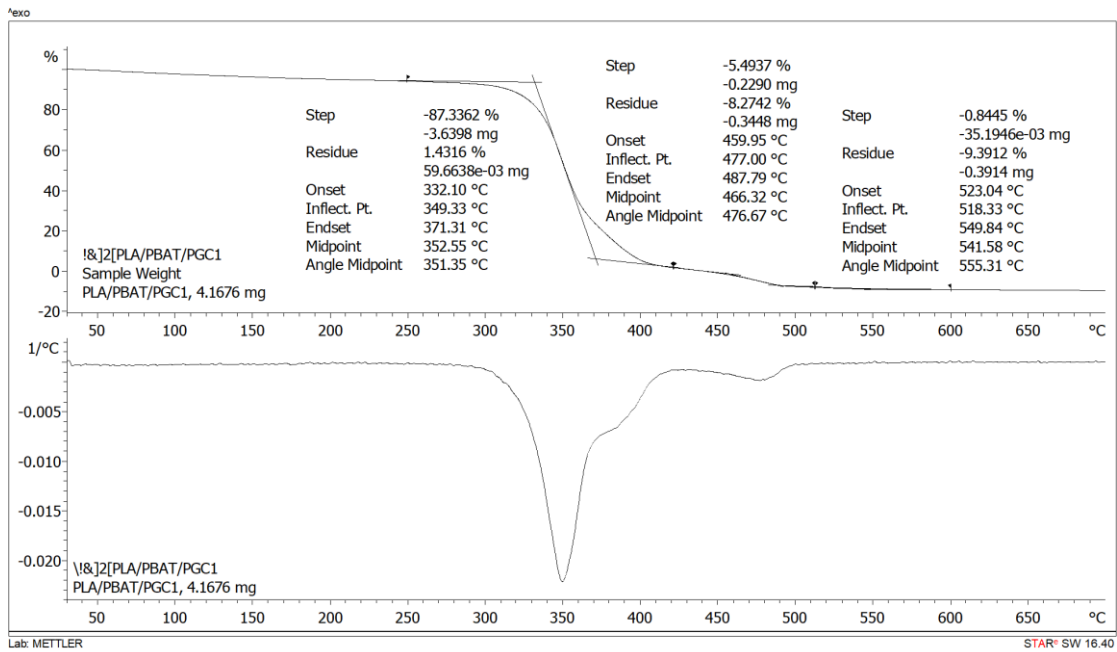
รูปที่ ก.45 เกลียวกราฟทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/C3



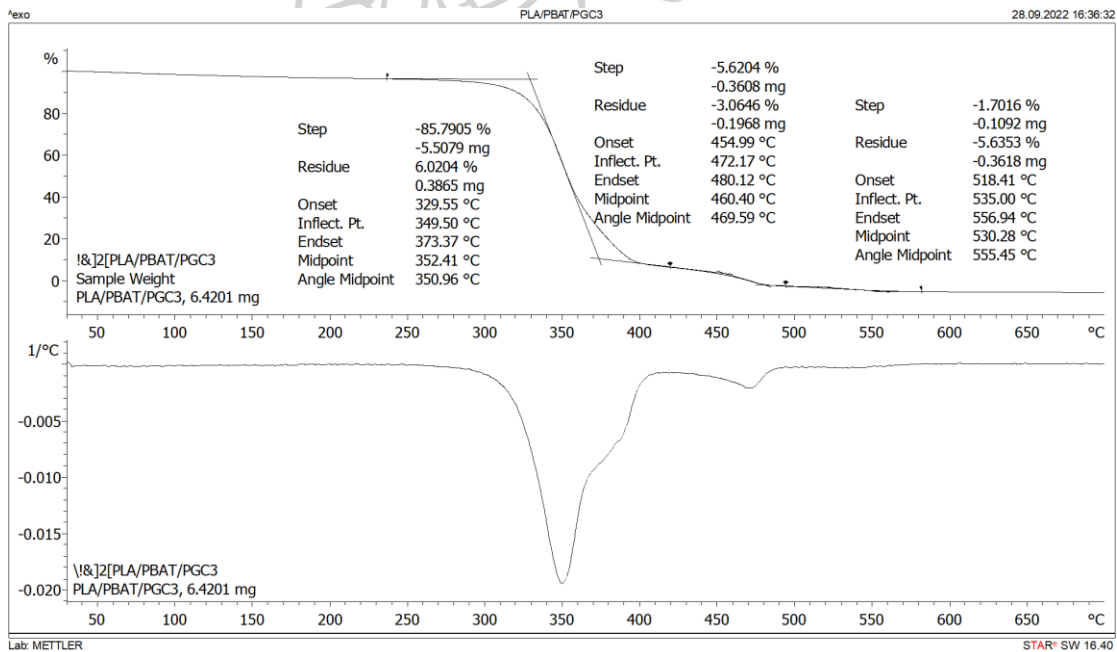
รูปที่ ก.46 เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/C5



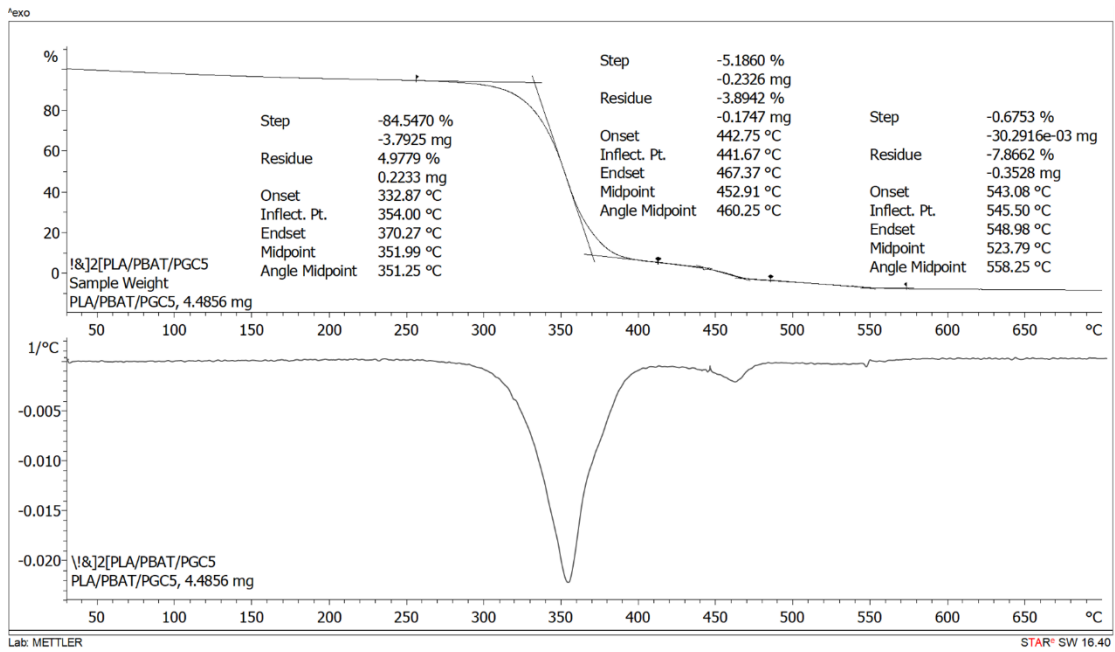
รูปที่ ก.47 เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/C10



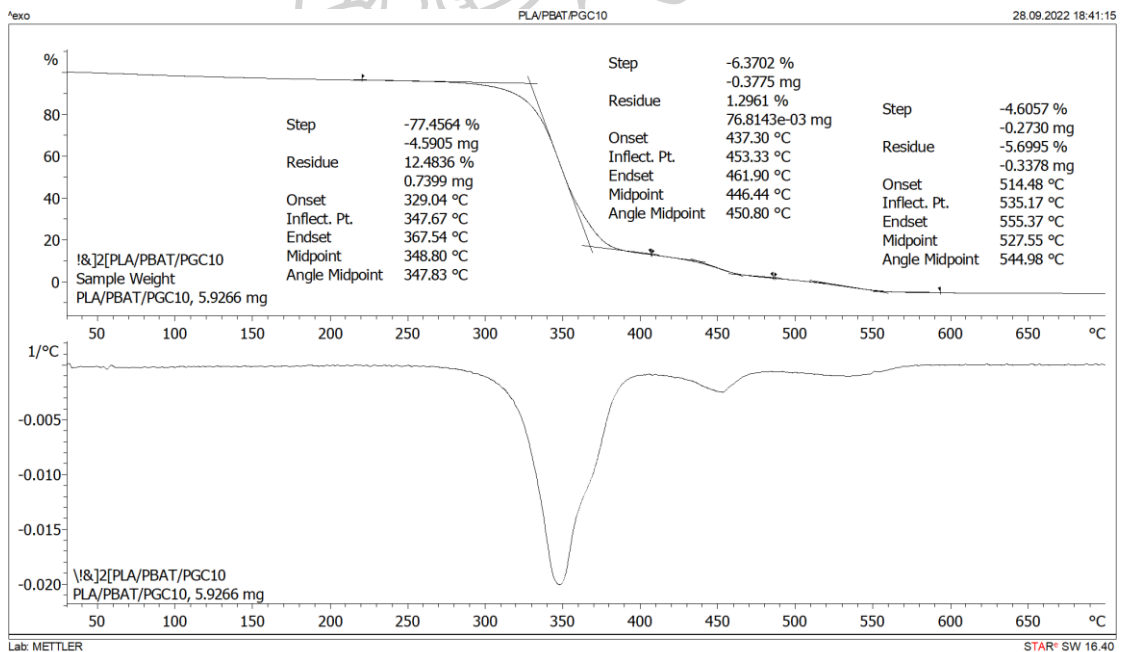
รูปที่ ก.48 เกลียวกราฟทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C1



รูปที่ ก.49 เกลียวกราฟทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C3



รูปที่ ก.50 เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C5



รูปที่ ก.51 เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต PLA/PBAT/PG9/C10

ตารางที่ ก.1 เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT/CNT ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ

Sample	Td ₁ (°C)	Td ₂ (°C)	Td ₃ (°C)	Td ₄ (°C)
PLA/PBAT/C0	344.33	382.50	475.67	-
PLA/PBAT/C1	351.83	383.33	476.67	531.50
PLA/PBAT/C3	353.50	381.67	467.17	532.20
PLA/PBAT/C5	351.50	382.33	463.00	533.33
PLA/PBAT/C10	349.00	379.26	453.33	535.82
PLA/PBAT/PG9/C0	350.33	385.15	486.83	-
PLA/PBAT/PG9/C1	349.33	392.23	477.00	531.50
PLA/PBAT/PG9/C3	349.50	382.14	472.17	535.00
PLA/PBAT/PG9/C5	354.00	384.67	462.91	535.33
PLA/PBAT/PG9/C10	347.67	376.64	453.33	535.17



ก.8 ผลการทดลองสมบัติความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตรของคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT/CNT ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ

ตารางที่ ก.2 ความหนาเฉลี่ย ความต้านทานไฟฟ้า และสภาพความต้านทานไฟฟ้าของคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT/CNT ที่มีการเติมและไม่เติม PLA-g-GMA ที่ปริมาณ CNT ต่าง ๆ

Sample	Thickness (mm)	Volume resistance (Ohm)	Volume resistivity (Ohm-cm)
PLA/PBAT/C0	0.25	1.22×10^{10}	9.69×10^{12}
	0.22	2.41×10^{10}	2.14×10^{13}
	0.24	2.29×10^{10}	1.90×10^{13}
	0.27	5.08×10^{10}	3.69×10^{13}
	0.25	3.74×10^{10}	2.89×10^{13}
PLA/PBAT/C1	0.22	3.61×10^{18}	3.27×10^{11}
	0.28	1.38×10^8	9.75×10^{10}
	0.25	1.70×10^{19}	1.31×10^{12}
	0.25	6.90×10^{10}	5.49×10^{13}
	0.24	2.30×10^{10}	1.91×10^{13}
PLA/PBAT/C3	0.25	1.32×10^8	1.03×10^{11}
	0.26	1.79×10^{10}	1.33×10^{13}
	0.24	5.69×10^7	4.59×10^{10}
	0.35	5.83×10^7	3.29×10^{10}
	0.27	$< 1.00 \times 10^7$	$< 7.26 \times 10^9$
PLA/PBAT/C5	0.27	$< 1.00 \times 10^7$	$< 7.25 \times 10^9$
	0.28	$< 1.00 \times 10^7$	$< 6.91 \times 10^9$
	0.27	$< 1.00 \times 10^7$	$< 7.25 \times 10^9$
	0.29	$< 1.00 \times 10^7$	$< 6.83 \times 10^9$
	0.26	1.21×10^7	9.14×10^9
PLA/PBAT/C10	0.28	$< 1.00 \times 10^7$	$< 6.91 \times 10^9$
	0.31	$< 1.00 \times 10^7$	$< 6.32 \times 10^9$
	0.31	$< 1.00 \times 10^7$	$< 6.25 \times 10^9$

	0.35	$< 1.00 \times 10^7$	$< 5.65 \times 10^9$
	0.31	$< 1.00 \times 10^7$	$< 6.32 \times 10^9$
PLA/PBAT/PG9/C0	0.26	4.03×10^{10}	3.07×10^{13}
	0.26	4.42×10^{10}	3.29×10^{13}
	0.28	2.99×10^{10}	2.07×10^{13}
	0.27	1.36×10^{11}	9.87×10^{13}
	0.25	1.80×10^{10}	1.40×10^{13}
PLA/PBAT/PG9/C1	0.25	1.05×10^9	8.26×10^{12}
	0.27	1.09×10^{11}	8.06×10^{13}
	0.25	8.70×10^{11}	6.73×10^{13}
	0.27	5.80×10^8	4.26×10^{11}
	0.3	2.31×10^8	1.49×10^{11}
PLA/PBAT/PG9/C3	0.29	7.42×10^8	4.96×10^{11}
	0.31	4.65×10^8	2.94×10^{11}
	0.32	3.58×10^7	2.17×10^{10}
	0.34	5.52×10^7	3.18×10^{10}
	0.29	$< 1.00 \times 10^7$	$< 6.75 \times 10^9$
PLA/PBAT/PG9/C5	0.29	$< 1.00 \times 10^7$	$< 6.68 \times 10^9$
	0.31	$< 1.00 \times 10^7$	$< 6.32 \times 10^9$
	0.27	$< 1.00 \times 10^7$	$< 7.17 \times 10^9$
	0.36	$< 1.00 \times 10^7$	$< 5.39 \times 10^9$
	0.35	$< 1.00 \times 10^7$	$< 5.60 \times 10^9$
PLA/PBAT/PG9/C10	0.33	$< 1.00 \times 10^7$	$< 5.93 \times 10^9$
	0.34	$< 1.00 \times 10^7$	$< 5.70 \times 10^9$
	0.35	$< 1.00 \times 10^7$	$< 5.54 \times 10^9$
	0.38	$< 1.00 \times 10^7$	$< 5.15 \times 10^9$
	0.32	$< 1.00 \times 10^7$	$< 6.12 \times 10^9$



ข.1 การคำนวณเปอร์เซ็นต์การกราฟของ GMA บนสายโซ่ PLA

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การกราฟติดของ GMA บนสายโซ่ PLA สามารถหาได้จากสมการ

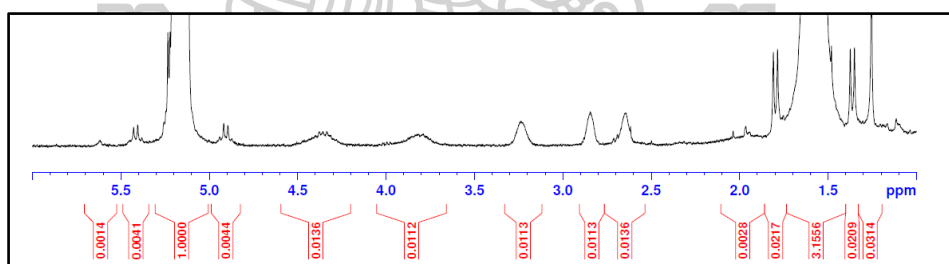
$$\%Grafting = \frac{\text{relative area of characteristic of PLA-g-GMA}}{\text{relative area of characteristic of PLA}} \times 100 \quad (\text{ข.1})$$

โดยพื้นที่ใต้กราฟสัมพัทธ์ของ PLA-g-GMA และ PLA สามารถหาได้จากสัดส่วนระหว่างพื้นที่ใต้กราฟและจำนวนโปรตอน

ตัวอย่างการคำนวณ

ในการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การกราฟต์จะทำการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟของ PLA-g-GMA ที่ตำแหน่ง 1.6 ppm (พีกเอกลักษณ์ของ PLA) และ 1.8 ppm (พีกเอกลักษณ์ของ PLA-g-GMA) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.156 และ 0.0217 ตามลำดับ แล้วนำค่าที่ได้แทนลงในสมการที่ ข.1

$$\%Grafting = \frac{0.0217 / 2}{3.156 / 3} \times 100\% = 1.03 \%$$



รูปที่ ข.1 รูปประกอบการคำนวณเปอร์เซ็นต์การกราฟต์ของ GMA บนสายโซ่ PLA

ข.2 การคำนวณหาปริมาณผลึกของ PLA จากการทดสอบ DSC

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{CC}}{w\Delta H_m^0} \times 100 \quad (\text{ข. 2})$$

2)

โดย ΔH_m คือ ปริมาณความร้อนของการหลอมเหลวตัวอย่าง (J/g)

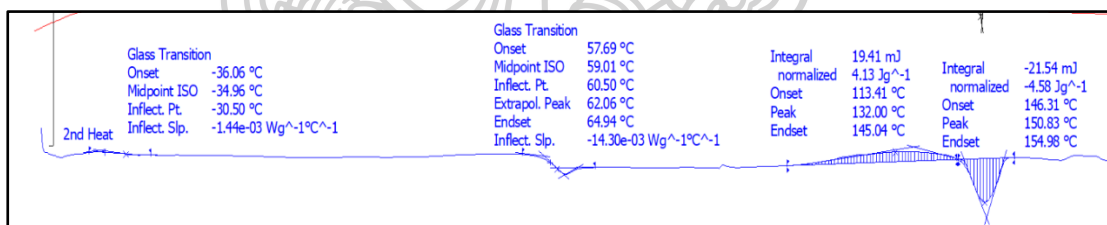
ΔH_{CC} คือ ปริมาณความร้อนของการเกิดผลึก (J/g)

W คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ PLA

ΔH_m^0 คือ ปริมาณความร้อนของการหลอมเหลวผลึกตัวอย่าง PLA 100 เปอร์เซ็นต์ (93.7 J/g)

ตัวอย่างการคำนวณ

หาปริมาณผลึกของ PLA ในคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่ปริมาณ CNT 1 phr และไม่มี การเติม PLA-g-GMA โดยสัดส่วนระหว่าง PLA/PBAT เท่ากับ 60/40 และทำการวิเคราะห์ในขั้นตอน การให้ความร้อนครั้งที่สอง



รูปที่ ข.2 รูปประกอบการคำนวณเปอร์เซ็นต์ผลึกของ PLA ในคอมพอสิต PLA/PBAT/C1

$\Delta H_m = 4.58 \text{ J/g}$, $\Delta H_m = 4.13 \text{ J/g}$, $\Delta H_m^0 = 93.7 \text{ J/g}$ และ $w = 0.6$ แทนค่าลงในสมการที่ ข.2

$$X_c(\%) = \frac{4.58 - 4.13}{0.6 \times 93.7} \times 100 = 0.80\%$$

ข.3 การคำนวณหาสัดส่วนระหว่าง D-band และ G-band (I_D/I_G) จากการทดสอบ Raman spectroscopy

การศึกษาโครงสร้างของ CNT ในคอมพอสิต PLA/PBAT/CNT ที่เตรียมได้จะทำการทดสอบด้วยเทคนิค Raman spectroscopy ซึ่งความสมบูรณ์ของโครงสร้างของ CNT สามารถหาได้จากสัดส่วนระหว่างความเข้มฟีกของ D-band และ G-band ดังสมการต่อไปนี้

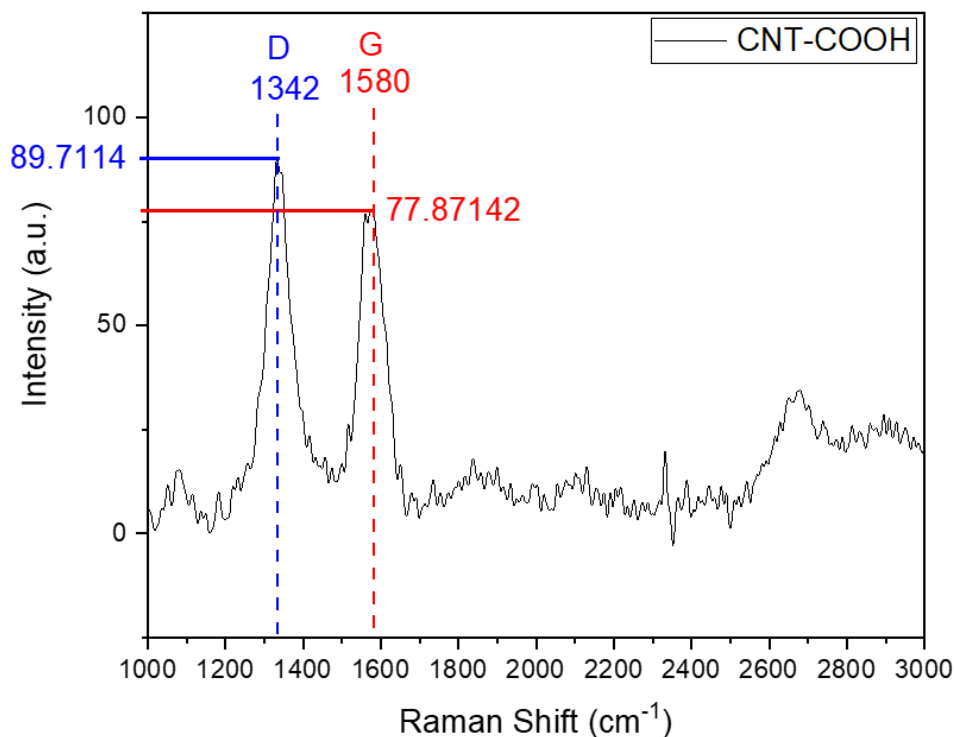
$$I_D / I_G = \frac{\text{Intensity of D-band}}{\text{Intensity of G-band}} \quad (\text{ข.3})$$

โดยทำการลากเส้นด้วยโปรแกรม OriginPro เพื่อกำหนดความเข้มและตำแหน่งของฟีก D-band และ G-band ดังรูปที่ ข.3 พบว่า ความเข้มฟีกของ D-band มีค่าเท่ากับ 89.7114 ส่วนฟีก G-band มีค่าเท่ากับ 77.8714 ดังนั้นเมื่อแทนค่าลงในสมการที่ ข.3 จะได้

$$I_D / I_G = \frac{89.7114}{77.8714}$$

$$I_D / I_G = 1.1520$$





รูปที่ ข.3 รูปประกอบในการคำนวณหา I_D/I_G

ข.4 การคำนวณหาปริมาณผลึกของ PBAT จากการทดสอบ XRD

การศึกษาผลึกของซีทคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT/CNT ที่เตรียมได้จะทำการทดสอบด้วยเทคนิค XRD โดยใช้ความต้งศักย์ 40 kV ในช่วง 2θ ที่ $5-50^\circ$ และความเร็วการสแกนที่ $2^\circ/\text{min}$ ปริมาณความเป็นผลึกของ PBAT สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

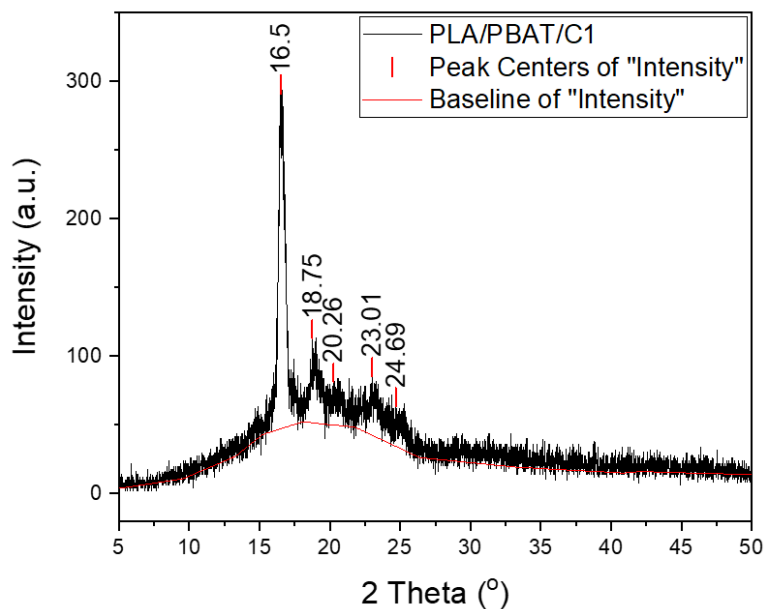
$$X_c = \frac{\sum A_{\text{Crystal}}}{\sum A_{\text{Crystal}} + \sum A_{\text{Amorphous}}} \times 100 \quad (\text{ข.4})$$

โดย A_{Crystal} คือ พื้นที่ใต้พีคส่วนที่เป็นผลึก

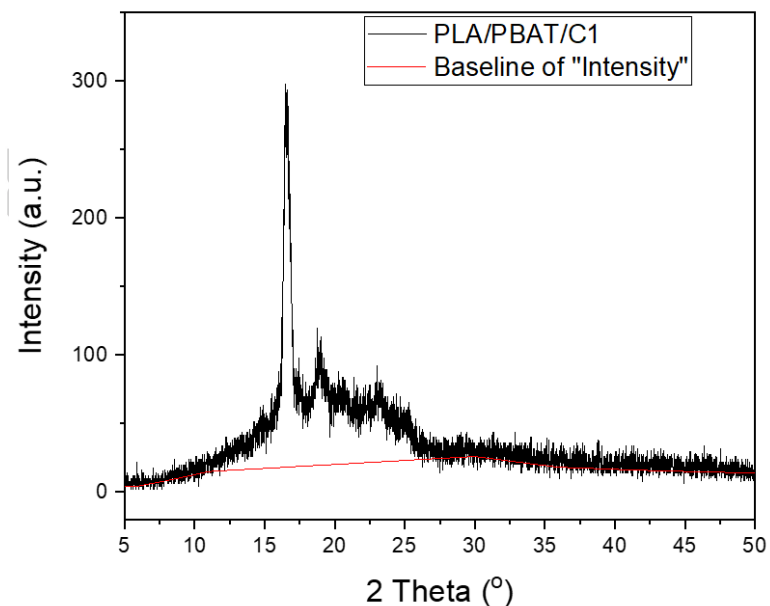
$A_{\text{Amorphous}}$ คือ พื้นที่ใต้พีคส่วนที่เป็นอสัณฐาน

ทำการหาพื้นที่ใต้พีคของบริเวณที่เป็นผลึก โดยจะทำการสร้าง Baseline เพื่อกำหนดพื้นที่ส่วนที่เป็นผลึกดังรูปที่ ข.4 จากนั้นทำการอินทิเกรตหาพื้นที่ส่วนที่เป็นผลึก ในขณะเดียวกันจะทำการ

สร้าง Baseline เพื่อกำหนดพื้นที่ส่วนที่เป็นผลรวมกับส่วนที่เป็นอสังฐานให้แยกออกจากบริเวณที่เป็น Background จากนั้นทำการอินทิเกรตหาพื้นที่ส่วนที่เป็นผลึกดังรูปที่ ข.5



รูปที่ ข.4 Baseline ของส่วนที่เป็นผลึกของคอมพอสิต



รูปที่ ข.5 Baseline ของส่วนที่เป็นผลรวมกับส่วนที่เป็นอสังฐานของคอมพอสิต

จากรูปที่ ข.4 และรูปที่ ข.5 ซึ่งเป็นการกำหนด Baseline เพื่ออินทิเกรตพื้นที่ใต้พีคของ PBAT หลังจากอินทิเกรตพบว่า พื้นที่ที่พิภบริเวณที่เป็นผลึกในรูปที่ ข. จะมีค่าเท่ากับ 149.83 35.85 10.67

19.36 และ 9.28 ส่วนหลังจากการอินทิเกรตฟังก์ชันที่เป็นผลรวมกับส่วนที่เป็นอสมฐานในรูปที่ ข. จะมีค่าเท่ากับ 751.21 นำค่าที่ได้ไปแทนในสมการที่ ข.4 จะได้

$$X_c = \frac{149.83 + 35.85 + 10.67 + 19.36 + 9.28}{751.21} \times 100\%$$

$$X_c = \frac{224.99}{751.21} \times 100\%$$

$$X_c = 29.95\%$$





ภาคผนวก ค
การนำเสนอผลงานวิจัย

ค.1 การประชุมวิชาการ PPC & PETROMAT Symposium 2022

-บันทึกถายงานการประชุม (Proceeding)



e-Proceedings



THE 28th PPC SYMPOSIUM ON PETROLEUM, PETROCHEMICALS, AND POLYMERS AND
THE 13th RESEARCH SYMPOSIUM ON PETROCHEMICAL AND MATERIALS TECHNOLOGY
23 JUNE 2022

CO-ORGANIZING

THE PETROLEUM AND PETROCHEMICAL COLLEGE, CHULALONGKORN UNIVERSITY
CENTER OF EXCELLENCE ON PETROCHEMICAL, MATERIALS TECHNOLOGY
THE THAI INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERING AND APPLIED CHEMISTRY



Table of Content

Presentation Code	Name - Lastname	Page
BBCO-1	Sirimas Suelueam	1
BBCO-2	Arisa Thamaporn	6
BBCO-3	Sameera Klaoekasikam	12
BBCO-4	Dechpol Prangklang	18
BBCO-5	Wongsakom Khammee	25
BBCO-6	Tawiwat Kunthong	31
BBCP-1	Panida Sriratchatchawan	37
BBCP-2	Denanda Clarasati Puteri	44
BBCP-4	Monruedee Srida	50
BBCP-5	Artitaya jiratanachotikul	56
BBCP-6	Kirapat Kaewmee	63
BBCP-7	Adi Pratama Putra	69
BBCP-9	Phattarawadee Roongsritong	77
BBCP-10	Naphat Yompakdee	84
REPO-1	Wanasan Hamala	90
REPO-2	Chayathorn Prapaitrakool	96
REPO-4	Piyawat Chunhanoprarit	102
REPP-2	Sunischa Thongklum	108
REPP-3	Panot Ioryuenyong	114
REPP-4	Thanawat Boonvaerojkul	120
REPP-6	Kittitit Kunta	126
REPP-7	Nattakit Charoendee	131
REPP-8	Jiratcha Kao-ian	136
REPP-9	Sarawan Sabpan	141
REPP-10	Chuvich Chaovarin	147
BBGO-2	Bundit Siriphonwuttichai	153
BBGP-1	Manisara Phiriyawirut	159
BBGP-2	Putita_Proceeding	165
BBGP-3	Atima Auepattanapong	171
BBGP-4	Kimhuoy Huot	177
BBGP-8	Makawun Sonkasettrin	184
BBGP-9	Pomchanok Pichaipanich	190
BBGP-10	Parita Sudjai boon	196
APPO-1	Nattanun Wiriyamontri	203
APPO-2	Noraganok Kamsanguan	210
APPP-1	Thanadech Nilket	216
APPP-2	Sunisa Sitthipong	222
APPP-3	Kunlanart Inphai	228
APPP-4	Chananya Sommut	234
APPP-5	Rinrada Channoo	240
APPP-6	Wasawat Jankingthong	244
APPP-7	Siwat Penrasamee	248
APPP-8	Yosita Maklay	254
ASSO-3	Achmad Anggawirya Alimin	260
ASSP-1	Chayapol Panaphorn	266
ASSP-3	Thapakom Tree-udom	272
ASSP-4	Tarika Lomcharoenwong	277
ASSP-5	Hoang An Do	283
ASSP-6	Pratya Muenchee	296
ASSP-7	Itti Jindasantisakul	303
DSCO-1	Watsawan Theparayangkul	309
DSCP-1	Pakawat Sengchim	315
DSCP-3	Apinut Wimanchan	321

APPO-1

Effect of PLA-PBAT compatibility and CNT content on the properties of PLA/PBAT/CNT composites

Nattanan Wiriyamontree^a, Nattavut Chaiyut^{a}, Manop Panapoy^a, Bussarin Ksapabutr^a*

^aDepartment of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand.

Keywords: Polylactic acid (PLA), Polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT), Compatibility, Carbon nanotube (CNT)

ABSTRACT

CNT/polymer composites have been studied by several researchers because of their outstanding mechanical properties and electrical conductivity. The replacement of electrical device components is one of their primary applications. The purpose of this study was to examine the compatibility between PLA and PBAT utilizing PLA-g-GMA as a compatibilizer as well as the effects of CNT content on the properties of the PLA/PBAT/CNT composite. The compatibilizer content was set at 9% wt, and the PLA/PBAT blend ratio was held at 60/40. The range of CNT concentration was 0 to 10 phr. This investigation included morphological analysis, mechanical properties, and thermal properties. The SEM results show that combining PLA-g-GMA and CNT may effectively disperse the PBAT dispersion phase within the PLA matrix. The mechanical properties of the composites were enhanced as a result of these findings. However, as PLA-g-GMA and CNT were added, the crystallinity of the composites decreased, according to XRD data. Additionally, because of the high thermal conductivity of CNT, the DSC thermal behavior revealed no change, whereas the TGA thermal stability worsened with an increase in CNT.

*@chaiyut_n@su.ac.th

INTRODUCTION

PLA has exceptional mechanical properties and is biodegradable, making it a possible environmentally friendly alternative to petroleum-based plastics. Consequently, PLA is gaining significant industrial attention. However, the brittleness of PLA, which is its drawback, can be altered by combining it with high-toughness thermoplastics (Coban et al., 2018).

PBAT, a random biodegradable copolymer, is one of the high-toughness polymers. It is used to improve the properties of polymers and is extensively utilized in food packaging. It is notably common to increase the properties of PLA, especially its toughness. However, these two polymers are immiscible, so PLA/PBAT blends exhibit a sea-island morphology (Kumar et al., 2010), making a study on PLA/PBAT blends extremely difficult. The most common solution to this issue is to use a compatibilizer.

Carbon Nanotube (CNT) is a prominent material used to strengthen composites and increase their conductivity. Due to its improved mechanical properties, thermal properties, and electrical conductivity, the PLA/CNT composite has attracted a great deal of research attention (Lyu et al., 2020).

In this study, we intend to investigate the compatibility between PLA and PBAT utilizing PLA-g-GMA as a compatibilizer, as well as the effect of CNT content on the properties of PLA/PBAT/CNT composites.

EXPERIMENTAL

A. Preparation of PLA/PBAT/CNT composites

PBAT/PLA-g-GMA was first prepared by mixing PBAT and PLA-g-GMA of 9% by weight (PG9) at 180 °C and 60 rpm in an internal mixer. Then, PLA, CNT, and PBAT/PLA-g-GMA were added to the mixer and blended at 180 °C and 60 rpm. CNTs ranging from 1 to 10 phr and PLA/PBAT at a ratio of 60/40 were used to produce the composites. Then, the PLA/PBAT/CNT composite sheets were fabricated using a compression molding machine at 180 °C with a pressure of 10 MPa for 10 minutes.

B. Characterization of PLA/PBAT/CNT composites

The morphology of composites was studied by scanning electron microscopy (SEM) with an acceleration voltage of 15 kV. X-ray diffractometer (XRD) was used to analyze the crystallinity of composites quantitatively. The XRD test was carried out between 5° and 50° at a scanning rate of 2°/min using CuK α radiation. According to ASTM D882, the mechanical properties were determined using a universal testing machine. The DSC was tested from -50 to 200 °C at a rate of 10 °C/min under a nitrogen atmosphere. The TGA was conducted under a controlled temperature between 30 and 700 °C at a heating rate of 10 °C per minute under an oxygen atmosphere.

RESULTS AND DISCUSSION

A. Morphological analysis

The morphologies of the PLA/PBAT/CNT composites were analyzed with SEM illustrated in Figure 1. Figure 1a-e depicts SEM images of PLA/PBAT blend and its composites without the PLA-g-GMA compatibilizer, whereas Figure 1a'-e' depicts SEM images with the compatibilizer. For the PLA/PBAT blend, the sphere-shaped PBAT phase of various sizes was uniformly dispersed within the PLA matrix phase shown in Figure 1a. As seen in Figure 1b-e, the PBAT dispersed phase grew smaller and evenly scattered within the PLA matrix phase as the CNT content increased. CNTs are restricted to the minor PBAT phase in composites due to their greater affinity for the aromatic groups in the main chain of PBAT than for the aliphatic groups of the PLA. The effect of the compatibilizer on the composites was shown in Figure 1a'-e'. The PBAT phase was deformed from a sphere to an ellipse in the absence of CNT. These two polymer phases can be made to be more compatible by the compatibilizer than they would be without it (Figure 1a'). As the CNT content increased (Figure 1 b'-e'), the PBAT phase size in the composites containing PLA-g-GMA reduced and was better dispersed throughout the PLA matrix. During the blending process, PBAT and PLA-g-GMA interact strongly due to the interaction between the carboxyl group (-COOH) of PBAT chains and the epoxy group of PLA-g-GMA chains. (Shang et al., 2020).

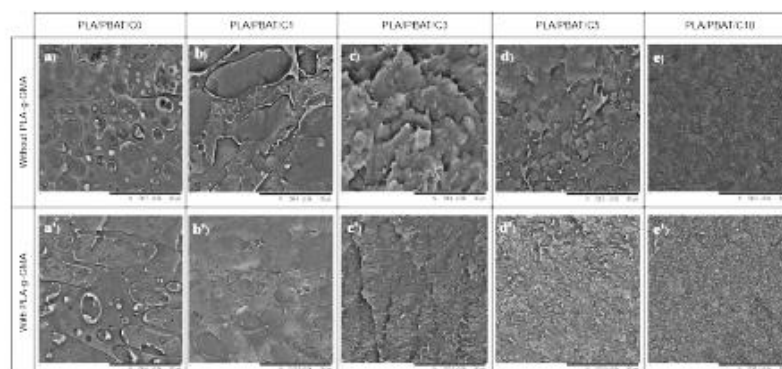


Figure 1 SEM images of PLA/PBAT/CNT composites of PLA/PBAT/CNT composites; (a-e) with and (a'-e') without PLA-g-GMA.

B. X-ray diffraction

XRD pattern for CNT powder and PLA/PBAT/CNT composites is presented in Figure 2a. Characteristic CNT peaks have been detected at 2-theta of 26° and 43° , respectively. The X-ray diffractogram of PLA/PBAT revealed an amorphous halo corresponding to PLA and three diffraction peaks at 17° , 20° , and 23° , indicating the crystalline structure of PBAT (Arruda et al., 2015). For all PLA/PBAT/CNT composites, these typical CNT diffraction peaks vanished, suggesting less dispersion of CNT on the surface of composites (Zhou et al., 2021).

Figure 2b represents the crystallinity of PBAT. It was observed that the PBAT crystallinity reduced, indicating that the CNT inhibited the mobility of PBAT chains and the formation of the crystal lattice (Wei et al., 2022). Moreover, the addition of PLA-g-GMA lowered the crystallinity of PBAT due to the interaction between PLA-g-GMA and PBAT as well as the entanglement of PLA-g-GMA and PLA chains.

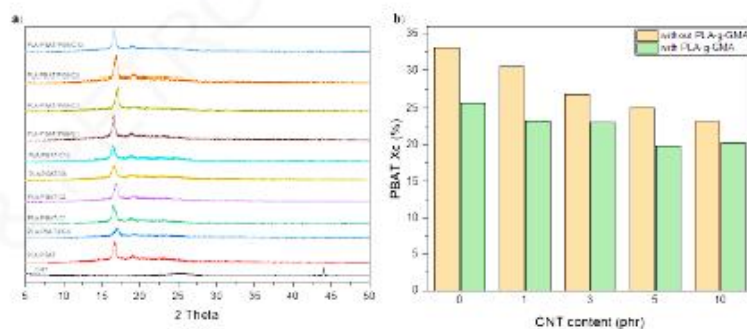


Figure 2 XRD analysis (a) XRD pattern for CNT powder and PLA/PBAT/CNT composites and (b) crystallinity of PBAT.

C. Mechanical Properties

The mechanical properties of the PLA/PBAT/CNT composites are exhibited in Figure 3 and Table 1, respectively. The incorporation of CNT increased Young's modulus, tensile strength, and elongation at break. This is due to the reinforcing impact of CNT in the composite structure and the significant friction between nanotubes and polymer chains. Therefore, adding 10 phr of CNT enhanced Young's modulus of PLA/PBAT/CNT by 49% over the PLA/PBAT blend without CNT. Furthermore, the elongation at break increased as a result of strong interfacial adhesion between PLA/PBAT and CNT (Azizi et al., 2019).

It was revealed that the addition of PLA-g-GMA compatibilizer improved the composite's mechanical properties by enhancing the interaction between PBAT and PLA and the dispersion of PBAT in the PLA matrix, in comparison to composites without compatibilizer. However, the variation in CNT content from 1 to 10 phr did not appear to have any significant effect on the mechanical properties of composites with or without PLA-g-GMA.

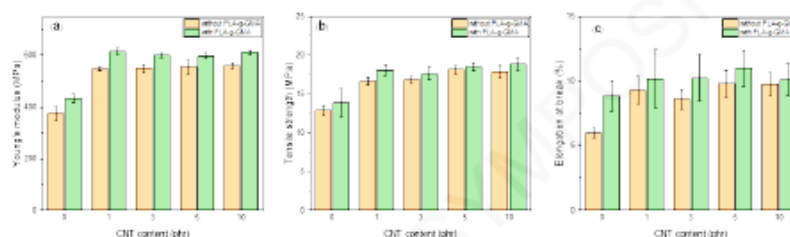


Figure 3 Mechanical properties of PLA/PBAT/CNT composites (a) Young's modulus, (b) tensile strength, and (c) elongation at break.

Table 1 Mechanical properties of PLA/PBAT/CNT composites.

Sample	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PLA/PBAT	375.27 ± 26.59	12.88 ± 0.67	6.00 ± 0.37
PLA/PBAT/C1	546.79 ± 7.60	16.67 ± 0.55	9.31 ± 1.06
PLA/PBAT/C3	548.46 ± 16.11	16.86 ± 0.44	8.62 ± 0.76
PLA/PBAT/C5	554.39 ± 27.01	18.12 ± 0.52	9.80 ± 1.07
PLA/PBAT/C10	559.65 ± 11.63	17.88 ± 0.80	9.76 ± 0.89
PLA/PBAT/PG9	433.51 ± 15.91	13.88 ± 1.83	8.86 ± 1.20
PLA/PBAT/PG9/C1	614.87 ± 12.77	18.11 ± 0.69	10.20 ± 2.24
PLA/PBAT/PG9/C3	599.83 ± 7.79	17.61 ± 0.83	10.24 ± 1.78
PLA/PBAT/PG9/C5	596.99 ± 8.94	18.48 ± 0.52	10.99 ± 1.40
PLA/PBAT/PG9/C10	610.12 ± 8.32	18.84 ± 0.80	10.13 ± 1.24

D. Thermal properties

Figure 4 and Table 2 demonstrate the thermal behaviors of PLA/PBAT/CNT composites. All composites displayed two glass transition temperatures (T_g) of approximately -33°C and 58°C , corresponding to the T_g of PBAT and PLA, respectively. It could be said that PLA and PBAT were practically immiscible by means of the DSC test. In addition, the PLA melting temperature (T_m) was observed at 150°C . This study showed that CNT and PLA-g-GMA did not affect the thermal behaviors of the composite. It might be due to the high molecular weight of PLA-g-GMA; it had little impact on the free volume change. (Lyu et al., 2020)

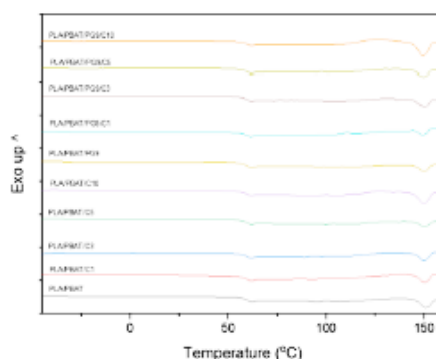


Figure 4 DSC thermogram of PLA/PBAT/CNT composites.

Table 2 Thermal behaviors of PLA/PBAT/CNT composites.

Sample	T_g (°C)	T_{d2} (°C)	T_m (°C)
PLA/PBAT	-34.60	59.94	150.74
PLA/PBAT/C1	-34.32	59.44	150.13
PLA/PBAT/C3	-32.51	58.69	149.64
PLA/PBAT/C5	-34.02	59.01	149.96
PLA/PBAT/C10	-33.54	58.94	149.77
PLA/PBAT/PG9	-32.62	58.49	149.75
PLA/PBAT/PG9/C1	-33.23	58.03	149.25
PLA/PBAT/PG9/C3	-32.00	58.59	150.27
PLA/PBAT/PG9/C5	-32.66	58.76	149.60
PLA/PBAT/PG9/C10	-32.44	58.90	149.44

TGA results are presented in Figure 5 and Table 3. Blends of PLA/PBAT and PLA/PBAT/PLA-g-GMA exhibited two-stage decomposition at 349 °C and 470 °C, relative to the decomposition temperatures of PLA (T_{d1}) and PBAT (T_{d2}). An additional decomposition temperature exists for all composites at about 525 °C, related to the CNT decomposition temperature (T_{d3}). Additionally, T_{d2} and T_{d3} decreased with the increase in CNT due to CNT increasing the diffusion of heat in the composite, accelerating polymer degradation.

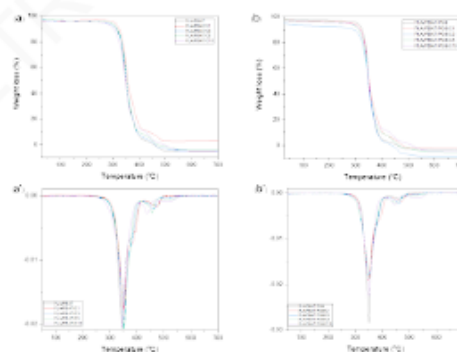


Figure 5 TGA and DTG curves of PLA/PBAT/CNT composite (a) without and (b) with PLA-g-GMA.

Table 3 Thermal stability of PLA/PBAT/CNT composites.

Sample	T _{d1} (°C)	T _{d2} (°C)	T _{d3} (°C)
PLA/PBAT	347.33	469.83	-
PLA/PBAT/C1	352.33	470.83	-
PLA/PBAT/C3	353.33	462.17	521.67
PLA/PBAT/C5	353.50	457.67	530.67
PLA/PBAT/C10	346.17	439.50	521.67
PLA/PBAT/PG9	351.83	470.00	-
PLA/PBAT/PG9/C1	348.50	470.33	-
PLA/PBAT/PG9/C3	349.83	459.16	521.33
PLA/PBAT/PG9/C5	351.83	450.00	527.00
PLA/PBAT/PG9/C10	351.17	444.33	531.33

CONCLUSIONS

PLA-g-GMA can improve the compatibility between PLA and PBAT. The addition of PLA-g-GMA also enhanced mechanical properties but reduced crystallization without having any effect on thermal behaviors or thermal stability of composites. CNT facilitated dispersion of the dispersed PBAT phase in the PLA matrix phase. CNT can also be used to strengthen composite materials. However, the composite's crystallization and thermal stability decreased as a result.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful for the research funding provided by the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University.

REFERENCES

- Arruda L.C., Magaton M., Bretas R.E.S. and Ueki M.M. (2015). Influence of chain extender on mechanical, thermal and morphological properties of blown films of PLA/PBAT blends. *Polymer Testing*, 43, p. 27-37
- Azizi S., Azizi M. and Sabetzadeh M. (2019). The Role of Multiwalled Carbon Nanotubes in the Mechanical Thermal, Rheological, and Electrical Properties of PP/PLA/MWCNTs Nanocomposites. *Compos. Sci.* 3(3), p. 1-15
- Ciecierska E., Boczkowska A., Kurzydłowski K.J., Rosca I.D. and Hoa S.V. (2013). The effect of carbon nanotubes on epoxy matrix nanocomposites. *Therm Anal Calorim.* 111, p.1019–1024
- Çoban O., Bora M.Ö., Kutluk T. and Özkoç G. (2018). Mechanical and thermal properties of volcanic particle filled PLA/PBAT composites. *Polymer Composites.* 39(S3), p. E1500-E1511.
- Ko S. W., Hong M. K., Park B. J., Gupta R. K. and Choi H. J. (2009). Morphological and rheological characterization of multi-walled carbon nanotube/PLA/PBAT blend nanocomposites. *Polymer Bulletin.* 63, p. 125–134
- Kumar M., Mohanty S., Nayak S.K., and Rahail P. M. (2010). Effect of glycidyl methacrylate (GMA) on the thermal, mechanical and morphological property of

- biodegradable PLA/PBAT blend and its nanocomposites. *Bioresour Technol.* 101(21), p. 8406-8415.
- Lyu Y., Chen Y., Lin Z., Zhang J., and Shi X. (2020) Manipulating phase structure of biodegradable PLA/PBAT system: Effects on dynamic rheological responses and 3D printing. *Composites Science and Technology.* p. 108399-108414.
- Nie P., Min C., Song H., Chen X., Zhang Z. and Zhao K. (2015). Preparation and Tribological Properties of Polyimide/Carboxyl-Functionalized Multi-walled Carbon Nanotube Nanocomposite Films Under Seawater Lubrication. *Tribol Lett.* 58(7), p. 1-12
- Shang M., Gao Z., Cheng H. and Shentu B. (2020). Comparative Study of Poly(butylene terephthalate)/Carbon Nanotube Nanocomposites with Non-reactive and Reactive Elastomers: Morphology and Properties. *Industrial & Engineering Chemistry Research.* 59(32), p. 14306-14314
- Wei X., Cui W., Zheng K., Wang J., Hu J. and Zhou H. (2022). Bimodal Cellular Structure Evolution in PBAT Foams Incorporated by Carbon Nanotubes and Graphene Nanosheets. *Polymers and the Environment.* 30, p. 2785-2799
- Zhou X., Deng J., Fang C., Lei W., Song Y., Zhang Z., Huang Z. and Li Y., (2021). Additive manufacturing of CNTs/PLA composites and the correlation between microstructure and functional properties. *Materials Science & Technology.* 60, p. 27-34

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐนันท์ วิริยะมนตรี
วัน เดือน ปี เกิด	2 มีนาคม 2541
สถานที่เกิด	นนทบุรี
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ปีโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	9/21 หมู่ 6 ต.เสาธงหิน อ.บางใหญ่ จ.นนทบุรี 11140
รางวัลที่ได้รับ	1. ทุนผู้ช่วยสอน ระหว่างปี 2563 ถึง 2565 2. มีประสบการณ์เป็นผู้ช่วยสอนเครื่องมือ ได้แก่ <ul style="list-style-type: none">- เครื่องวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน (TGA) รุ่น TGA7 ของบริษัท Perkin Elmer และ TGA/DSC 1 ของบริษัท Mettler Toledo- เครื่องหลอมผสมภายใน (internal mixer) รุ่น W50EHT ของบริษัท Brabender- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น Tabletop Microscope TM 3030 ของบริษัท Hitachi High-Technologies

