

การสังเคราะห์และตรวจสอบสมบัติของฟิล์มพลาสติกชีวภาพทนความร้อนสูงเพื่อบรรจุอุปกรณ์
อิเล็กทรอนิกส์

วิทยานิพนธ์
ของ
อรปริยา เวียงอินทร์

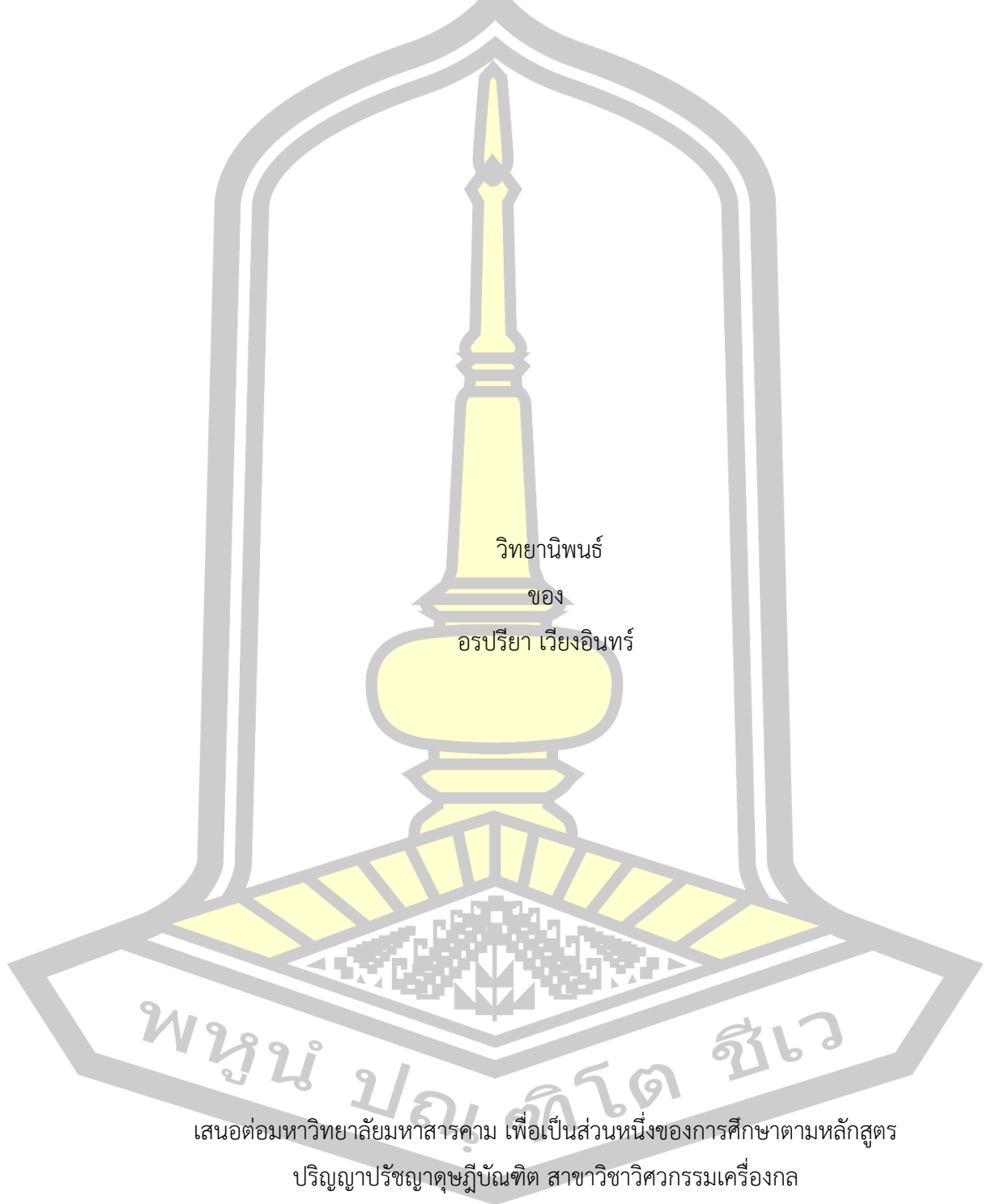
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ธันวาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การสังเคราะห์และตรวจสอบสมบัติของฟิล์มพลาสติกชีวภาพทนความร้อนสูงเพื่อบรรจุอุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์



วิทยานิพนธ์

ของ

อรปรียา เวียงอินทร์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ธันวาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Stereocomplex PLLA-PBAT Copolymer and Its Composites with Multi-walled Carbon
Nanotubes for Electrostatic Dissipative Application

Onpreeya Veang-in

พหุบัณฑิต

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)

December 2023

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวอรปรียา เวียงอินทร์ แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. ดรชนีย์ พลหาญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. ยศฐา ศรีเทพ)

.....กรรมการ

(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. อีรพัฒน์ ชมภูคำ)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การสังเคราะห์และตรวจสอบสมบัติของฟิล์มพลาสติกชีวภาพทนความร้อนสูง เพื่อบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์		
ผู้วิจัย	อรปริยา เวียงอินทร์		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ยศฐา ศรีเทพ		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2566

บทคัดย่อ

เนื่องจากความเสถียรทางความร้อนต่ำและความเปราะสูงเป็นข้อเสียทั้งสองของพอลิ (แอล-แลคไทด์) (PLLA) จึงได้รับปรับปรุงโดยการสร้างสเตอริโอคอมเพล็กซ์และโคพอลิเมอร์ด้วยพอลิ (บิวทิลีน อะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต) (PLLA-PBAT) ในการศึกษาครั้งนี้ เราสังเคราะห์ PLLA และ PLLA-PBAT โคพอลิเมอร์ โดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง จากนั้นนำพอลิเมอร์ทั้งสองผสมกับพอลิ (ดี-แลคไทด์) (PDLA) เพื่อสร้างผลึกสเตอริโอคอมเพล็กซ์ ผสมท่อนาโนคาร์บอนแบบมีผนังหลายชั้น (MWCNTs) ที่ปริมาณ 5 phr ผ่านวิธีการหล่อขึ้นรูปฟิล์มด้วยตัวทำละลาย จากผลการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าความต้านทานไฟฟ้าพื้นผิวของคอมโพสิตประมาณ 10^6 W ซึ่งเหมาะสมสำหรับการกระจายไฟฟ้าสถิต (ESD) โคพอลิเมอร์และผลึกสเตอริโอคอมเพล็กซ์ของมันได้รับการยืนยันโดยพีคของสเปกตรัมอินฟราเรดที่ 922 cm^{-1} และ 908 cm^{-1} ตามลำดับ ผลทดสอบสมบัติทางกลของ PLLA-PBAT โคพอลิเมอร์มีความต้านทานแรงดึงต่ำกว่า PLLA และสเตอริโอคอมเพล็กซ์ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ แต่ค่ายืดตัวที่จุดขาดสูงกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ การยืดตัวที่จุดขาดของ PLLA-PBAT+MWCNT ลดลง 17 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความเสถียรทางความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับโคพอลิเมอร์ที่ไม่ผสม MWCNT อุณหภูมิหลอมเหลวสำหรับ PLLA-PBAT โคพอลิเมอร์แบบสเตอริโอคอมเพล็กซ์ที่ผสมและไม่ผสม MWCNT อยู่ที่ประมาณ 225 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิของไฮโมคริสตัล 50 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและความเป็นผลึกของ PLLA-PBAT โคพอลิเมอร์ แบบสเตอริโอคอมเพล็กซ์ยังเพิ่มขึ้นเมื่อผสม MWCNT อีกด้วย

คำสำคัญ : สเตอริโอคอมเพล็กซ์พอลิแลคไทด์, พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต, โคพอลิเมอร์, ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง, ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

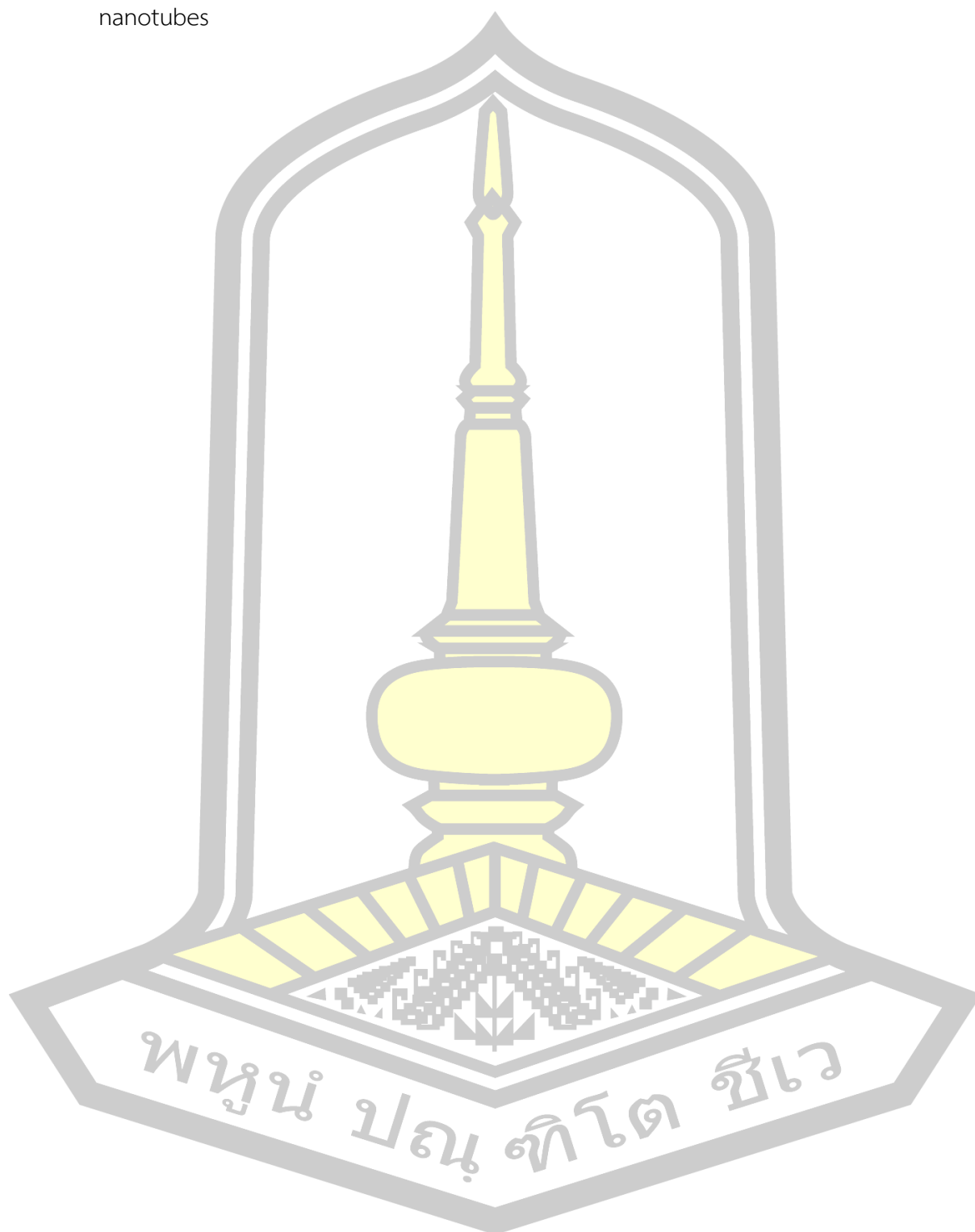
TITLE	Stereocomplex PLLA-PBAT Copolymer and Its Composites with Multi-walled Carbon Nanotubes for Electrostatic Dissipative Application		
AUTHOR	Onpreeya Veang-in		
ADVISORS	Associate Professor Yottha Srithep , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Mechanical Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2023

ABSTRACT

Because of its low thermal stability and brittleness, both drawbacks of poly (L-lactide) (PLLA) were solved by forming stereocomplex and its copolymer with poly (butylene adipate-co-terephthalate) (PLLA-PBAT). In this study, we synthesized PLLA and PLLA-PBAT copolymer by ring-opening polymerization. Both polymers were blended with poly (D-lactide) (PDLA) to form stereocomplex crystals. Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) were added in the polymer matrix at 5 phr through the solvent casting method. The surface resistance of the composite was 10^6 W, which is appropriate for electrostatic dissipative (ESD) purposes. The copolymer and its stereocomplex crystallites were confirmed by peaks of infrared spectra at 922 cm^{-1} and 908 cm^{-1} , respectively. The PLLA-PBAT copolymer had 60% lower tensile strength than PLLA and its stereocomplex, but 10% higher elongation at break. The elongation at break of the PLLA-PBAT copolymer/MWCNT composite decreased by 17% while its thermal stability slightly increased when compared to the unfilled copolymer. The melting temperature for both stereocomplex PLLA-PBAT copolymers, with and without MWCNTs, was around 225°C , 50°C higher than that of the homocrystals. Moreover, the glass transition temperature and crystallinity of the stereocomplex PLLA-PBAT copolymer also increased by adding MWCNTs.

Keyword : Stereocomplex poly (L-lactide) copolymer, Poly (D-lactide), Poly (butylene

adipate-co-terephthalate), Ring opening polymerization, Multi-walled carbon nanotubes



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนจากสำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ภายใต้โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (ทุน TGIST) ปี 2563

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร. ยศฐา ศรีเทพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาสละเวลามาให้คำปรึกษารวมทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ และแนวทางที่เป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาในการจัดทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จ ล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดรชนีย์ พลหาญ ที่เป็นทั้งประธานสอบ เป็นอาจารย์ เป็นที่ปรึกษา และเป็นพี่น้ารัก คอยช่วยเหลือ ให้ใช้สถานที่ห้องปฏิบัติการเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ให้ความรู้ คำแนะนำในการทำงานวิจัย และเป็นกำลังใจ แร้งบันดาลใจที่สำคัญอีกท่านหนึ่งที่ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการศึกษาครั้งนี้ จึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ดร. ดรณิ อัสวเสถียร อาจารย์ที่ปรึกษาจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้คำแนะนำการวิเคราะห์ผลการทดลอง แนะนำเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ และเครื่องทดสอบที่เหมาะสม ตลอดจนกรุณาตรวจแก้ วิทยานิพนธ์ตลอดจนสามารถส่งตีพิมพ์ได้ จึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิพัฒน์ ชมภูคำ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบุพการี คุณพ่อวิโรจน์ – คุณแม่สมร เวียงอินทร์ ที่เป็นกำลังใจที่ดีที่สุด ที่คอยสนับสนุน เคียงข้างมาตลอด ลูกขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณาจารย์มหาวิทยาลัยมหาสารคามที่ได้ให้ความรู้ และการอบรมสั่งสอนสิ่งที่ได้งามแก่ศิษย์ตลอดมาจนกระทั่งประสบความสำเร็จ คุณค่า และประโยชน์จาก วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบบูชาผู้มีพระคุณทุกท่าน

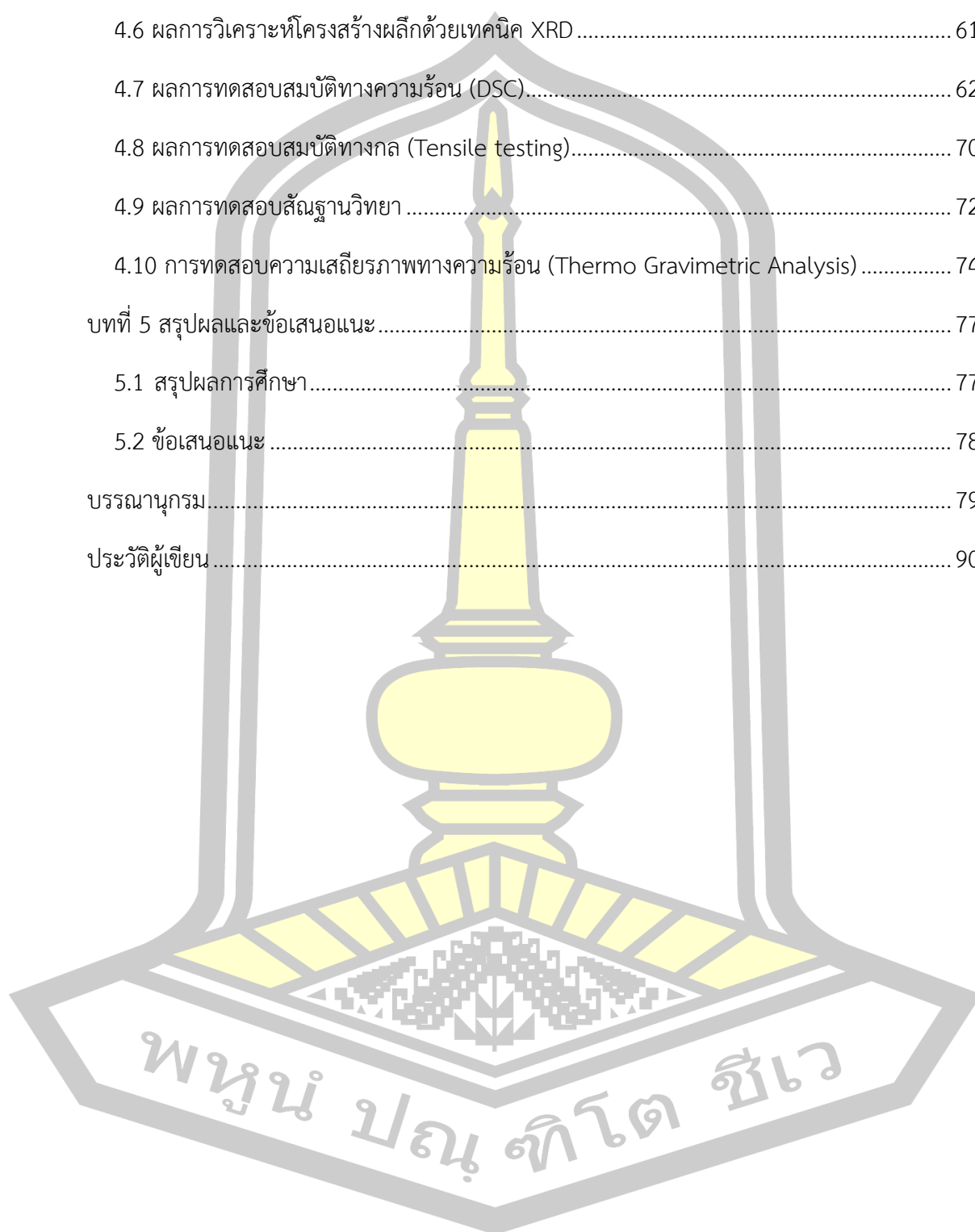
อรปรียา เวียงอินทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการทำวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.3 แนวคิดของงานวิจัย	5
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	5
1.5 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	6
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	6
1.7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 ความเป็นมาและภูมิหลัง	9
2.2 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid or PLA).....	10
2.3 การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด (Synthesis methods for PLA).....	13
2.4 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (ring-opening polymerization, ROP).....	15
2.5 ข้อดีและข้อจำกัดของพอลิแลคติกแอซิด	17
2.6 การปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดโดยการทำพอลิเมอร์ผสม	18

2.7 โคพอลิเมอร์ (Copolymer)	23
2.8 ตัวอย่างงานวิจัยเกี่ยวกับโคพอลิเมอร์.....	24
2.9 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes - CNTs)	27
2.10 บรรจุภัณฑ์ด้านไฟฟ้าสถิต	28
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	37
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	37
3.3 วิธีดำเนินการทดลอง	38
3.4 วิธีการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์	38
3.5 การตรวจสอบสมบัติของโคพอลิเมอร์.....	40
3.6 การเตรียมชิ้นงานฟิล์ม.....	41
3.7 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า.....	42
3.8 การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมี	43
3.9 การทดสอบสมบัติทางกล	44
3.10 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	45
3.11 การทดสอบโครงสร้างผลึก.....	47
3.12 การทดสอบโครงสร้างโมเลกุล.....	48
3.13 การทดสอบความเสถียรทางความร้อน.....	50
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	52
4.1 การสังเคราะห์ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer.....	52
4.2 ผลการวัดน้ำหนักโมเลกุล.....	53
4.3 ผลการทดลองสมบัติการนำไฟฟ้า.....	56
4.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR.....	57

4.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิค NMR	60
4.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD	61
4.7 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน (DSC).....	62
4.8 ผลการทดสอบสมบัติทางกล (Tensile testing).....	70
4.9 ผลการทดสอบสัณฐานวิทยา	72
4.10 การทดสอบความเสถียรภาพทางความร้อน (Thermo Gravimetric Analysis)	74
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	77
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	77
5.2 ข้อเสนอแนะ	78
บรรณานุกรม.....	79
ประวัติผู้เขียน.....	90



สารบัญตาราง

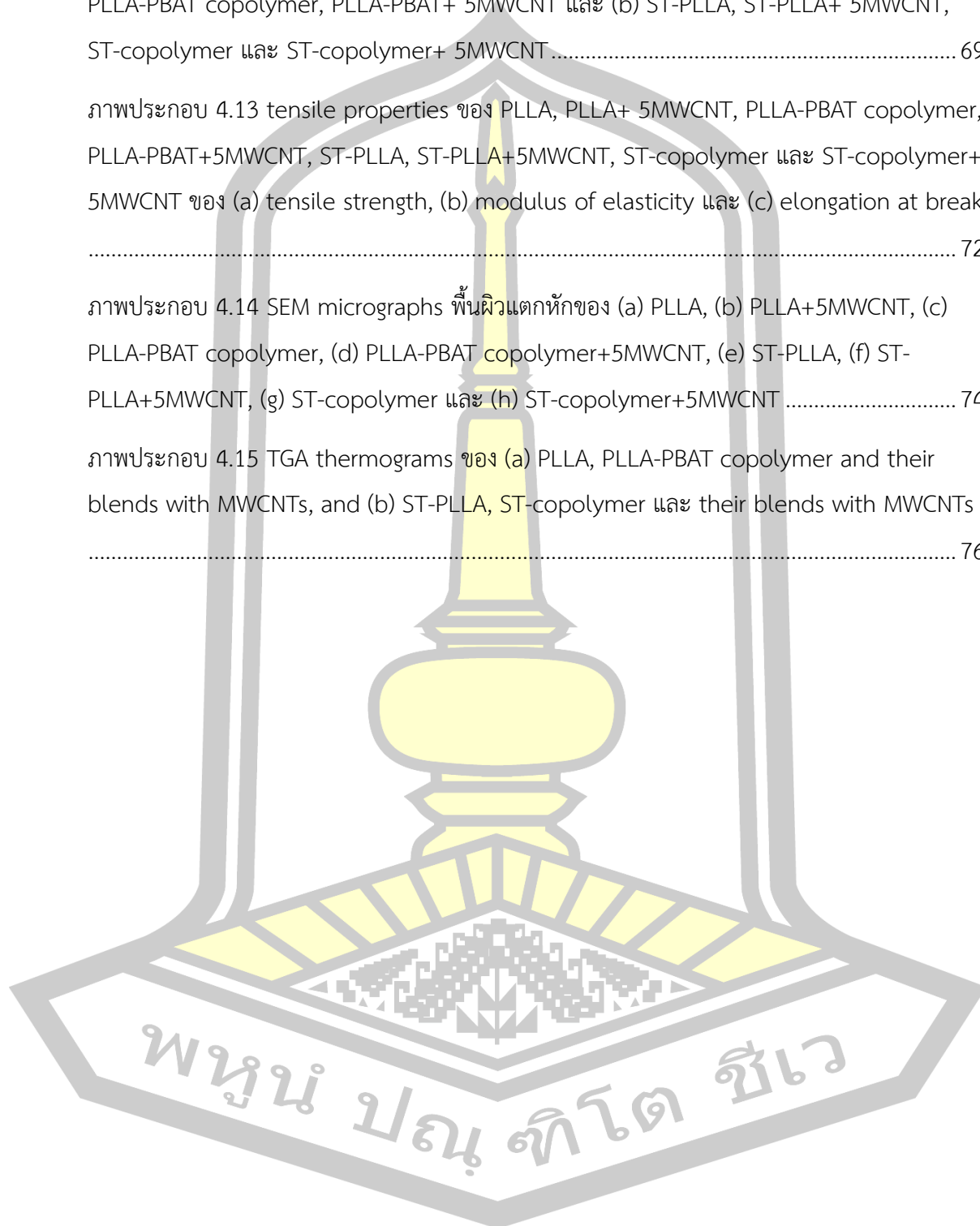
	หน้า
ตาราง 2.1 ผลของสเตรียไอเคมีและปริมาณผลึกที่มีต่อสมบัติทางกลของพอลิแลคติกแอซิด [40].....	16
ตาราง 2.2 สมบัติทางกายภาพของพอลิแลคติกแอซิด [46]	16
ตาราง 2.3 ผลการทดสอบการดึงของ PLA/PBAT/chain extender [14].....	23
ตาราง 2.4 สมบัติบางประการของพอลิเมอร์ทางชีวภาพนำไฟฟ้าที่รายงานในงานวิจัย	35
ตาราง 3.1 อัตราส่วนที่ใช้สำหรับเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างโคพอลิเมอร์ PDLA และท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น.....	42
ตาราง 4.1 น้ำหนักโมเลกุลและดัชนีการกระจายน้ำหนักโมเลกุล (polydispersity index, PDI) ของ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer.....	54
ตาราง 4.2 DSC first heating data ของ PLLA, PLLA+ 5MWCNT, PLLA-PBAT copolymer, PLLA-PBAT+ 5MWCNT, ST-PLLA, ST-PLLA+ 5MWCNT, ST-copolymer และ ST-copolymer+ 5MWCNT.....	65
ตาราง 4.3 DSC cooling data ของ PLLA, PLLA+ 5MWCNT, PLLA-PBAT copolymer, PLLA-PBAT+ 5MWCNT, ST-PLLA, ST-PLLA+ 5MWCNT, ST-copolymer และ ST-copolymer+ 5MWCNT	67
ตาราง 4.4 DSC second heating data ของ PLLA, PLLA+ 5MWCNT, PLLA-PBAT copolymer, PLLA-PBAT+ 5MWCNT, ST-PLLA, ST-PLLA+ 5MWCNT, ST-copolymer และ ST-copolymer+ 5MWCNT.....	69
ตาราง 4.5 TGA data determined ของ PLLA, PLLA+MWCNT, PLLA-PBAT copolymer, PLLA-PBAT+MWCNT, ST, ST+MWCNT, ST-PBAT และ ST-PBAT+MWCNT.....	76

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 2.1 โครงสร้างของกรดแลคติก [39]	10
ภาพประกอบ 2.2 วัฏจักรชีวิต PLA [39]	12
ภาพประกอบ 2.3 การสังเคราะห์ PLA [41].....	14
ภาพประกอบ 2.4 ค่าโมดูลัสและค่าการยืดตัวของ PLA เทียบกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ [49]	18
ภาพประกอบ 2.5 ลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่เติม PEG ที่ปริมาณต่างๆ [54].....	22
ภาพประกอบ 2.6 โครงสร้างของ copolymer แบบต่างๆ [57]	24
ภาพประกอบ 2.7 ความเค้น-ความเครียด ของ PLLA/PBES ที่อัตราส่วนต่าง ๆ [28].....	25
ภาพประกอบ 2.8 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์ MPEG-PLA-OH [58].....	26
ภาพประกอบ 2.9 DSC thermograms of (A) PLA/plasticizer (B) ST/plasticizer [20]	27
ภาพประกอบ 2.10 โครงสร้างท่อนาโนคาร์บอน ก) ผนังเดี่ยว (SWCNT) และ ข) ผนังหลายชั้น (MWCNT) [61]	28
ภาพประกอบ 2.11 ความเสียหายของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต [64].....	31
ภาพประกอบ 2.12 ประเภทของวัสดุในงานด้านไฟฟ้าสถิตแบ่งตามความต้านทานไฟฟ้าที่พื้นผิว [65]	32
ภาพประกอบ 2.13 ตัวอย่างของถุงป้องกันไฟฟ้าสถิต [64].....	33
ภาพประกอบ 3.1 การสังเคราะห์ (a) PLLA และ (b) PLLA-PBAT copolymer	39
ภาพประกอบ 3.2 เครื่อง Gel Permeation Chromatograph (GPC).....	41
ภาพประกอบ 3.3 เครื่องมัลติมิเตอร์	43
ภาพประกอบ 3.4 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR).....	44
ภาพประกอบ 3.5 เครื่องทดสอบแรงดึง (texture analyser).....	45
ภาพประกอบ 3.6 เครื่อง Differential scanning Calorimeter (DSC) รุ่น DSC-4000	47

ภาพประกอบ 3.7 เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)	48
ภาพประกอบ 3.8 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี (NMR)	49
ภาพประกอบ 3.9 กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM.....	50
ภาพประกอบ 3.10 เครื่อง Thermo Gravimetric Analysis (TGA).....	51
ภาพประกอบ 4.1 การสังเคราะห์ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer.....	52
ภาพประกอบ 4.2 Retention time vs response of (a) PLLA และ (b) PLLA-PBAT copolymer	54
ภาพประกอบ 4.3 ทำการละลายเม็ดพลาสติกด้วยเครื่องกวนสารละลาย	55
ภาพประกอบ 4.4 เทสารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกันลงบนภาตแก้ว ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง.....	55
ภาพประกอบ 4.5 แผ่นฟิล์มบางของสารสังเคราะห์ที่ไม่เติมและเติม MWCNTs	56
ภาพประกอบ 4.6 Surface resistivity of various of nanotube doped copolymers	57
ภาพประกอบ 4.7 FTIR สเปกตรัมของ (a) PLLA, PLLA-PBAT copolymer, stereocomplex polymers และ polymer/MWCNT composites และ (b) ช่วงขยายจาก 850 ถึง 1,000 cm^{-1} ของ PLLA และ ST-PLLA.....	59
ภาพประกอบ 4.8 $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของ (a) PLLA, (b) PBAT และ (c) PLLA-PBAT copolymer	61
ภาพประกอบ 4.9 XRD profiles ของ (a) PLLA และ (b) ST-PLLA blends.....	62
ภาพประกอบ 4.10 DSC first heating thermograms ของ (a) PLLA, PLLA+ 5MWCNT, PLLA-PBAT copolymer, PLLA-PBAT+ 5MWCNT และ (b) ST-PLLA, ST-PLLA+ 5MWCNT, ST-copolymer และ ST-copolymer+ 5MWCNT.....	64
ภาพประกอบ 4.11 DSC cooling thermograms ของ (a) PLLA, PLLA+ 5MWCNT, PLLA-PBAT copolymer, PLLA-PBAT+ 5MWCNT และ (b) ST-PLLA, ST-PLLA+ 5MWCNT, ST-copolymer และ ST-copolymer+ 5MWCNT.....	66

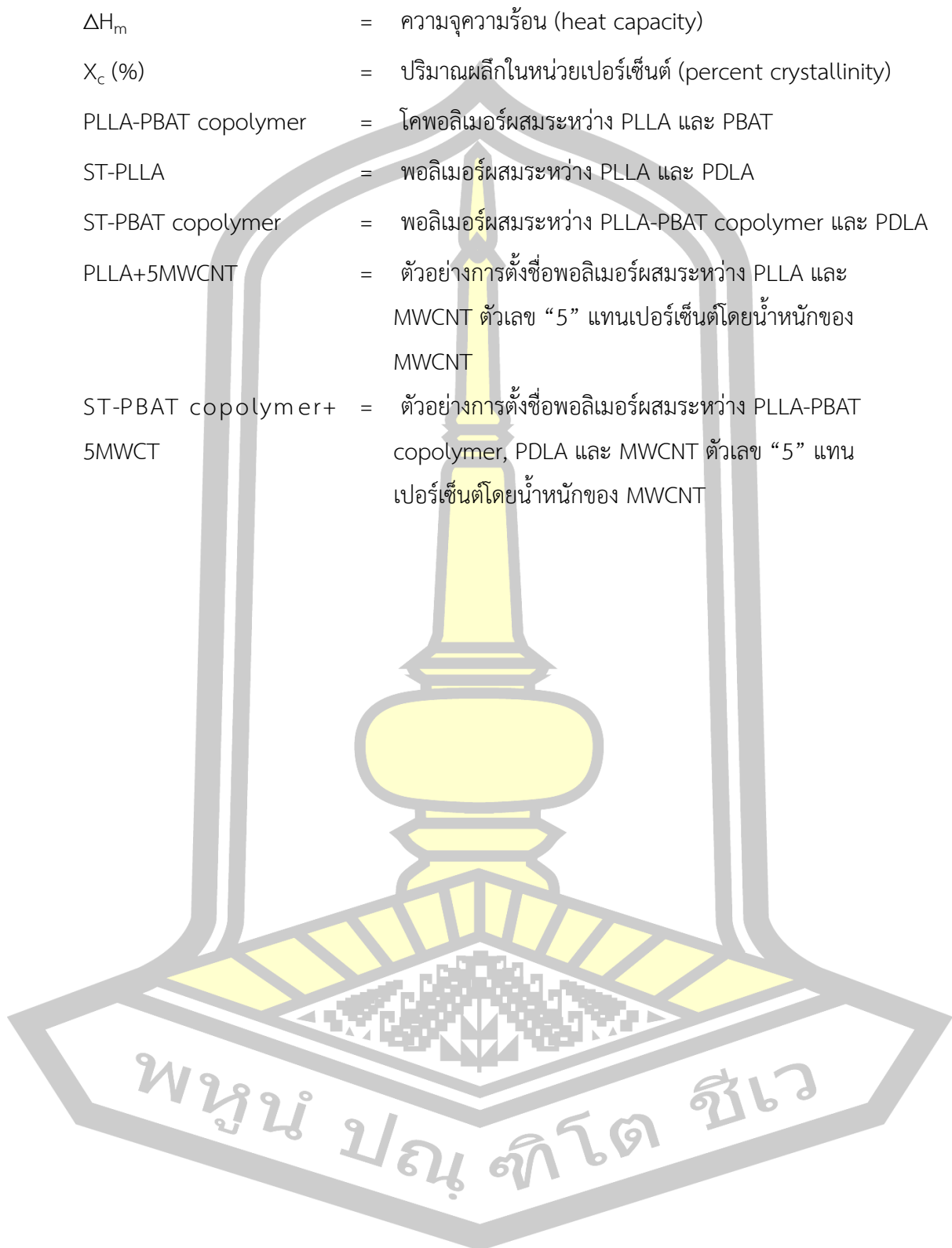
ภาพประกอบ 4.12 DSC second heating thermograms ของ (a) PLLA, PLLA+ 5MWCNT, PLLA-PBAT copolymer, PLLA-PBAT+ 5MWCNT และ (b) ST-PLLA, ST-PLLA+ 5MWCNT, ST-copolymer และ ST-copolymer+ 5MWCNT	69
ภาพประกอบ 4.13 tensile properties ของ PLLA, PLLA+ 5MWCNT, PLLA-PBAT copolymer, PLLA-PBAT+5MWCNT, ST-PLLA, ST-PLLA+5MWCNT, ST-copolymer และ ST-copolymer+ 5MWCNT ของ (a) tensile strength, (b) modulus of elasticity และ (c) elongation at break	72
ภาพประกอบ 4.14 SEM micrographs พื้นผิวแตกหักของ (a) PLLA, (b) PLLA+5MWCNT, (c) PLLA-PBAT copolymer, (d) PLLA-PBAT copolymer+5MWCNT, (e) ST-PLLA, (f) ST-PLLA+5MWCNT, (g) ST-copolymer และ (h) ST-copolymer+5MWCNT	74
ภาพประกอบ 4.15 TGA thermograms ของ (a) PLLA, PLLA-PBAT copolymer and their blends with MWCNTs, and (b) ST-PLLA, ST-copolymer และ their blends with MWCNTs	76



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

wt%	=	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
PLA	=	พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid)
PLLA	=	พอลิแอลแลคติกแอซิด (poly (L-lactic acid))
PDLA	=	พอลิดีแลคติกแอซิด (poly (D-lactic acid))
ST	=	สเตอริโอคอมเพล็กซ์ (stereocomplex)
PBAT	=	พอลิบิวทีเรตอะดิเพตเทเรฟทาเลท (polybutyrate adipate terephthalate)
MWCNT	=	ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (multi-walled carbon nanotubes)
Sn(Oct) ₂	=	ตัวเร่งปฏิกิริยาพื้นฐาน (stannous octanoate)
GPC	=	เจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟี (gel permeation chromatography)
NMR	=	นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (nuclear magnetic resonance)
FTIR	=	อินฟราเรดสเปกโตรสโคปีฟูเรียร์ (fourier-transform infrared spectroscopy)
XRD	=	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer)
DSC	=	ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter)
SEM	=	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope)
T _g	=	อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature)
T _c	=	อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature)
T _{cc}	=	อุณหภูมิการเกิดผลึกขณะให้ความร้อน (cold crystallization temperature)
T _m	=	อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature)

ΔH_m	= ความจุความร้อน (heat capacity)
X_c (%)	= ปริมาณผลึกในหน่วยเปอร์เซ็นต์ (percent crystallinity)
PLLA-PBAT copolymer	= โคพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLLA และ PBAT
ST-PLLA	= พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLLA และ PDLA
ST-PBAT copolymer	= พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLLA-PBAT copolymer และ PDLA
PLLA+5MWCNT	= ตัวอย่างการตั้งชื่อพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLLA และ MWCNT ตัวเลข “5” แทนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ MWCNT
ST-PBAT copolymer+ 5MWCT	= ตัวอย่างการตั้งชื่อพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLLA-PBAT copolymer, PDLA และ MWCNT ตัวเลข “5” แทนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ MWCNT



1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการทำวิจัย

บรรจุภัณฑ์ส่วนมากเป็นพลาสติกประเภทใช้ครั้งเดียว (single-use plastics) ที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน โดยพลาสติกเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตจากปิโตรเลียมและมักกลายเป็นขยะในทะเล (Marine Litter) บางส่วนอาจแตกสลายเป็นเศษพลาสติกชิ้นเล็ก ๆ (เล็กกว่า 5 มิลลิเมตร) หรือที่เรียกกันว่าไมโครพลาสติก (Microplastics) ซึ่งจะปนเปื้อนอยู่ในน้ำและอากาศ และส่งผลกระทบต่อสุขภาพหากเข้าสู่ร่างกาย [1]

ในช่วงศตวรรษที่ 19 อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์มีบทบาทอย่างชัดเจน มีจำนวนผู้ประกอบการเพิ่มขึ้นตามการขยายตัวของตลาด โดยบรรจุภัณฑ์เหล่านี้จะช่วยทำหน้าที่ทั้งป้องกันสินค้าภายในและเป็นตัวส่งเสริมการขายไปในตัวด้วย ที่ผ่านมามาตราฐานได้มีความพยายามที่จะสร้างความตระหนักให้แก่ผู้ประกอบการในเรื่องกฎระเบียบต่าง ๆ เพื่อให้เกิดการปรับตัวและสามารถรองรับกฎระเบียบใหม่ ๆ เหล่านี้ และที่ผ่านมาผู้ผลิตของไทยได้ดำเนินการปรับปรุงกระบวนการจัดการให้มีประสิทธิภาพและมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิตโดยการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ รวมทั้งพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ตรงต่อความต้องการของผู้บริโภค เช่น “พลาสติกชีวภาพ” หรือวัสดุพลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม พลาสติกชีวภาพ (Bio-plastic) ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ ตลาดมีแนวโน้มที่จะให้ความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมหรือการลดภาวะโลกร้อน การรณรงค์ให้รีไซเคิล และการใช้ไบโอพลาสติกที่มีคุณสมบัติย่อยสลายเร็ว [2]

โดยในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์มีแนวโน้มที่จะเกิดความเสียหายจากการคายประจุไฟฟ้าสถิต (ESD) ซึ่งวัสดุหลากหลายได้รับการพัฒนาเพื่อบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความละเอียดอ่อนและป้องกันความเสียหายระหว่างการจัดเก็บและการจัดส่ง โดยพบว่าเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตสามารถป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิตได้เป็นอย่างดี จึงมีการใช้งานจำนวนมากในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีการใช้สารเติมแต่งที่มีความต้านทานไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ มีอยู่ในปัจจุบัน เช่น คาร์บอนแบล็ค (CB) คาร์บอนไฟเบอร์ (CF) และท่อนาโนคาร์บอน (CNT) เป็นต้น [3] ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิตนั้นไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเติมแต่งและความเข้มข้นเท่านั้น [4] ยังขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่อาจทำให้เกิดความแปรปรวนของความต้านทานไฟฟ้ากับตำแหน่งในผลิตภัณฑ์เดียวกัน ยิ่งไปกว่านั้นสารเติมแต่งที่มีปริมาณคาร์บอนสูง มีผลกระทบเชิงลบต่อ

ความสามารถในการผลิตและสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเพิ่มขึ้น และทนต่อแรงกระแทกลดลง การปนเปื้อนก็เป็นปัญหาสำคัญเช่นกัน เนื่องจากผงคาร์บอนมีแนวโน้มที่จะเป็นคราบและทำให้เกิดการปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อมในการนำไปใช้งาน ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่ท้าทายในการพัฒนาคอมโพสิตป้องกันไฟฟ้าสถิตให้มีความสะอาด ซึ่งมีความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวและป้องกันไฟฟ้าสถิตได้อย่างสม่ำเสมอ

ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) เป็นวัสดุที่มีสมบัติโดดเด่นหลายประการ [5] เช่น มีค่าการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนเป็นเลิศ เป็นได้ทั้งวัสดุตัวนำหรือกึ่งตัวนำ โดยเมื่อนำแผ่นแกรฟีนมาม้วนให้มีรูปร่างเป็นท่อจะได้ท่อนาโนคาร์บอนโดยเกิดการเปลี่ยนแปลงพันธะจากไฮบริดออร์บิทัลแบบ sp^2 ของแผ่นแกรฟีนเป็นพันธะที่อยู่ระหว่าง sp^2 และ sp^3 ที่มีการโค้งงอ หรือม้วนงอซึ่งเกิดในท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งทำให้เกิดความเครียดของพันธะ (bond strain) มากขึ้น เพราะต้องมีการเหนี่ยวรั้งเพื่อให้มีการโค้งงอ ปริมาณของความเครียดพันธะขึ้นกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของการม้วน ถ้าท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเล็กมากจะมีความเป็น sp^3 มากกว่า มีความเครียดพันธะมากกว่า แต่ถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ขึ้น พันธะก็ผ่อนคลายมากขึ้นมีความเครียดพันธะลดลง และมีความใกล้เคียงกับแผ่นแกรฟีนมากยิ่งขึ้นไปด้วย ซึ่งจะมีความเป็น sp^2 มากกว่านั่นเอง [6] จึงทำให้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นที่นิยมในการเสริมการนำไฟฟ้าในวัสดุคอมโพสิต และฟิล์มที่ใช้ในการประยุกต์ใช้งาน ESD จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ในช่วง 10^6 - 10^9 Ω [7] โดยมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Srihata W. และคณะ [8] ได้ศึกษาสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าของวัสดุ ESD ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมโดยใช้ฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพไคโตซานผสมเจลาตินที่เติมกราฟีนออกไซด์รีดิวซ์ (rGO) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า rGO สามารถปรับปรุงความต้านทานไฟฟ้าของคอมโพสิตชีวภาพดังกล่าว และทำให้เหมาะสมกับการใช้งาน ESD เหมาะสำหรับการใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์อยู่ที่ประมาณ 9.87×10^7 - 6.89×10^6 Ω ปฐมพงศ์ และคณะ [9] ได้ศึกษาอิทธิพลของการเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของยางธรรมชาติ พบว่ายางธรรมชาติที่ไม่เติมท่อนาโนคาร์บอนมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงทำให้ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าสูง เมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณร้อยละ 3, 4 และ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 2.73, 7.25 และ 14.49×10^6 Ω ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าสภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามปริมาณท่อนาโนคาร์บอนที่มากขึ้น โดยค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างที่เติมท่อนาโนคาร์บอนปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อาจเกิดจากการกระโดดผ่านช่องว่างเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากปริมาณท่อนาโนคาร์บอนยังน้อย จึงทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีค่าสูง เมื่อเพิ่มปริมาณท่อนาโนคาร์บอนมากขึ้นทำให้โอกาสในการเชื่อมต่อหรือซ้อนทับกันของท่อนาโนคาร์บอนมีมากขึ้นทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลง ส่วนงานวิจัยของ Poosala และคณะ [10] ได้กล่าวว่า การกระจายตัวแบบสม่ำเสมอและการรวมตัวของท่อนาโน

คาร์บอนคาร์บอนที่ดำในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้การก่อตัวของสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่ดำเนินการสูงถึงมีปริมาณท่อนานคาร์บอนคาร์บอนต่ำ

พอลิแลคติกแอซิด (poly (lactic acid), PLA) สังเคราะห์ได้จากกรดแลคติก (lactic acid) ซึ่งสามารถผลิตได้จากการหมักแป้งหรือน้ำตาล เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเตอร์ที่มีสายโซ่ตรง (aliphatic polyester) ดังนั้นพืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวสาลี หรือ อ้อย จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ ซึ่งทรัพยากรเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นทดแทนใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง (renewable resource) ทั้งนี้ PLA สามารถนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกได้ เช่นเดียวกับเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียม เช่น บรจุภัณฑ์ เส้นใย พิล์ม [11] และชิ้นส่วนที่ใช้ในทางการแพทย์ เป็นต้น อีกทั้ง PLA ยังมีสมบัติพิเศษคือมีความใส แข็ง สามารถย่อยสลายได้เองเมื่อนำไปฝังกลบในดินและมีอุณหภูมิหลอมอยู่ในระดับสูงพอสมควร ไม่ย่อยสลายในสภาพแวดล้อมทั่วไป แต่ขณะเดียวกัน PLA ก็ยังคงมีสมบัติบางประการที่เป็นข้อเสียหรือข้อจำกัด ซึ่งต้องมีการปรับปรุงก่อนนำไปใช้งาน คือมีลักษณะค่อนข้างเปราะ ทนความร้อนต่ำ และราคาที่ยังคงแพงเมื่อเทียบกับพลาสติกทั่วไป [12] จึงยังคงต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีในการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกย่อยสลายได้เหล่านี้ก่อน เพื่อให้ได้เป็นวัสดุผสมชีวภาพ (bio-composites) ที่ย่อยสลายได้ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อให้ใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้จริง และเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในด้านวิศวกรรมพลาสติก และจากข้อจำกัดของ PLA ดังกล่าวข้างต้น จึงทำให้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์จาก PLA โดยการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ เรียกว่า พอลิเมอร์เบลนด์ (polymer blend) เพื่อปรับปรุงสมบัติโดยการนำสมบัติเด่นของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมาผสมกัน เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานมากยิ่งขึ้น ซึ่งปัจจัยสำคัญในการเบลนด์คือความเข้ากันได้ (compatibilization) ซึ่งหมายถึงความเข้ากันได้ในระดับโมเลกุลของพอลิเมอร์ เช่น การทำให้เกิดสเตอริโอคอมเพล็กซ์พอลิแล็กไทด์ (stereocomplex) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA ที่มี 2 ชนิด คือ poly(L-lactic acid) (PLLA) และ poly(D-lactic acid) (PDLA) ทำให้ stereocomplex มีอุณหภูมิการหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 230 องศาเซลเซียส สูงกว่า PLA แบบเดิมถึง 50 องศาเซลเซียส [13] ทำให้พอลิเมอร์สามารถทนต่อความร้อนได้สูงขึ้น และการนำ PLA ผสมกับพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง เช่น พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการขึ้นรูปฟิล์มจากการศึกษาวิจัยพบว่า ในอัตราส่วน PLA/PBAT 80/20 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นจาก 14 เปอร์เซ็นต์ เป็น 50 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า PBAT มีความสามารถในการเพิ่มคุณสมบัติทางกลของฟิล์ม PLA/PBAT [14] และ พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (poly (butylene succinate), PBS) พบว่าค่าการยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PBS ที่ผสมใน PLA [15] ซึ่งการเสริมสภาพความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงที่เป็นไปได้วิธีหนึ่งคือการใช้โค

พอลิเมอร์ (copolymer) ระหว่าง PLA กับพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งโคพอลิเมอร์อาจใช้ในลักษณะเป็นสารเสริมความเข้ากันได้หรือผสมกับ PLA เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเสริมความเหนียว (toughening agent) และจากงานวิจัยของ ยุกาพร และคณะ [16] ศึกษาเกี่ยวกับการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม PLA และ PBAT โดยมี PLA-g-MA เป็นตัวประสานต่อสมบัติต่าง ๆ พบว่าการเติม PBAT ใน PLA มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความยืดหยุ่น ณ จุดแตกหักและค่าความต้านทานการกระแทกของพอลิเมอร์ผสม และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่าความต้านทานแรงดึงและค่ามอดูลัสของยังก์ของ PLA จะลดลง เมื่อใส่ PLA-g-MA ในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PBAT พบว่าช่วยเพิ่มสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากการใส่ PLA-g-MA ส่งผลต่อการปรับปรุงการยึดติดระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

การวิจัยเกี่ยวกับพอลิเมอร์คอมโพสิต PLLA/CNT มุ่งเน้นไปที่การเพิ่มสมบัติเชิงกล การตกผลึก และการนำไฟฟ้าเป็นหลัก อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์คอมโพสิตมีความยืดหยุ่นและทนความร้อนได้ต่ำ [17] ในงานวิจัยนี้ เรารายงาน stereocomplex PLLA-PBAT copolymer/MWCNT nanocomposites ที่เตรียมจาก PLLA-PBAT copolymer, PDLA และ MWCNT ผสมขึ้นรูปฟิล์ม และเราได้ทำการตรวจสอบโครงสร้าง stereocomplex และการเติม MWCNT ว่าส่งผลต่อโครงสร้างทางเคมี ความต้านทานไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกลของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตอย่างไร โดยอันดับแรก เราได้ทำการเพิ่มความยืดหยุ่นของเมทริกซ์ PLLA โดยการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ระหว่าง PLLA-PBAT [18] หลังจากนั้น โคพอลิเมอร์ PLLA-PBAT ถูกผสมกับ PDLA ในอัตราส่วนน้ำหนัก 1:1 เพื่อเพิ่มสมบัติทางความร้อน เช่นเดียวกับรายงานก่อนหน้านี้ของเรา การผสม PLLA กับ PDLA ทำให้เกิดการก่อตัวของสเตอริโอคอมเพล็กซ์ ซึ่งมีอุณหภูมิหลอมละลายประมาณ 225 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิของ PLLA หรือ PDLA ที่เป็นโฮโมคริสตัลไลน์ 50 องศาเซลเซียส [19] โดย stereocomplex PLLA-PBAT copolymer ถูกผสมกับ MWCNT เพื่อสร้างฟิล์มคอมโพสิตนำไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการใช้งานด้านไฟฟ้าสถิต และเท่าที่เราทราบ ยังไม่มีรายงานวรรณกรรมเกี่ยวกับสเตอริโอคอมเพล็กซ์ของนาโนคอมโพสิต PLLA-PBAT copolymer/MWCNT มาก่อน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุทดแทนฟิล์มป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต เพื่อทดแทนการใช้พอลิเมอร์ที่มาจากปิโตรเลียม ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อปรับปรุงสมบัติความยืดหยุ่นของฟิล์ม PLLA โดยการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ระหว่าง PLLA กับ PBAT ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวง (ring opening polymerization)

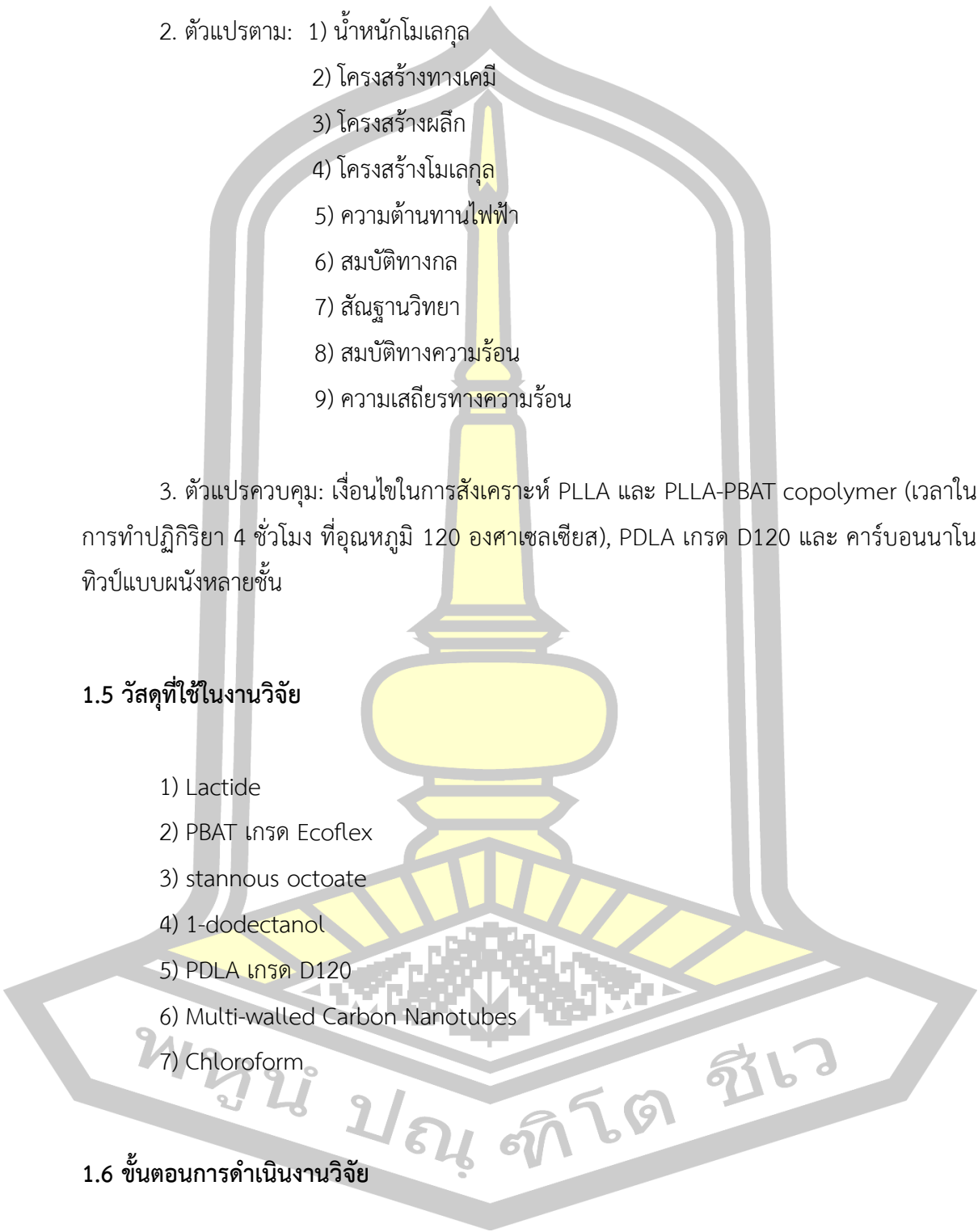
2. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทนความร้อนของโคพอลิเมอร์ PLLA กับ PBAT โดยการผสม PDLA เพื่อให้เป็นสเตอริโอคอมเพล็กซ์
3. เติมห่อนำโนคาร์บอนแบบผงหลายชั้นเพื่อให้ฟิล์มสามารถนำไฟฟ้าได้

1.3 แนวคิดของงานวิจัย

ปัจจุบันบรรจุภัณฑ์ฟิล์มส่วนใหญ่มาจากปิโตรเลียม เกิดเป็นขยะที่ตกค้างในธรรมชาติมากขึ้น และเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต เนื่องจากย่อยสลายได้ยากใช้เวลาเป็น 100 ปี หรือบางประเภทไม่สามารถย่อยสลายได้เลย ในแต่ละปีจึงมีขยะปริมาณมากขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงเป็นการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ซึ่งสังเคราะห์จากพืชจำพวกมันสำปะหลัง ข้าวโพด และน้ำตาล ผ่านกระบวนการทางเคมีได้เป็นพอลิแลคแลติกแอซิด (PLLA) ซึ่งเป็นพลาสติกที่มีสมบัติแข็ง เปราะมีความยืดหยุ่นต่ำ จึงได้นำมาทำการสังเคราะห์เป็นโคพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง เช่น PBAT ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง ซึ่งการทำโคพอลิเมอร์นี้จะทำให้พันธะเคมีของ PLLA กับ PBAT เชื่อมต่อกันระหว่างมอนอเมอร์ทั้งสองชนิด ทำให้ PLLA มีความเหนียว ยืดหยุ่นมากขึ้น และยังลดการแยกเฟสของพอลิเมอร์ เสริมสภาพความเข้ากันได้ เป็นวิธีที่ดีในการแก้ปัญหาความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ผสม แต่อย่างไรก็ตามโคพอลิเมอร์ยังทนความร้อนได้ไม่ดีเท่าที่ควร จึงมีการนำโคพอลิเมอร์ดังกล่าวมาทำการผสมกับ PDLA เพื่อให้มีสมบัติสเตอริโอคอมเพล็กซ์ ซึ่งสามารถทนต่อความร้อนได้สูง โดยมีอุณหภูมิการหลอมเหลวประมาณ 230 องศาเซลเซียส [19, 20] ซึ่งสูงกว่า PLLA ประมาณ 50 องศาเซลเซียส แล้วนำมาผสมกับท่อนำโนคาร์บอนเพื่อให้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าได้ นำวัสดุทั้งหมดมาทำการขึ้นรูปฟิล์มโดยการหล่อขึ้นรูป เพื่อให้ได้เป็นฟิล์มป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต เพื่อความเหมาะสมในการใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น และเป็นวัสดุทดแทนที่สามารถย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมได้อย่างเพียงพอและยั่งยืน

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ตัวแปรต้น: 1) ชนิดของพอลิเมอร์ (PLLA, PLLA-PBAT copolymer)
- 2) ปริมาณ PDLA (ร้อยละ 0 และ 50 โดยน้ำหนัก)
- 3) ปริมาณ MWCNT (ร้อยละ 0 และ 5 โดยน้ำหนัก)

- 
2. ตัวแปรตาม: 1) น้ำหนักโมเลกุล
2) โครงสร้างทางเคมี
3) โครงสร้างผลึก
4) โครงสร้างโมเลกุล
5) ความต้านทานไฟฟ้า
6) สมบัติทางกล
7) สัณฐานวิทยา
8) สมบัติทางความร้อน
9) ความเสถียรทางความร้อน

3. ตัวแปรควบคุม: เงื่อนไขในการสังเคราะห์ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer (เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส), PDLA เกรด D120 และ คาร์บอนนาโนทิวป์แบบผนังหลายชั้น

1.5 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) Lactide
- 2) PBAT เกรด Ecoflex
- 3) stannous octoate
- 4) 1-dodecanol
- 5) PDLA เกรด D120
- 6) Multi-walled Carbon Nanotubes
- 7) Chloroform

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดลอง

3. จัดหาวัสดุและอุปกรณ์

4. ดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติของ PLLA โดยการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์จาก PLLA กับ PBAT ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง ซึ่งเป็นวัสดุใหม่ เพื่อทำหน้าที่เป็นสารเสริมความเหนียว เพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่ PLLA แล้วนำโคพอลิเมอร์ดังกล่าวมาผสมกับ PDLA เพื่อเป็นสเตอริโอคอมเพล็กซ์โดยการหล่อขึ้นรูปฟิล์ม เพื่อให้มีสมบัติทนต่อความร้อนได้สูง ซึ่งสมบัติของฟิล์มที่ต้องการศึกษาคือ สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ขั้นที่ 1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ โดยการสังเคราะห์ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง โดยใช้ lactide เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา และ 1-dodecanol เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับ PLLA ส่วน PLLA-PBAT copolymer ใช้ PBAT เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา และ stannous octoate เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค NMR และ FTIR ตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD และตรวจสอบน้ำหนักโมเลกุลโดย GPC

ขั้นที่ 2 นำ PDLA ผสมสารสังเคราะห์โคพอลิเมอร์จาก PLLA กับ PBAT เพื่อเป็นสเตอริโอคอมเพล็กซ์ ซึ่งโคพอลิเมอร์ที่ได้ใช้เป็นสารเสริมความเหนียวสำหรับสเตอริโอคอมเพล็กซ์ โดยมีอัตราส่วนโคพอลิเมอร์/PDLA เป็นร้อยละ 50 ต่อ 50 โดยน้ำหนัก เติมห่อนานโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่อัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำสารสังเคราะห์ที่อัตราส่วนต่างๆ มาละลายในคลอโรฟอร์ม ที่อัตราส่วนคลอโรฟอร์มต่อพอลิเมอร์ 90 ต่อ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่องกวนสารละลายเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนกระทั่งได้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ขั้นที่ 3 ทำการวิเคราะห์ชิ้นงานทดสอบ โดยศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะทางสัณฐานวิทยา

1. การวัดค่าการนำไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัดแบบดิจิตอลยี่ห้อ KEITHLEY รุ่น DMM7510
2. การศึกษาสมบัติทางกลโดยจะทำการทดสอบความต้านทานแรงดึง โดยเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Testing)
3. การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยใช้เครื่อง DSC-4000 เพื่อวิเคราะห์หาอุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิคลายแก้ว พฤติกรรมการเกิดผลึก

4. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD
5. การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี FTIR
6. การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล NMR
7. การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา เพื่อศึกษาลักษณะของพื้นผิวและการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
8. การทดสอบความเสถียรภาพทางความร้อน (Thermo Gravimetric Analysis)
9. การทดสอบน้ำหนักโมเลกุลด้วยเทคนิค GPC
10. วิเคราะห์ผลที่ได้
11. สรุปผล
12. รายงานผลการวิจัย

1.7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถปรับปรุงความแข็งแรงเปราะของ PLLA โดยการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ PLLA กับ PBAT เพื่อให้ PLLA มีความเหนียว ยืดหยุ่นมากขึ้น
2. สามารถปรับปรุงความสามารถในการทนความร้อนของ PLLA โดยการผสมกับ PDLA เพื่อเป็นสเตอริโอคอมเพล็กซ์ ซึ่งมีสมบัติทนความร้อนสูงได้
3. สามารถผลิตฟิล์มเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ โดยการเติมสารนำไฟฟ้า เช่น ท่อนาโนคาร์บอน

พูน ปณ จิต ชีเว

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเป็นมาและภูมิหลัง

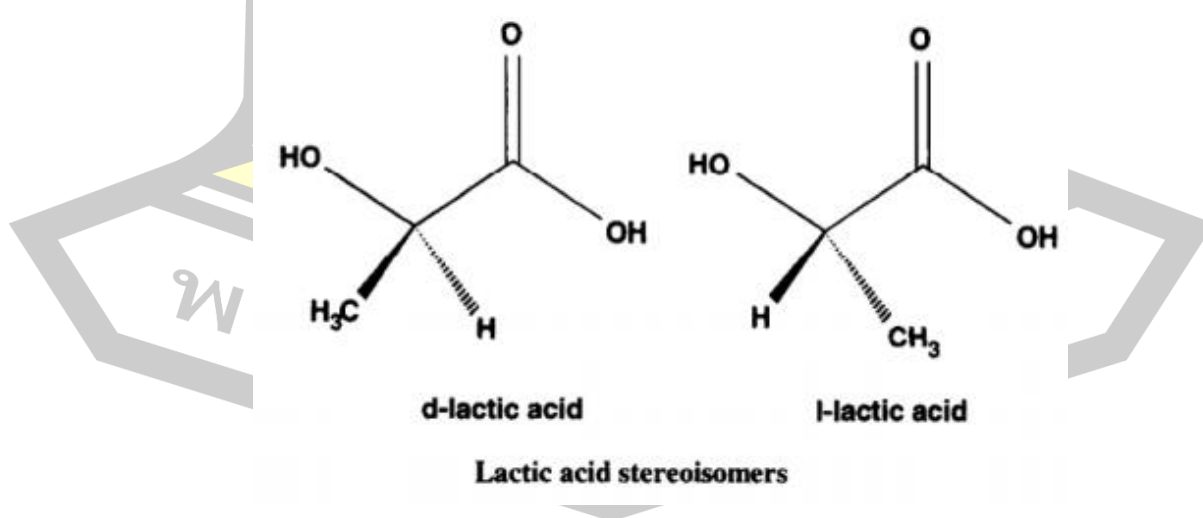
พลาสติกมีปริมาณการใช้งานสูงโดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์พลาสติกต่าง ๆ ที่มีอายุการใช้งานสั้น ส่วนใหญ่มีต้นกำเนิดผลิตมาจากปิโตรเคมีและไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา เช่น เมื่อนำไปฝังกลบจะทำให้เกิดการรั่วไหลของสารเคมีที่เป็นอันตราย อีกทั้งยังมีเศษพลาสติกที่หลงเหลือในธรรมชาติ เช่น ในป่าหรือในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ทำให้เกิดอันตรายต่อสัตว์ป่าและสิ่งมีชีวิตทั้งบนบกในน้ำ หากถูกกลืนกินเข้าไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาแนวทางแก้ปัญหาดังกล่าว พลาสติกชีวภาพจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ทั้งในด้านวัตถุดิบ กระบวนการผลิต และกระบวนการกำจัด นักวิจัยให้ความสนใจศึกษากันอย่างกว้างขวาง คือการพัฒนาสมบัติของพอลิเมอร์ชีวภาพ (bioplastic) เพื่อนำมาใช้ทดแทนพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพ ปริมาณการใช้งานและการผลิตพลาสติกชีวภาพจึงเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีได้มีการประมาณการไว้ว่าในปี 2020 จะมีปริมาณการผลิตพลาสติกชีวภาพประมาณ 3.45 ล้านตัน [1] โดยที่พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid, PLA) ซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพที่ได้รับความนิยมอย่างมากชนิดหนึ่ง เนื่องจาก PLA ผลิตจากกรดแลคติกที่ได้จากการหมักแป้งและน้ำตาลจากพืชต่าง ๆ เช่น มันสำปะหลัง ข้าวโพด อ้อย และพืชตระกูลแป้งต่าง ๆ ที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ รวมทั้งยังสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพอย่างสมบูรณ์ [21] นอกจากนี้ PLA ยังมีสมบัติที่น่าสนใจหลายอย่าง เช่น มีค่าโมดูลัสสูง มีความแข็งแรงสูงและสามารถเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตโดยไม่มีความเป็นพิษ จึงได้มีการใช้ PLA ในการผลิตบรรจุภัณฑ์ ฟิล์ม และอุปกรณ์ทางการแพทย์ต่าง ๆ [22] อย่างไรก็ตาม PLA ยังมีข้อด้อยในด้านความเปราะ มีความยืดหยุ่นน้อย [23] และทนต่อความร้อนต่ำ ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการใช้งานในด้านอื่น ๆ ที่หลากหลายได้ [24]

วิธีการลดความเปราะหรือเพิ่มความยืดหยุ่นของสเตอริโอคอมเพล็กซ์ที่มีการศึกษากันในปัจจุบัน เช่น การผสมกับพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง เช่น กลุ่มอิลาสโตเมอร์หรือยาง [25, 26] นอกจากนี้ยังมีการเติมบล็อก หรือกราฟต์โคพอลิเมอร์เป็นเทคนิคหนึ่งที่มีความนิยมในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ เช่น การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ระหว่าง PLA กับ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (polybutylenesuccinate) [27] และโคพอลิเมอร์ระหว่าง PLA กับ พอลิบิวทิลีนโคเทอเรพทาเลต (poly (butylene adipate-co-terephthalate)) [28]

วิธีเพิ่มความสามารถในการทนต่อความร้อนของ PLA มีการวิจัยกันอย่างกว้างขวางโดยผลิต PLA ที่มีโครงสร้างแบบสเตอริโอคอมเพล็กซ์ ซึ่งเกิดจากนำ PLLA และ PDLA มาผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสม ซึ่งทำให้ stereocomplex มีอุณหภูมิการหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 230 องศาเซลเซียส สูงกว่า PLA แบบเดิมถึง 50 องศาเซลเซียส [29-31] ซึ่งการตกผลึกระหว่าง PLLA และ PDLA ในรูปแบบ Stereocomplex พบว่าไม่เพียงแต่ทำให้สมรรถนะเชิงกล [32] และความเสถียรทางความร้อนดีขึ้น [33] แต่ยังมีความต้านทานต่อการสลายตัวได้อีกด้วย [34, 35]

2.2 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid or PLA)

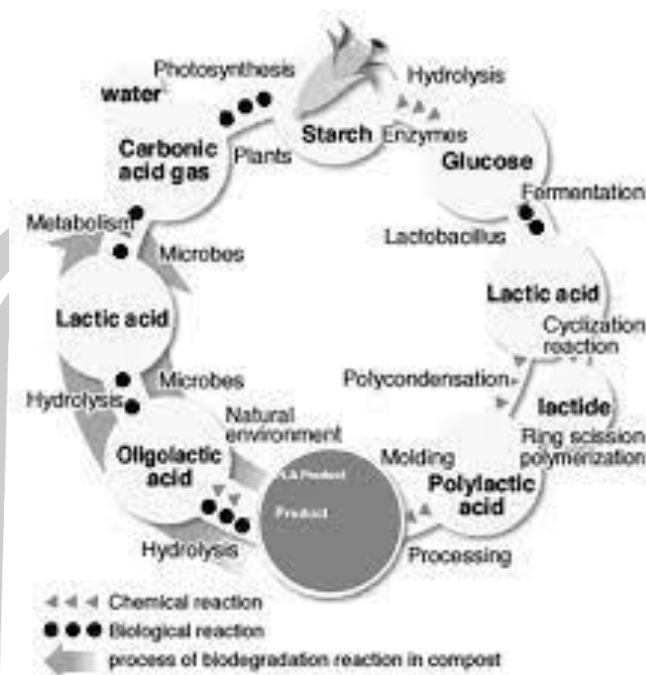
พอลิแลคติกแอซิด (poly (lactic acid)) หรือ PLA เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมจากกรดแลคติก (lactic acid หรือ 2-hydroxypropionic acid) ซึ่งมี 2 ไอโซเมอร์ที่แตกต่างกัน [36] ได้แก่ ไอโซเมอร์แบบดี (D-(-)-lactic) และ ไอโซเมอร์แบบแอล (L-(+)-lactic acid) ดังแสดงโครงสร้างไว้ในภาพประกอบ 2.1 คือมีสูตรเคมีเหมือนกัน การจัดเรียงตัวในสามมิติไม่เหมือนกัน และมีการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ในทิศทางต่างกัน ในธรรมชาติส่วนใหญ่พบในรูปแบบแอล-ไอโซเมอร์หรือในรูปของผสมระหว่างแอล-ไอโซเมอร์ และดี-ไอโซเมอร์ เรียกว่าของผสมราซิมิก (racemic mixture, อัตราส่วน = 1:1 เขียนแทนด้วย DL) หรือ สารประกอบมีโซ (meso-compound) ที่ไม่มีสมบัติบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (optically inactive)



ภาพประกอบ 2.1 โครงสร้างของกรดแลคติก [39]

ในปัจจุบันการผลิตกรดแลกติกใช้การหมักเป็นหลักซึ่งสามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสง (optical purity) ที่ดี กรดแลกติกสามารถสังเคราะห์ได้ทั้งทางเคมีและชีวภาพ การสังเคราะห์ด้วยวิธีการทางเคมีจะให้กรดแลกติกทั้งแบบ poly (D-lactic acid) หรือ PDLA และ poly (L-lactic acid) หรือ PLLA จากภาพประกอบ 2.2 แสดงวัฏจักรของ PLA ซึ่งผลิตได้จากการหมักแป้งหรือน้ำตาลซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต PLA โดยแป้งและน้ำตาลที่ได้จะผ่านกระบวนการหมักโดยแบคทีเรียเพื่อได้เป็นกรดแลกติกที่เป็นมอนอเมอร์ในการสังเคราะห์ PLA และมีความบริสุทธิ์ของ PLA ที่เตรียมได้จากแบคทีเรียคือกรดแลกติกสามารถสังเคราะห์จากกลูโคสโดยผ่านกระบวนการไกลโคไลซิส ซึ่งจะเปลี่ยนกลูโคสเป็นกรดไพรูวิก (pyruvic acid) ที่อยู่ในรูปของคอนจูเกตเบส (conjugate base) หรือไพรูเวต (pyruvate) โดยแบคทีเรียหลายชนิดจะมีเอนไซม์ที่ชื่อว่า Lactate dehydrogenase (LDH) ที่สามารถเปลี่ยนไพรูเวตเป็นแลคเตต (lactate) หรือคอนจูเกตเบสของกรดแลกติกนั่นเอง กลูโคสหนึ่งโมเลกุลใช้สังเคราะห์กรดแลกติกได้สองโมเลกุล ความบริสุทธิ์ของกรดแลกติกขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียและความจำเพาะของเอนไซม์ LDH [37, 38] สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เมื่อนำไปฝังกลบในดินโดยใช้ระยะเวลาอันสั้น เมื่อเทียบกับพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจากกรดแลกติกมีสองไอโซเมอร์ สายโซ่หลักของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่อาจประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ชนิดแอล-ไอโซเมอร์เกือบทั้งหมด จะได้เป็นพอลิแอล-แลกติกแอซิด (poly(L-lactic acid) : PLLA) หรือประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ที่เป็นของผสมราซิมิกจะได้พอลิดีแอล-แลกติกแอซิด (poly(D,L-lactic acid) : PDLLA) ปัจจุบันการผลิตดี-ไอโซเมอร์ของกรดแลกติกบริสุทธิ์ทำได้ยาก การผลิตพอลิเมอร์ที่สายโซ่หลักประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดดีหรือพอลิดี-แลกติกแอซิด (poly(D-lactic acid) : PDLA) ยังไม่มีในเชิงพาณิชย์ โดยไอโซเมอร์ที่แตกต่างกันส่งผลต่อความเป็นผลึก (crystalline) ของพอลิเมอร์ กล่าวคือ PLLA จะมีความเป็นผลึกสูง ในขณะที่ PDLA จะมีความเป็นอสัณฐาน (amorphous) สูง





ภาพประกอบ 2.2 วัฏจักรชีวิต PLA [39]

การใช้งานพอลิแลคติกแอซิดในด้านต่าง ๆ เนื่องจากมีลักษณะที่น่าสนใจทั้งด้านความเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อของร่างกาย (biocompatibility), ความย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradability), และสมบัติทางกล เช่น

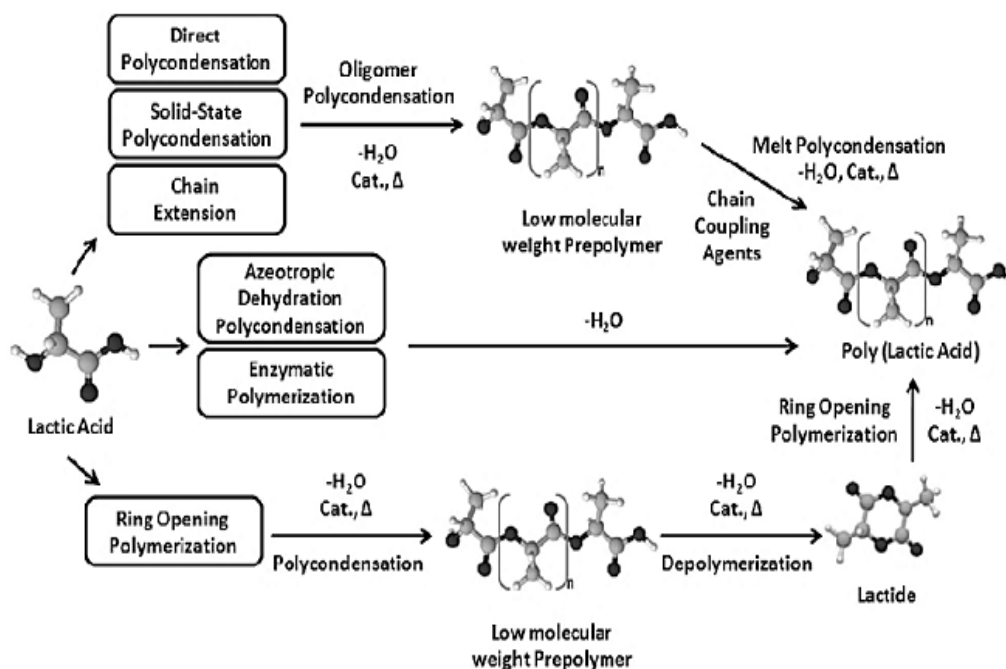
- ระบบนำส่งยา (Drug Delivery Systems): PLA สามารถนำมาใช้ในระบบนำส่งยา เนื่องจากมีความปลอดภัยต่อร่างกาย และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. ในกรณีนี้, PLA สามารถถูกใช้ในการผลิตเส้นใยหรือลูกคลื่นที่มียาที่ต้องการในการนำส่ง
- วิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue Engineering): PLA มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในงานวิศวกรรมเนื้อเยื่อ เนื่องจากสามารถให้โครงสร้างที่เหมือนกับเนื้อเยื่อจริง และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพทำให้ไม่ต้องทำการถอดออกจากร่างกาย
- งานเคลือบ (Coating Applications): PLA ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเคลือบในต่าง ๆ นามว่า "biocoatings" ที่มีการใช้ในงานเคลือบที่ทำให้วัสดุเป็นที่ยอมรับได้มากขึ้นในระดับชีวภาพ
- บรรจุภัณฑ์ (Packaging): PLA มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากมีความเข้ากันได้ดีกับอาหาร และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพหลังจากการใช้งาน เป็นต้น

2.3 การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด (Synthesis methods for PLA)

การผลิต PLA สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การผลิตโดยการหมักจากวัตถุดิบทางธรรมชาติ และการผลิตโดยการสังเคราะห์ โดยการผลิต PLA โดยวิธีการหมักจากวัตถุดิบทางธรรมชาติ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคือ แป้งที่มาจากแหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่เกิดขึ้นใหม่ได้ (renewable resource) ได้แก่ พืชที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลัง โดยมีกระบวนการผลิตเริ่มต้นจากการบดหรือม่พืชนั้นให้ละเอียดเป็นแป้ง จากนั้นทำการย่อยแป้งให้ได้เป็นน้ำตาล และนำไปหมัก (fermentation) ด้วยจุลินทรีย์เกิดเป็นกรดแลคติก (lactic acid : $C_3H_6O_3$) ซึ่งมีกรรมวิธีคล้ายการหมักเบียร์ จากนั้นนำกรดแลคติกที่ได้มาผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นสารใหม่ที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน เรียกว่า แลคไทด์ (lactide) หลังจากนั้นนำมากลั่นในระบบสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ของแลคไทด์ที่เป็นสายยาวขึ้น เรียกว่า พอลิแลคติกแอซิด โดยคุณสมบัติของ PLA ขึ้นกับการกำหนดความยาวของสายพอลิเมอร์ ทั้งนี้ PLA สามารถนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกได้เช่นเดียวกับเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียม

การผลิต PLA โดยการสังเคราะห์ สามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธี จากภาพประกอบ 2.3 เช่น ปฏิกิริยาควบแน่นโดยตรง (direct polycondensation) ปฏิกิริยาการควบแน่นในสถานะของแข็ง (solid-state polycondensation) ปฏิกิริยาต่อสายโซ่ (chain extension) ปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอะซีโอโทรปิก (azeotropic dehydration polycondensation) ปฏิกิริยาควบแน่นโดยเอนไซม์ (enzymatic polycondensation) และการสังเคราะห์โดยการเปิดวง (ring-opening polycondensation) [40]





ภาพประกอบ 2.3 การสังเคราะห์ PLA [41]

ปฏิกิริยาควบแน่นของกรดแลคติกและตามด้วยปฏิกิริยาคู่ควบ (condensation polymerization and coupling reaction)

เมื่อนำกรดแลคติกแอซิดมาผ่านปฏิกิริยาควบแน่นจะเกิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งมีลักษณะแข็งเปราะยังไม่เหมาะกับการใช้งาน จะต้องนำไปทำปฏิกิริยาคู่ควบเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น ตัวอย่างสารคู่ควบที่ใช้ได้แก่ สารในกลุ่มไดไอโซไซยาเนต (diisocyanates) เช่น 1,6-hexamethylene diisocyanate และ 1,4-butanediisocyanate. ตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำกับสารคู่ควบที่ใช้ในการเตรียมพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลสูง [42]

สารคู่ควบที่เติมลงไปจะเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลหรือหมู่คาร์บอกซิลที่อยู่ปลายโซ่พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่โดยส่วนใหญ่หมู่ไฮดรอกซิลจะว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่า ดังนั้นก่อนทำปฏิกิริยาคู่ควบมักมีการดัดแปรหมู่ฟังก์ชันปลายโซ่พอลิแลคติกแอซิดให้เป็นหมู่ไฮดรอกซิลทั้งหมด โดยการเติมสารประกอบที่มีหมู่ไฮดรอกซิล 2 หมู่ด้านปลาย เช่น cis-2-butene-1, 4-diol อย่างไรก็ตามการทำปฏิกิริยาคู่ควบมีผลให้ขั้นตอนการเตรียมมีความซับซ้อนและราคาสูงขึ้น

ปฏิกิริยาควบแน่นกำจัดน้ำด้วยตัวทำละลายอะซีโอโทรป (azeotropic dehydrative condensation)

ปฏิกิริยานี้ประกอบไปด้วยการกลั่นลดความดันของกรดแลคติกเพื่อกำจัดน้ำออกไปและเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ข้อดีของการเตรียมพอลิแลคติกแอซิดด้วยปฏิกิริยานี้คือการคงค่าของตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ต้องใช้ในปริมาณค่อนข้างสูงเพื่อให้ได้พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง อย่างไรก็ตาม ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขโดยการเติมกรดฟอสฟอริกหรือกรดไพรอฟอสฟอริก เพื่อกำจัดความว่องไวของตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่หลงเหลือหรือกรองตัวริเริ่มปฏิกิริยาออกโดยการเติมกรดซัลฟริก [43]

2.4 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (ring-opening polymerization, ROP)

เทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงแลคไทด์เพื่อเตรียมพอลิแลคติกน้ำหนักโมเลกุลสูง ($M_w > 100,000$) ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท DuPont ในปี ค.ศ. 1954 แลคไทด์ที่ใช้ในปฏิกิริยาเตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาการผันกลับของพอลิเมอไรเซชันของพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำภายใต้สภาวะการลดความดัน ซึ่งจะได้แลคไทด์ที่มีไอโซเมอร์ต่าง ๆ กันได้แก่ ไอโซเมอร์แบบแอล (L-lactide) ไอโซเมอร์แบบดี (D-lactide) และไอโซเมอร์ผสมระหว่างดีกับแอลหรือเรียกว่า ไอโซเมอร์แบบเมโซ (meso-lactide หรือ D,L-lactide) ผสมอยู่ด้วยกัน โดยปริมาณไอโซเมอร์ของแลคไทด์ที่ปรากฏขึ้นอยู่กับไอโซเมอร์ของกรดแลคติกที่ใช้ อุณหภูมิและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา [43]

จากที่กล่าวไปข้างต้นพอลิแลคติกแอซิดสังเคราะห์มาจากกรดแลคติกที่มี 2 ไอโซเมอร์ ได้แก่ ไอโซเมอร์แบบแอล และ ไอโซเมอร์แบบดี ดังนั้น พอลิแลคติกแอซิดอาจมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยไอโซเมอร์แบบแอลทั้งหมดหรือประกอบไปด้วยไอโซเมอร์แบบดีทั้งหมด หรือบางครั้งโครงสร้างของสายโซ่มีทั้งไอโซเมอร์แบบดีและแอล [44] สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด เช่น น้ำหนักโมเลกุล จุดหลอมเหลว ปริมาณผลึก และสมบัติทางกล จึงถูกควบคุมด้วยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนและการจัดเรียงของไอโซเมอร์แบบแอลและแบบดีในสายโซ่ [45] ถ้า PLA ประกอบไปด้วยไอโซเมอร์แบบแอลหรือแบบดีทั้งหมดจะได้เป็นพอลิแลคติกแอซิดชนิดพอลิแอลแลคติกแอซิด (poly(L-lactic acid), PLLA) และพอลิดีแลคติกแอซิด (poly(D-lactic acid), PDLA) ตามลำดับ ทั้ง PLLA และ PDLA จะเป็นพอลิเมอริกผลึก อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) จะอยู่ในช่วง 130 - 180 องศาเซลเซียส ปริมาณผลึกและอุณหภูมิการหลอมเหลวของ PLA จะลดลงเมื่อมีไอโซเมอร์ที่แตกต่างกัน ไอโซเมอร์หลักผสมอยู่ด้วย ถ้าเป็นพอลิดีแอลแลคติกแอซิด (poly(D,L-lactic acid), PDLLA) ที่เตรียมจากแลคไทด์ที่มีไอโซเมอร์แบบเมโซ (meso-lactides) ซึ่งสายโซ่ประกอบด้วยไอโซเมอร์แบบแอลสลับกับไอโซเมอร์แบบดี จะมีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน (amorphous polymer) ผลของสเตอริโอเคมี (stereochemistry) และปริมาณผลึกที่มีต่อสมบัติทางกลของพอลิแลคติกแอซิดแสดงไว้ในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 ผลของสเตรียโอเคมีและปริมาณผลึกที่มีต่อสมบัติทางกลของพอลิแลคติกแอซิด [40]

สมบัติทางกล	พอลิแลคติกแอซิด	
	PLLD	PDLA
Yield strength (MPa)	70	53
Tensile strength (MPa)	59	44
Flexural strength (MPa)	106	88
Notch Izod impact (J/m)	26	18
Vicat Penetration (°C)	59	52

โพลิเมอร์ของ PLA คือผงสีขาวที่อุณหภูมิห้องโดยมีค่า T_g และ T_m ประมาณ 55 องศาเซลเซียส และ 175 องศาเซลเซียส ตามลำดับ PDLA, PLLA และ PDLLA ละลายได้ในตัวทำละลายทั่วไป เช่น เบนซีน คลอโรฟอร์ม ไดออกเซน ฯลฯ และสลายตัวโดยการไฮโดรไลซิสอย่างง่ายของพันธะเอสเทอร์ แม้ในกรณีที่ไม่มีไฮโดรเลสก็ตาม ลักษณะปรากฏของพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลสูง คือ ไม่มีสี มันวาว และแข็ง ไอโซเมอร์ทั้งสองของ LA สามารถผลิตวัสดุที่แตกต่างกันได้ 4 ชนิด ได้แก่ พอลิ (D-lactic acid) (PDLA) ซึ่งเป็นวัสดุผลึกที่มีโครงสร้างสายโซ่ปกติ พอลิ (กรดแอลแลคติก) (PLLA) ซึ่งเป็นเฮมิคริสตัลไลน์ และเช่นเดียวกันกับโครงสร้างลูกโซ่ปกติ พอลิ (D,L-lactic acid) (PDLLA) ซึ่งไม่มีรูปร่าง และ meso-PLA ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ meso-lactide สมบัติทางกายภาพของ PLA ที่แปรผันไปตามอัตราส่วนของไอโซเมอร์ แสดงไว้ในตาราง 2.2

ตาราง 2.2 สมบัติทางกายภาพของพอลิแลคติกแอซิด [46]

สมบัติทางกายภาพ	PDLA	PLLA	PDLLA
Crystalline structure	Semicrystalline	Semicrystalline	Amorphous
Melting temperature (T_m)/°C	~180	~180	-
Glass transition temperature (T_g)/°C	55-60	55-60	Variable
Elongation at break/(%)	20-30	20-30	Variable
Decomposition temperature/°C	~200	~200	185-200
Half-life in 37°C normal saline	8-10 months	4-6 months	2-3 months

2.5 ข้อดีและข้อจำกัดของพอลิแลคติกแอซิด

ข้อดีของพอลิแลคติกแอซิดเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีความใส มีสมบัติเชิงกลที่ดี ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต สามารถเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อของร่างกาย มีความต้านทานต่อน้ำมันและไขมันสูง โดยที่ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำสามารถแพร่ผ่านได้ดี มีความสามารถในการย่อยสลายได้ดีในโรงหมักขยะอินทรีย์ที่มีอุณหภูมิในการหมักประมาณ 60 องศาเซลเซียส [47] แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้ก็สามารถย่อยสลายได้ ในตอนแรก PLA จะถูกสลายให้ไปเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้และกรดแลคติก โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นภายใน 2 สัปดาห์ ซึ่งสารประกอบที่ได้และ Lactide acid จะถูกย่อยด้วยจุลินทรีย์ด้วยการ Metabolisation แล้วเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และชีวมวล จึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยที่ปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตพอลิแลคติกแอซิดและปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังมีค่าน้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ของกระบวนการผลิตพอลิเมอร์ที่ใช้โดยทั่วไป [48]

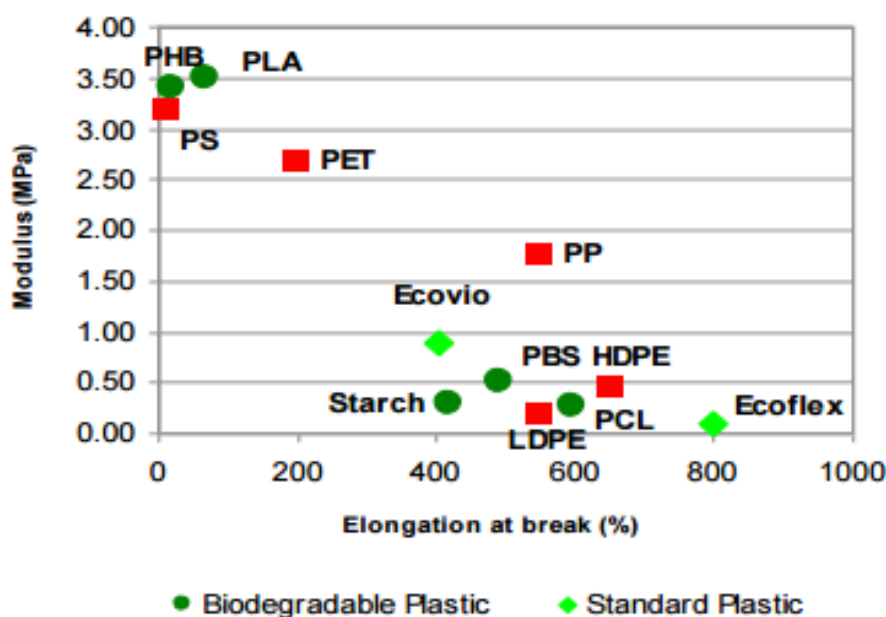
ข้อจำกัดของพอลิแลคติกแอซิด

PLA มีลักษณะแข็งและค่อนข้างเปราะ โดยเมื่อพิจารณาในด้านของค่ามอดูลัสของยังพบว่าอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับพอลิสไตรีน ในขณะที่การยืดตัวจะสูงกว่าพอลิสไตรีนเล็กน้อย (แต่จะยังคงต่ำกว่าพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต, PET) ซึ่งลักษณะดังกล่าวข้างต้นทำให้มีข้อจำกัดในการนำ PLA ไปใช้ในงานบางด้าน เช่น ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการการยืดตัว ดังนั้นในการใช้งานจึงนิยมเติมสารพลาสติกไซเซอร์ลงไปในสูตร PLA คอมพาวด์ หรือผสม PLA กับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีความเหนียวและการยืดตัวที่ดีกว่า

PLA ไม่ทนความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าหากไม่ทำการอบไล่ความชื้นก่อนนำไปขึ้นรูป อาจเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างกระบวนการผลิตขึ้นรูปผ่านกลไกแบบไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และกลไกแบบตัดสายโซ่ (chain scission) ดังนั้นในการใช้งานจึงควรทำการอบเม็ด PLA ให้แห้งปราศจากความชื้นเสียก่อน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วปริมาณความชื้น (water content) ที่อยู่ใน PLA ควรจะมีระดับน้อยกว่า 500 ppm เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดการเสื่อมสภาพทางความร้อนดังกล่าวข้างต้น สำหรับเวลาที่ใช้ในการอบเม็ด PLA จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 90 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาสั้นลงเหลือประมาณ 2 ชั่วโมง

ความแข็งแรงของ PLA ขณะอยู่ในรูปของพอลิเมอร์หลอม (melt strength) จะมีค่าต่ำ ทำให้มีปัญหาในการนำไปผลิตขึ้นรูปโดยกระบวนการบางอย่าง เช่น กระบวนการอัดรีดและเป่าขึ้น

รูปเป็นฟิล์ม (extrusion blown film process) เนื่องจากฟิล์มที่เป่าขึ้นต่อจากพอลิเมอร์ที่ไหลออกจากรูทางออกจะไม่เสถียร ดังนั้นในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ฟิล์ม PLA จากกระบวนการดังกล่าวจึงจำเป็นต้องทำการปรับปรุงสมบัติดังกล่าว



ภาพประกอบ 2.4 ค่าโมดูลัสและค่าการยืดตัวของ PLA เทียบกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ [49]

เนื่องจากคุณสมบัติทั่วไปของพอลิเมอร์ที่มีขีดจำกัดในด้านคุณสมบัติทางกล จึงได้มีคิดค้นวิจัยการเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์อย่างกว้างขวาง เพื่อลดข้อจำกัดด้านความแข็งแรงของวัสดุลงและเพิ่มความสามารถในการยืดหยุ่น ทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น

2.6 การปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดโดยการทำพอลิเมอร์ผสม

ความเหนียว (toughness) คือ ความสามารถของวัสดุในการดูดกลืนพลังงานและเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก (plastically deform) ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก การเพิ่มความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดโดยส่วนใหญ่จะใช้กระบวนการทำพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิเมอร์เหนียว (tough polymers) หรือพอลิเมอร์ในกลุ่มยาง (rubbery polymers) พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blends)

พอลิเมอร์ผสมเกิดจากการนำพอลิเมอร์หรือโคพอลิเมอร์อย่างน้อย 2 ชนิดมาผสมเข้าด้วยกัน โดยปริมาณขององค์ประกอบที่น้อยกว่าจะต้องไม่ต่ำกว่า 2 %wt [50] วิธีที่ใช้สำหรับผสมพอลิเมอร์มักเป็นการหลอมผสม (melt blending) การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นที่นิยมในทางอุตสาหกรรมเนื่องจากมีประโยชน์หลายอย่าง เช่น ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติครบถ้วนตามต้องการในราคาต่ำที่สุด ขยายศักยภาพของพอลิเมอร์วิศวกรรม ปรับปรุงสมบัติเฉพาะ เช่น ความทนต่อแรงกระแทก และใช้เป็นวิธีรีไซเคิลขยะพลาสติก

ปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม คือ ความเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์ ซึ่งหมายถึงความสามารถเข้ากันได้ของพอลิเมอร์สองชนิดหรือมากกว่าในระดับโมเลกุล ไม่แสดงการแยกเฟสเมื่อทำการผสม ซึ่งความเข้ากันได้จะขึ้นกับโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ มวลโมเลกุล สัดส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสองและสภาวะของการผสม โดยขึ้นกับวิธีการผสม อุณหภูมิ และเวลา พอลิเมอร์บางชนิดผสมกันแล้วไม่มีความเข้ากันได้ (Incompatible blend) บางชนิดมีความเข้ากันได้เป็นบางส่วน (partially compatible blend) และบางชนิดสามารถรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ทั้งหมด (completely compatible blend) [51] โดยมีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้

- ผสมกันแล้วไม่มีความเข้ากันได้ พอลิเมอร์ทั้งสองไม่ผสมเข้าด้วยกัน มีขอบเขตการแยกออกชัดเจน ไม่มีการผสมกันในระดับโมเลกุลส่งผลให้แรงกระทำระหว่างเฟส (interfacial adhesion) ไม่ดี พอลิเมอร์ทั้งสองแยกกันอยู่เป็นผลทำให้ไม่มีการแลกเปลี่ยนสมบัติระหว่างกัน การผสมไม่ได้ช่วยให้ปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์นั้นๆ เมื่อมีแรงกระทำในขณะที่ใช้งาน จะเกิดการแตกหักได้ง่าย
- ผสมกันแล้วมีความเข้ากันได้เป็นบางส่วน พอลิเมอร์ที่ได้จะมีหลายเฟส ซึ่งเป็นระบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous system) และเกิดขอบเขตขึ้น ซึ่งอาจมีหรือไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสก็ได้ โดยสามารถเกิดสัณฐานวิทยาได้หลายแบบ
- ผสมกันแล้วรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ทั้งหมด พอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้มีเฟสเดียวและไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ไม่เห็นขอบเขต (boundary) ของการแยกเฟสไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟส ถ้าหากพอลิเมอร์เบลนด์เข้ากันได้ดี สมบัติของพอลิเมอร์ทั้งสองอาจจะหักล้างกันหรืออาจเสริมกันก็ได้

การผสมกันของพอลิเมอร์ที่ดีต้องสามารถรวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ทั้งหมด เพราะจะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ แต่ถ้าหากการผสมกันของพอลิเมอร์ไม่สามารถเป็นเนื้อเดียวกันได้หมดจะส่งผลต่อคุณสมบัติของพอลิเมอร์ คือ ทำให้เกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดอย่างชัดเจน และเฟสแต่ละเฟสของพอลิเมอร์จะเกิดการยึดเหนี่ยวกันของแต่ละ

เฟส ทำให้พอลิเมอร์มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลภายในลดลง และทำให้พอลิเมอร์มีคุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลหรือสมบัติอื่น ๆ ต่ำกว่าพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมเข้ากัน ซึ่งถือว่าเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีคุณภาพและไม่ควรนำไปใช้งาน ถ้าหากจะทำการเตรียมการผสมพอลิเมอร์ต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้เป็นสำคัญ ดังนั้นเพื่อให้สมบัติของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น จึงต้องมีการปรับปรุงให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้มากขึ้น โดยการดัดแปรโมเลกุลพอลิเมอร์ที่นำมาผสมหรือการเติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ (compatibilizer) ลงไปในพอลิเมอร์ผสม

ตัวอย่างงานวิจัยของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิเมอร์เหนียว (tough polymer) ชนิดต่าง ๆ ที่มีคณะผู้วิจัยนำมาทำพอลิเมอร์ผสมกับ PLA เพื่อปรับปรุงข้อด้อยด้านความเปราะ มีทั้งชนิดที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพและไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังตัวอย่างงานวิจัยต่อไปนี้

Deng และ Thomas [52] ศึกษาผลการทำพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับ PBS โดยอัตราส่วนระหว่าง PLA ต่อ PBS ถูกปรับเปลี่ยนเป็น 100/10, 90/10, 80/20, และ 0/100 โดยน้ำหนัก ผู้วิจัยพบว่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะที่ค่ามอดูลัสและค่าความต้านแรงดึงลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณ PBS

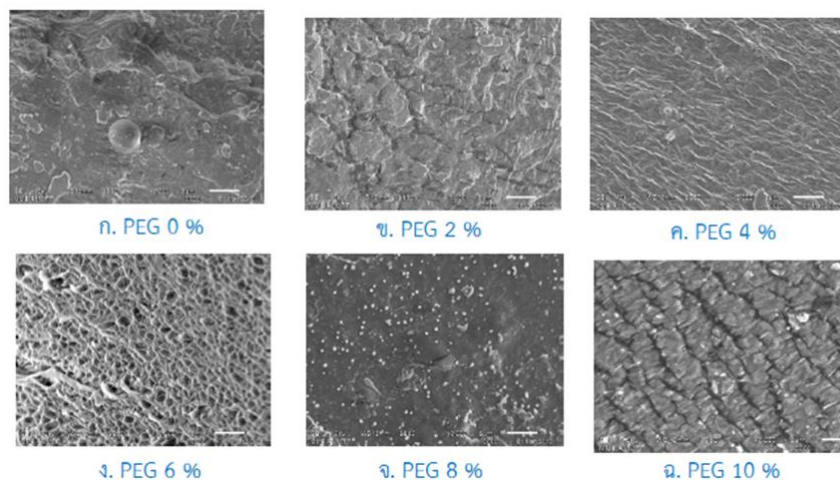
Veang-in และ Srithep [15] ศึกษาอัตราส่วนของ PBS ในพอลิเมอร์ผสม PLA มีผลทำให้ค่าพลาสมาความสามารถในการยืดตัวของวัสดุ (elongation at break) มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณ PBS ที่เพิ่มขึ้นในระบบ ส่วนค่า Tensile modulus และค่า Tensile strength มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ PBS ที่เพิ่มขึ้นในระบบ และเมื่อเติม chain extender เข้าไปในวัสดุผสม พบว่าความสามารถในการยืดตัวของวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยที่ปริมาณ chain extender ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีค่าการยืดตัวเพิ่มขึ้น 300% และที่ปริมาณ chain extender ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก มีค่าการยืดตัวเพิ่มขึ้นถึง 678% ส่วนค่า Tensile modulus และค่า Tensile strength มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ chain extender เล็กน้อย

ชัยพฤกษ์ อาภาเวช [12] ได้ศึกษาการศึกษาการปรับปรุงสมบัติความเหนียวของ PLA ด้วยการผสมกับ PBS ได้ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของ PLA/PBS พบว่า การเพิ่มปริมาณ PBS จะช่วยทำให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBS มีแนวโน้มที่จะมีความเป็น Elastic มากขึ้น ถึงแม้ว่าค่าการทนแรงดึงและค่ามอดูลัสมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของ PBS ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มยืดตัวได้มากขึ้นตามปริมาณ PBS ที่เติมลงไป จากผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการเติม PBS ลงใน PLA จะช่วยแก้ปัญหาค่าสมบัติที่แข็งแต่เปราะของ PLA ให้ลดลงได้บ้าง เนื่องจากการผสม PBS ในปริมาณมากพอลิเมอร์ผสมจะมีการผสมแบบ immiscible blend ซึ่งมีแรงยึดเหนี่ยวข้อขัดแย้งต่ำ ซึ่งจำเป็นต้องพัฒนาความเข้ากันระหว่าง PLA และ PBS เพื่อลดความเปราะของ PLA ลง จากการศึกษา

ไม่ควรเติม PBS เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เนื่องจากข้อจำกัดในแง่ของความเข้ากันได้ (compatible) ระหว่าง PLA และ PBS ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มขอบเขตการนำ PLA ไปใช้งานให้หลากหลายมากขึ้น เช่นในกระบวนการเป่าหรือการขึ้นเส้นใย

Bhatia A และคณะ [53] ศึกษาการเข้ากันได้ของ PLA และ PBS พบว่าการศึกษาการผสม PLA กับ PBS ได้รับการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาโดยเทคนิค SEM เปิดเผยว่าทั้งสองพอลิเมอร์สามารถเข้ากันได้ไม่เกินร้อยละ 20 ของน้ำหนัก PBS ใน PLA ความต้านทานแรงดึงและโมดูลัสลดลงเมื่อมีปริมาณ PBS เพิ่มขึ้น สามารถสรุปได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น จุดขาด ยังคงเกือบคงที่สำหรับการผสมทั้งหมด ส่วน DSC แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบเกินร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก PBS มีจุดหลอมละลาย 2 จุดที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นความไม่เข้ากันของทั้งสองพอลิเมอร์ แต่องค์ประกอบที่ 90/10, 80/20 (PLA/PBS) ดูเหมือนจะสามารถเข้ากันได้ การศึกษาการไหลได้ข้อสรุปว่า PBS และ PLA แสดงพฤติกรรมแบบ Newtonian ที่อัตราส่วนร้อยละ 50/50 ของน้ำหนัก PLA/PBS ผสม แสดงให้เห็นพฤติกรรมการเฉือนที่แข็งแกร่งที่ความถี่ต่ำ ในขณะที่อัตราส่วนผสมอื่น ๆ แสดงให้เห็นพฤติกรรมที่คล้ายกันกับนิวตัน ความหนืดเฉือนของระบบผสมแสดงพฤติกรรมเฉือนคล้ายกับพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ ความหนืดของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามการปริมาณ PBS จนถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ปริมาณ PBS มีความหนืดระหว่างพอลิเมอร์บริสุทธิ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของ PBS มีการผสมเข้ากันได้ดีกว่า จะได้ว่าการผสม PBS ได้ถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ใน PLA คาดว่าจะสามารถเอาชนะข้อบกพร่องของ PLA เช่น ความเปราะ คุณสมบัติดัดงอ การทนความร้อนและส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงสำหรับการใช้งานในการบรรจุอาหาร ถุงปุ๋ยหมักและถุงอื่น ๆ ที่ย่อยสลายได้

สมหมาย ผิวสะอาด และคณะ [54] ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PBS โดยใช้ PEG เป็นตัวเชื่อมประสานพอลิเมอร์ที่ปริมาณต่างๆ จากภาพประกอบ 2.5 แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ตัวเชื่อมประสานที่อัตราส่วน 2, 4, 6, 8 และ 10 phr พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมีการแยกเฟสชัดเจน ซึ่งแสดงถึงความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ผสมโดยแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของ PBS ออกมา พบว่าผิวค่อนข้างขรุขระ ไม่เรียบ แต่จะเห็นได้ชัดคือ PEG ที่ปริมาณ 4 phr พอลิเมอร์มีการผสมเข้ากันค่อนข้างดีกว่าอัตราส่วน



ภาพประกอบ 2.5 ลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่เติม PEG ที่ปริมาณต่างๆ [54]

Long-Feng Wang และคณะ [55] ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิแลคไทด์ (PLA) ผสมพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT) โดยวิธีการหล่อตัวทำละลายและการประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร พบว่า การนำ PBAT ผสมเข้ากับ PLA ในการขึ้นรูปเป็นฟิล์ม โดยวิธีการหล่อตัวทำละลาย เป็นการช่วยลดความเปราะและปรับปรุงความยืดหยุ่นของฟิล์ม PLA แล้วยังช่วยในการป้องกันแสง UV สูง ซึ่งในการนำไปทดสอบบรรจุหัวหอมสดพบว่า ฟิล์มที่ผสม PBAT สามารถรักษาความสดของหัวหอมได้เป็นอย่างดีและป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้สูง ส่วนการนำไปทดสอบบรรจุมันฝรั่งสดพบว่า ฟิล์มที่ผสม PBAT มีประสิทธิภาพในการป้องกันแสง UV ทำให้ช่วยในการรักษาสีเขียวของมันฝรั่งไว้ได้ เพราะตัวฟิล์มจะช่วยในการคัดกรองแสง จากการกล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่าสามารถผลิตฟิล์ม PLA ผสม PBAT ได้ในระดับอุตสาหกรรม ฟิล์มที่ผสม PLA ผสม PBAT เข้าไปด้วยกันมีศักยภาพสูงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ผลไม้ และผักที่ต้องการขยายอายุการเก็บรักษา

Racha Al-Itry และคณะ [14] ศึกษาการนำพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมกับพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT) ในอัตราส่วน PLA/PBAT: 80/20 พบว่าค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) เพิ่มขึ้นจาก 14% เป็น 50% และเมื่อผสมสารเพิ่มความยาวสายโซ่ (chain extender: CE) 0.5% (PLA/PBAT/chain extender: 80/20/0.5) ทำให้ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเป็น 135% ดังตาราง 2.3

ตาราง 2.3 ผลการทดสอบการดึงของ PLA/PBAT/chain extender [14]

ตัวอย่าง	ความเค้นแรงดึง (MPa)	ยังมอดูลัส (MPa)	การยืดตัว ณ จุด ขาด (%)
PLA_180 °C	1350 ± 90	68.5 ± 5	14 ± 3
PLA_PBAT_0_180 °C	820 ± 70	48 ± 2	50 ± 10
PLA_PBAT_0.25_3min_180 °C	822 ± 65	37 ± 2	116 ± 4
PLA_PBAT_0.5_3min_180 °C	1095 ± 60	47 ± 2	135 ± 9

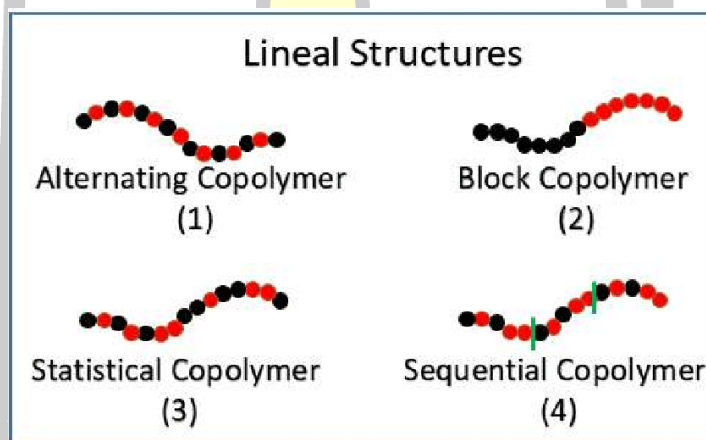
Weraporn Pivsa-Art และคณะ [56] ได้ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต-โค-อะดิเพต (PBSA) และพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรพทาเลท (PBAT) สำหรับเป่าฟิล์มใช้ในอุตสาหกรรม พบว่า การทดสอบสมบัติทางความร้อน (DSC) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBSA และ PBAT เกิดการแยกเฟสของอุณหภูมิการหลอมเหลวออกเป็นสองเฟส เนื่องจากการผสมที่ไม่เข้ากัน การทดสอบทางสัณฐานวิทยา (SEM) จะได้ว่าพอลิเมอร์ทั้งสอง (PLA และ PBSA) มีส่วนที่เข้ากันได้เล็กน้อยและเกิดการแยกเฟสกันอย่างชัดเจน การทดสอบสมบัติทางกลในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBSA ที่อัตราส่วนคงที่ร้อยละ 80/20 โดยน้ำหนัก และมีการผสม PBAT ในอัตราส่วน 10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีการผสม PBAT ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะแสดงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ 40.71 MPa และแรงกระแทกที่ 26.97 J/m ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PBAT มีผลต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม และการทดสอบหาสมบัติเชิงรีโอโลยีของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBSA และ PBAT เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ PBAT มากขึ้นจะทำให้ค่าดัชนีการไหลเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แสดงให้เห็นว่า PBAT เป็นตัวช่วยลดความหนืดของพอลิเมอร์ผสม

2.7 โคพอลิเมอร์ (Copolymer)

โคพอลิเมอร์ คือ พอลิเมอร์ที่ถูกสร้างขึ้นจากการประกอบมอนอเมอร์ (monomers) สองชนิดหรือมากกว่า ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ ซึ่งมีความแตกต่างจากโฮมโพลิเมอร์ (homopolymer) ที่สร้างจากมอนอเมอร์ชนิดเดียว โคพอลิเมอร์ สามารถมีการเรียงต่อกันของมอน

โพลิเมอร์ในลำดับที่แบบต่างกัน (random copolymer) มีบางส่วนที่มีลำดับที่ต่าง (block copolymer), หรือมีลำดับที่ทับซ้อนกัน (alternating copolymer)

- Random Copolymer (โคพอลิเมอร์แบบสุ่ม): มอนโพลิเมอร์ทั้งสองชนิดถูกเรียงต่อกันในลำดับที่สุ่ม ทำให้โคพอลิเมอร์มีคุณสมบัติที่หลากหลายและไม่สม่ำเสมอ
- Block Copolymer (โคพอลิเมอร์แบบบล็อก): มอนโพลิเมอร์ถูกจัดเรียงต่อกันเป็นบล็อก (blocks) ที่มีลำดับที่แตกต่างกัน ทำให้โคพอลิเมอร์มีลักษณะที่มีส่วนต่อเนื่องกัน
- Alternating Copolymer (โคพอลิเมอร์แบบทับซ้อน): มอนโพลิเมอร์ทั้งสองชนิดถูกจัดเรียงต่อกันในลำดับที่ทับซ้อนกัน ทำให้โคพอลิเมอร์มีลักษณะที่แลกเปลี่ยนต่อเนื่องกัน
- Graft Copolymer (โคพอลิเมอร์แบบกราฟท์): โคพอลิเมอร์ที่มีส่วนหนึ่งที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายของโคโพลิเมอร์อื่น ๆ
- Statistical Copolymer (โคโพลิเมอร์แบบสถิติ): โคพอลิเมอร์ที่มอนโพลิเมอร์สองชนิดถูกเรียงต่อกันในลำดับที่ไม่สุ่ม แต่ไม่เกิดการเรียงต่อกันต่อเนื่อง



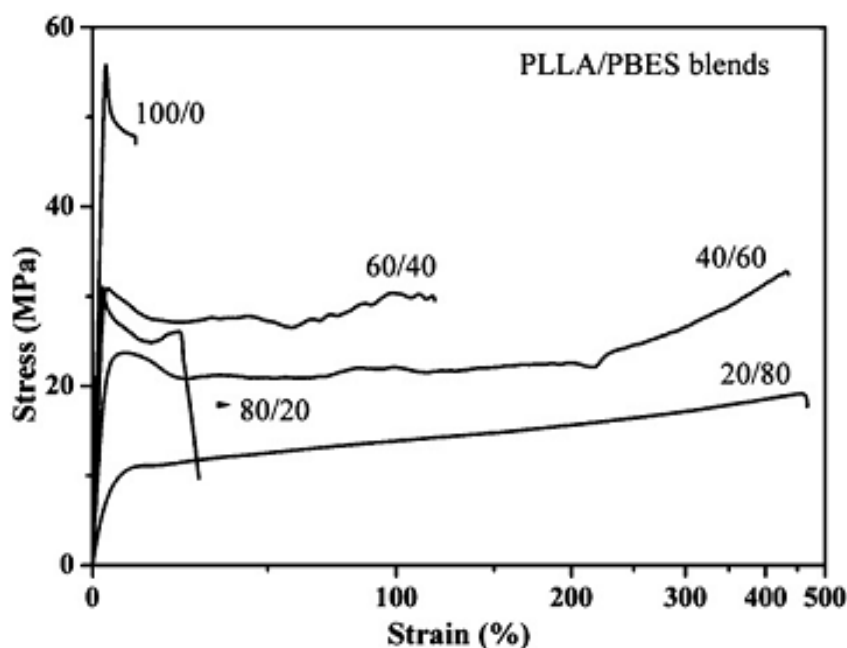
ภาพประกอบ 2.6 โครงสร้างของ copolymer แบบต่างๆ [57]

2.8 ตัวอย่างงานวิจัยเกี่ยวกับโคพอลิเมอร์

โดยทั่วไปการสังเคราะห์ PLA โคพอลิเมอร์จะใช้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (ring opening polymerization) ดังตัวอย่าง เช่น

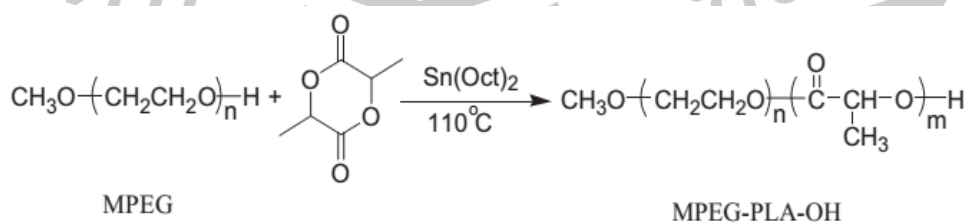
Ling Jiao และคณะ [28] ได้ศึกษาการผสม PLLA กับ PBS-b-PES block copolymer (PBES) เพื่อผลิตวัสดุย่อยสลายทางชีวภาพ จากภาพประกอบ 2.7 พบว่าผลของการ

ทดสอบแรงดึงแสดงให้เห็นว่าส่วนผสมที่ผสมกันนั้นมีความเปราะเซ้นต์การยืด ณ จุดขาด มากกว่า PLLA บริสุทธิ์ การยืดตัวที่จุดขาดของ PLLA นั้นเท่ากับ 10% และ PLLA/PBES 80/20, 60/40, 40/60 และ 20/80 เท่ากับ 29, 110, 442 และ 455% ตามลำดับ



ภาพประกอบ 2.7 ความเค้น-ความเครียด ของ PLLA/PBES ที่อัตราส่วนต่าง ๆ [28]

Zhang และคณะ [58] ได้สังเคราะห์บล็อกโคพอลิเมอร์ของ PLA กับมอนอเมทอกซีพอลิเอทิลีนไกลคอลที่มีหมู่ปลายเป็นไฮดรอกซิล (hydroxyl terminated monomethoxy-poly(ethylene glycol)-b-poly(lactide), MPEG-PLA-OH) โดยปฏิกิริยาเปิดวงแหวนของกรดแลคไทด์ (L-lactide) มี MPEG ทำหน้าที่เป็น macroinitiator และใช้สแตนเนียสออกโทเอท (stannous octoate, $\text{Sn}(\text{Oct})_2$) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ MPEG-PLA-OH ดังแผนภาพในภาพประกอบ 2.8 [58]

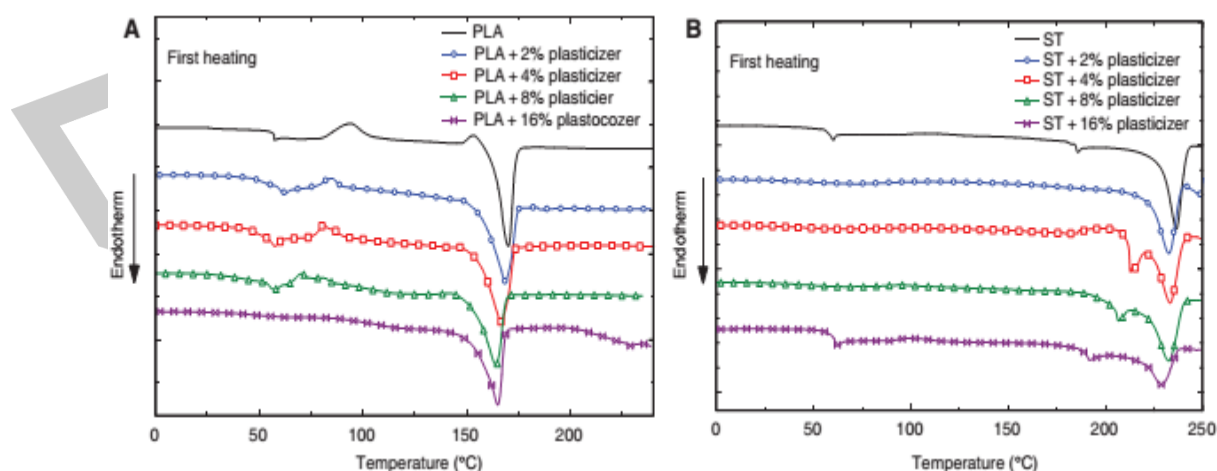


ภาพประกอบ 2.8 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์ MPEG-PLA-OH [58]

Chumeka และคณะ [59] สังเคราะห์ไดบล็อกโคพอลิเมอร์ระหว่าง PLA กับ ยางธรรมชาติ (PLA-block-NR) เพื่อใช้เป็นสารเสริมความเหนียวแก่ PLA และสารเสริมสภาพเข้ากันได้สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับยางธรรมชาติ พบว่า ไดบล็อกโคพอลิเมอร์ทำหน้าที่เป็นสารเสริมความเหนียวที่มีประสิทธิภาพแก่ PLA มากกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการดัดแปร และ PLA-block-NR ทำหน้าที่เป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ดีสำหรับพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณยางธรรมชาติเท่ากับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ถึงแม้ว่าจะทำการปรับปรุงให้ PLA มีสมบัติความเปราะสูง (brittle) หรือความทนต่อแรงกระแทกต่ำ (impact strength) ให้มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นได้แล้ว แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของความสามารถในการทนความร้อนต่ำและอุณหภูมิคงรูป (heat distortion temperature, HDT) ต่ำทำให้เกิดการเสียรูปของชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงหรือการบรรจุของร้อนนั่นเอง จึงมีงานวิจัยมากมายที่ต้องการปรับปรุงข้อจำกัดเหล่านี้เพื่อให้การใช้งาน PLA กว้างขวางมากขึ้น เมื่อไม่นานมีการค้นพบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLLA และ poly(D-lactide) (PDLA) ที่เรียกว่า สเตอริโอคอมเพลกซ์พอลิแลคไทด์ (stereocomplex, ST) สามารถทนความร้อนได้ดี จากตัวอย่างงานวิจัย ดังต่อไปนี้

Yottha Srithep and Dutchanee Pholharn [20] ได้ศึกษาการผสมกันของ PLLA และ PDLA ทำให้เกิดสเตอริโอคอมเพลกซ์พอลิแลคไทด์ (PLA-stereocomplex) เป็นพอลิเมอร์ผสมระหว่าง poly(L-lactic acid) (PLLA) และ poly(D-lactic acid) (PDLA) ซึ่งทำให้ stereocomplex มีอุณหภูมิการหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 230 องศาเซลเซียส สูงกว่า PLA แบบเดิมถึง 50 องศาเซลเซียส แสดงตามภาพประกอบ 2.9



ภาพประกอบ 2.9 DSC thermograms of (A) PLA/plasticizer (B) ST/plasticizer [20]

2.9 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon Nanotubes - CNTs)

การค้นพบท่อนาโนคาร์บอนเกิดจากความบังเอิญที่ ดร. ซุมิโอะ อิจิมา (Dr. Sumio Iijima) นักวิจัยจากห้องปฏิบัติการของบริษัท NEC ในญี่ปุ่นขณะกำลังสังเคราะห์ฟูลเลอรีน (fullerene) โดยวิธีการทำให้เป็นไอด้วยกระแสไฟฟ้า (arc-evaporation) แล้วพบว่าที่ขั้วแคโทดเกิดมีวัสดุโครงสร้างแบบแกรไฟต์ที่เป็นทั้งอนุภาคขนาดนาโนและท่อนาโนซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่เคยมีผู้ใดสังเกตเห็นมาก่อน ต่อมาทีมงานของ ดร. อิจิมาสามารถสังเคราะห์วัสดุดังกล่าวในปริมาณมากโดยปรับสภาวะของการทำให้เป็นไอด้วยกระแสไฟฟ้า ท่อนาโนที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะเป็นท่อแกรไฟต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-10 นาโนเมตร และมีความยาวในช่วง 1 ไมโครเมตร และเป็นท่อซ้อนกัน 2-5 ชั้นเรียกว่าท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น มีการสร้างและทำให้บริสุทธิ์แพร่หลายไปตามห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ทั่วโลก รวมถึงการพัฒนาเป็นท่อเดี่ยวที่เรียกว่าท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว [60]

ท่อนาโนคาร์บอนมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี ซึ่งท่อนาโนคาร์บอนนั้นสามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 10^9 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร (A/cm^2) สมบัติเชิงไฟฟ้าอีกอย่างหนึ่งที่น่าสนใจของท่อนาโนคาร์บอน คือสามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากปลายของท่อนาโนคาร์บอนสภาวะสุญญากาศได้ เมื่อวางอยู่ในสนามไฟฟ้าที่ใช้ศักย์ไฟฟ้า (potential) ต่ำกว่า สำหรับปลายที่เป็นขั้วโมลิบดีนัมท่อนาโนคาร์บอน มีความสามารถนำความร้อนได้ดีมากตามแนวยาวของท่อนาโนคาร์บอนแต่เป็นฉนวนความร้อนได้ดีมากเช่นกันตามแนวขวางของท่อนาโนคาร์บอน ยังทนต่ออุณหภูมิได้ถึง 2,800 องศาเซลเซียส ภายใต้สุญญากาศ และ 750 องศาเซลเซียส ในสภาวะปกติสมบัติเหล่านี้เป็นที่น่าสนใจอย่างมากในเชิงกายภาพ นอกจากนี้ยังมีการค้นพบสมบัติอีกหลายประการเพิ่มขึ้นและยังมีการประยุกต์ใช้เพื่อประโยชน์ในด้านต่าง ๆ อีกมาก ขึ้นอยู่กับการออกแบบทิศทางของการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอน ดังนั้นท่อนาโนคาร์บอนจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในการผลิตสายไฟจิ๋วของ เครื่องใช้ไฟฟ้า ใช้ผลิตเส้นลวดนาโน (Nanowires) และตัวนำไฟฟ้าหรือทรานซิสเตอร์ขนาดนาโน (Nanoscale transistors) ใช้ท่อนาโนเป็นเส้นใยที่มีความละเอียดสูงและทนทานต่อการใช้งาน เช่นการทอเป็น เส้นใยเพื่อใช้ในการผลิตแบตเตอรี่ที่มีอายุการใช้งานนานนับสิบปี ปัจจุบันท่อนาโนคาร์บอนมี 2 รูปแบบ ดังภาพประกอบ 2.10 [61] คือ

Single-Walled Carbon Nanotubes (SWCNTs): มีโครงสร้างที่เป็นท่อเดี่ยวเท่านั้น และมีส่วนผ่านศูนย์กลางเดียว. SWCNTs มีลักษณะทางไฟฟ้าที่มีการนำไฟฟ้าได้ดี และมีความแข็งแรง

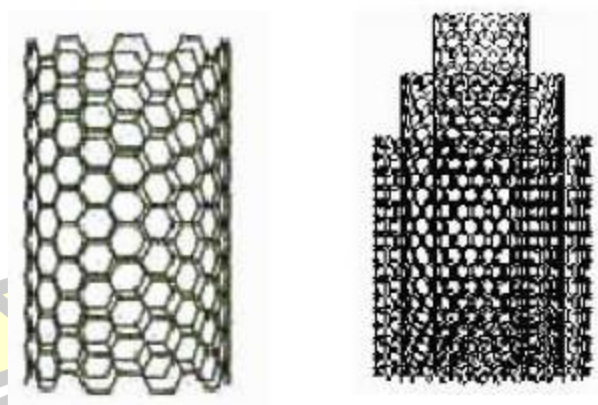
Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs): มีโครงสร้างท่อที่มีท่อหลายชั้นซ้อนกัน.

MWCNTs มีความแข็งแรงมากกว่า SWCNTs, แต่ทำให้มีความนำไฟฟ้าต่ำลง

คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนทำให้มีการนำไฟฟ้าได้ดีมาก และมีประโยชน์ในหลายแวดวงต่าง ๆ รวมถึง:

- การนำไฟฟ้า: CNTs มีการนำไฟฟ้าที่ดี สามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทอง
- ความแข็งแรง: CNTs มีความแข็งแรงมาก แข็งแรงกว่าเหล็ก
- น้ำหนักเบา: CNTs มีมวลเนื้อที่น้อย ทำให้น้ำหนักเบา
- ความเคลื่อนไหว: CNTs มีความยืดหยุ่นและความเคลื่อนไหวที่ดี
- การนำความร้อน: CNTs มีการนำความร้อนที่ดี
- การใช้ในอุตสาหกรรม: นำไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุเครื่องบิน วัสดุกันกระแทก และการแพทย์ เป็นต้น

การใช้ท่อนาโนคาร์บอนเพื่อปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสติกเป็นหนึ่งในการนำ CNTs มาใช้ในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการการนำไฟฟ้า เช่น ในบรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ความต้านทานไฟฟ้าของพลาสติกถูกปรับให้มีค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการความปลอดภัยต่อไฟฟ้าสถิต



ภาพประกอบ 2.10 โครงสร้างท่อนาโนคาร์บอน ก) ผนังเดี่ยว (SWCNT) และ ข) ผนังหลายชั้น (MWCNT) [61]

2.10 บรรจุภัณฑ์ด้านไฟฟ้าสถิต

บรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์บางประเภทที่สามารถเกิดไฟฟ้าสถิตได้ง่าย หรือถ้าเกิดแล้วจะก่อให้เกิดความเสียหายแก่ผลิตภัณฑ์ จำเป็นต้องมีสมบัติพิเศษเพื่อลดการเกิดไฟฟ้าสถิต ซึ่งผลิตภัณฑ์

ที่อยู่ในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่เป็นสินค้ากลุ่มอิเล็กทรอนิกส์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า electrostatic discharge (ESD) โดยบรรจุภัณฑ์ชนิดนี้จะช่วยลดการประทุของประจุส่วนบนผิวของวัสดุ ซึ่งนำไปสู่ความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้

ฟิล์มป้องกันไฟฟ้าสถิตมีคุณสมบัติที่สามารถช่วยลดหรือป้องกันการสะสมไฟฟ้าสถิตบนพื้นผิวของวัสดุหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้:

- การลดไฟฟ้าสถิต (Antistatic): ฟิล์มป้องกันไฟฟ้าสถิตมีคุณสมบัติในการลดหรือป้องกันไฟฟ้าสถิตที่สามารถสะสมได้บนพื้นผิว
- ความโปร่งแสง (Transparency): ฟิล์มนี้มักมีความโปร่งแสงที่ดี, ทำให้เหมาะสำหรับใช้ในแอปพลิเคชันที่ต้องการความโปร่งแสง เช่น หน้าจอแสดงผล, หรือหน้าจอทัชสกรีน
- ความแข็งแรง (Durability): ฟิล์มป้องกันไฟฟ้าสถิตมักมีความแข็งแรงที่เพียงพอสำหรับการใช้งานทั่วไป
- ความทนทานต่อสารเคมี: บางฟิล์มมีความทนทานต่อสารเคมี, ทำให้เหมาะสำหรับการใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีสารเคมี
- การทำความสะอาด (Cleanability): ฟิล์มบางประเภทสามารถทำความสะอาดได้ง่าย
- ความทนทานต่อการหลุดหรือตกร้าว (Adhesion Resistance): ฟิล์มมักมีความทนทานต่อการหลุดหรือตกร้าว
- ความทนทานต่อการแสดงรอย (Scratch Resistance): บางฟิล์มมีความทนทานต่อการแสดงรอย
- ความนุ่ม (Flexibility): ฟิล์มมักมีความนุ่มทำให้สามารถใช้กับพื้นผิวที่มีรูปร่างหลากหลาย
- ความทนทานต่ออุณหภูมิ: ฟิล์มบางประเภทมีความทนทานต่ออุณหภูมิ
- ความคงทนต่อเวลา: ฟิล์มมักมีความคงทนต่อการใช้งานในระยะยาว
- ความปลอดภัยทางสิ่งแวดล้อม: บางฟิล์มถูกผลิตจากวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

การนำพลาสติกซึ่งโดยปกติมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า (ความต้านทานไฟฟ้าของพื้นผิว $>10^{12}$ โอห์ม) มาใช้ในงานบรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์จำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าของพลาสติกโดยการผสมสารเติมนำไฟฟ้า (Conducting Filler) เช่น ผงโลหะหรือคาร์บอนแบล็ก (Carbon Black) เพื่อให้ได้พอลิเมอร์เชิงประกอบที่มีสมบัติกระจายไฟฟ้าสถิต (Static Dissipative) ซึ่งมีความต้านทานไฟฟ้าของพื้นผิว อยู่ในช่วง 10^6 ถึง 10^{12} โอห์ม [62] อย่างไรก็ตามการผสมโลหะหรือคาร์บอนแบล็กลงในพลาสติกยังมีข้อจำกัดในเรื่องการกระจายตัวและความสม่ำเสมอของสมบัติ

ทางไฟฟ้าในชิ้นงาน เนื่องจากสารเติมดังกล่าวไม่เข้ากันกับเนื้อพลาสติก โดยเฉพาะที่ผิวของผลิตภัณฑ์ ที่ขึ้นรูปแล้วมักจะมีคราบน้ำมันของสารเติมค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้มีความต้านไฟฟ้าที่ผิวมากขึ้น [63]

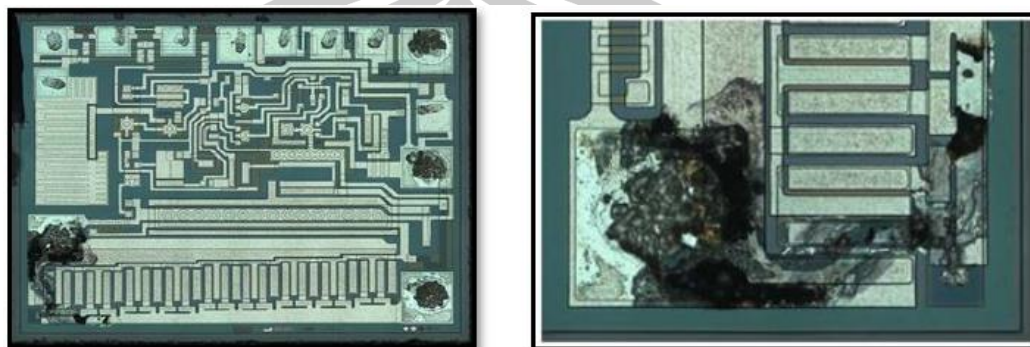
2.10.1 การเกิดไฟฟ้าสถิต

ไฟฟ้าสถิตเป็นปรากฏการณ์ที่ประจุบวกและประจุลบบริเวณผิวของวัสดุไม่เท่ากัน ทำให้เกิดความไม่สมดุลของประจุและเกิดแรงดึงดูดเมื่อวัสดุทั้งสองชิ้นมีประจุต่างชนิดกัน หรือเกิดแรงผลักกัน เมื่อวัสดุทั้งสองชิ้นมีประจุชนิดเดียวกัน ไฟฟ้าสถิตสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายๆ ผ่านปรากฏการณ์การถ่ายเทประจุเนื่องจากการเสียดสี (triboelectric) โดยเริ่มแรกวัสดุอยู่ในสถานะที่เป็นกลางทางไฟฟ้า หรือมีปริมาณประจุบวกและประจุลบบริเวณพื้นผิวเท่ากัน แต่หลังจากที่วัสดุทั้งสองชนิดเกิดการเสียดสี ซึ่งการเสียดสีมีโอกาสเกิดได้ในช่วงระหว่างการเคลื่อนย้ายและขนส่ง ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุจากวัสดุทั้งสองที่เป็นกลางทางไฟฟ้าไปเป็นวัสดุชิ้นหนึ่งมีประจุบวกมากกว่า และอีกชิ้นหนึ่งมีประจุลบมากกว่า ทั้งนี้ภายหลังจากการเสียดสีวัสดุใดจะมีประจุชนิดใดมากกว่านั้น ขึ้นกับชนิดของวัสดุทั้งสอง โดยส่วนใหญ่วัสดุที่เกิดความเสียหายได้จากไฟฟ้าสถิตจะเป็นวัสดุที่ไม่สามารถนำไฟฟ้า หรือไม่สามารถเคลื่อนประจุส่วนเกินได้ เช่น วัสดุฉนวนไฟฟ้า เพราะในสภาพเช่นนี้ประจุส่วนเกินจะไม่สามารถรั่วไหลออกไป เพื่อปรับสภาพพื้นผิวให้เป็นกลางทางไฟฟ้าได้ สภาพเช่นนี้ประจุส่วนเกินจะไม่สามารถรั่วไหลออกไปเพื่อปรับสภาพพื้นผิวให้เป็นกลางทางไฟฟ้าได้ และตามปกติประจุไฟฟ้าสถิตที่มีจำนวนเท่ากันแต่ต่างชนิดประจุกัน และจะพยายามอยู่ใกล้ซึ่งกันและ กันให้มากที่สุด นำไปสู่แรงดึงดูดระหว่างประจุไฟฟ้าบนผิวของวัสดุทั้งสอง ทำให้ประจุไฟฟ้าจากพื้นผิว หนึ่งอาจกระโดดผ่านช่องว่างไปยังอีกพื้นผิวหนึ่งได้เพื่อรักษาสมดุลไฟฟ้า การส่งผ่านประจุอย่าง รวดเร็วของกระแสไฟฟ้าเช่นนี้จะเกิดประกายไฟ และประกายไฟที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าสถิตนี้เองที่ เป็นต้นเหตุทำให้เกิดอันตรายและความเสียหายต่ออุปกรณ์ต่างๆได้

2.10.2 ความเสียหายของวัสดุเนื่องจากไฟฟ้าสถิต

ในปัจจุบันมีนักวิจัยจำนวนมากพยายามพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อย่างต่อเนื่องให้มีประสิทธิภาพและตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค เช่น การทำให้ชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จำพวกแผงวงจรไฟฟ้า มีขนาดเล็กและบางลงเรื่อยๆ ทั้งนี้เพื่อรองรับการใช้งานที่ต้องการความสะดวกในการพกพาหรือเหมาะสมการใช้งานบางประเภท ซึ่งขนาดเล็กและบางของวัสดุเหล่านี้ เมื่อเกิดความเสียหายจากไฟฟ้าสถิตจะเกิดความเสียหายที่รุนแรงกว่าวัสดุที่มีความหนา มากกว่า เพราะประกายไฟทำให้โลหะบางๆ เหล่านี้หลอมละลายและเปิดวงจร คล้ายกับเหตุการณ์ฟิวส์ขาดเนื่องจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมากเกินไปจนเกิดความร้อน ซึ่งเรียกความเสียหายนี้ว่าปรากฏการณ์ Current crowding คือเมื่อมีกระแสไหลผ่านรอยต่อในแผงวงจรและเกิดความเข้มข้นของ

กระแสสูงมากเกินไปจนสามารถละลายชิ้นส่วนโลหะและสร้างรอยไหม้บนแผงวงจรในอุปกรณ์นั้นๆ ได้ ดังภาพประกอบ 2.11



ภาพประกอบ 2.11 ความเสียหายของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต [64]

2.10.3 ประเภทของถุงต้านไฟฟ้าสถิต

บรรจุภัณฑ์ต้านไฟฟ้าสถิตถูกนำมาใช้งานตั้งแต่กระบวนการเก็บวัตถุดิบการผลิตรวมไปถึงการขนส่งโดยสมบัติของบรรจุภัณฑ์ที่ผู้บริโภคร้องการสำหรับสินค้าประเภทอิเล็กทรอนิกส์คือสามารถป้องกันความเสียหายจากไฟฟ้าสถิตปกป้องผลิตภัณฑ์จากความชื้นและสิ่งปนเปื้อนภายนอกและมีความสามารถในการปิดผนึกจากสมบัติที่กล่่าวมาข้างต้นนำไปสู่การพัฒนาบรรจุภัณฑ์เหล่านี้ให้สอดคล้องกับการใช้งานซึ่งปัจจุบันในท้องตลาดสามารถแบ่งประเภทถุงต้านไฟฟ้าสถิตได้เป็น 3 ประเภทโดยคำนึงถึงความสามารถในการนำไฟฟ้าดังภาพประกอบ 2.12 [65]

ถุงป้องกันไฟฟ้าสถิต ยังมีประเภทอื่น ๆ ดังนี้:

- ถุง Metal-In (MI): ถุง MI มีชั้นที่ทำจากฟอยล์ที่ทนไฟฟ้าสถิตและชั้นภายในทำจากวัสดุทำให้สามารถป้องกันการสะสมไฟฟ้าสถิตได้
- ถุง Metal-Out (MO): ถุง MO มีชั้นที่ทำจากฟอยล์ที่ทนไฟฟ้าสถิตแต่ชั้นที่ทำให้สามารถป้องกันไฟฟ้าสถิตอยู่ด้านนอก
- ถุงเลเยอร์หลายชั้น (Multi-Layer): ถุงป้องกันไฟฟ้าสถิตชนิดนี้มีหลายชั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบ ซึ่งทำให้มีความทนทานต่อไฟฟ้าสถิตมากขึ้น
- ถุงที่มีมูลค่า (Static Shielding Bubble Bags): ถุงป้องกันไฟฟ้าสถิตที่มีลูกฟองอากาศภายในช่วยเพิ่มความปลอดภัยต่อสิ่งของที่อ่อนไหวต่อการสะสมไฟฟ้าสถิต
- ถุงป้องกันฝุ่นและไฟฟ้าสถิต (Static Dissipative Bags): ถุงชนิดนี้มักใช้ในการจัดเก็บและขนส่งวัสดุที่ต้องการความปลอดภัยจากการสะสมไฟฟ้าสถิตและฝุ่น

- ถุงป้องกันไฟฟ้าสถิตที่สามารถถูกทำลายได้ (Static Shielding Zipper Bags): ถุงป้องกันไฟฟ้าสถิตที่มีรูปแบบ Zip-lock ทำให้สามารถเปิด-ปิดได้หลายครั้ง แต่ต้องระวังไม่ให้ถูกทำลาย
 - ถุงที่สามารถหลุดได้ (Re-closable Static Shielding Bags): ถุงที่มีระบบปิดผนึกที่สามารถเปิด-ปิดได้หลายครั้ง ทำให้สะดวกในการเข้าถึงและจัดเก็บ
- เมื่อเลือกใช้ถุงต้านไฟฟ้าสถิต ควรพิจารณาลักษณะของวัสดุที่ต้องการจัดเก็บ การขนส่ง และความปลอดภัยที่ต้องการ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ



ภาพประกอบ 2.12 ประเภทของวัสดุในงานต้านไฟฟ้าสถิตแบ่งตามความต้านทานไฟฟ้าที่พื้นผิว [65]

โดยถุงต้านไฟฟ้าสถิตที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 10^6 ถึง 10^9 โอห์ม จะมีสีดำสนิท เนื่องจากเติมสารเติมแต่งประเภทคาร์บอนเข้าไปผสมกับเนื้อพลาสติก ตามภาพประกอบ 2.13 ซึ่งสารคาร์บอนส่วนใหญ่ที่เติมคือคาร์บอนแบล็ค (carbon black) เพื่อให้ถุงพลาสติกเกิดความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ หลักการทำงานของถุงประเภทนี้จะช่วยป้องกันไฟฟ้าสถิตได้โดยอาศัยมนุษย์เป็นตัวกลางส่งถ่ายประจุส่วนเกินจากผิวของถุงไปยังพื้นดิน เพราะถุงประเภทนี้เมื่อเกิดประจุส่วนเกินแล้วไม่สามารถกระจายประจุเหล่านั้นได้ด้วยตัวเอง จำเป็นต้องมีสื่อกลางในการกระจายประจุลงสู่พื้นดินเพื่อปรับสภาพผิวให้เข้าสู่สภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า ดังนั้นการใช้งานของถุงประเภทนี้จึงมีความหลากหลาย เหมาะสมใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถเห็นผลิตภัณฑ์ภายในได้เนื่องจากความทึบแสงของถุง โดยถุงป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ ใช้สำหรับบรรจุ หรือหีบห่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้ในการจัดส่งสินค้าหรือ ใช้เพื่อเก็บรักษาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น พวกแผงวงจรต่างๆ ผงสารเคมี เซมิคอนดักเตอร์ หรือ อุปกรณ์ที่มีความไวต่อประจุไฟฟ้าสถิต

ถุงต้านไฟฟ้าสถิตที่เติมสารเติมแต่งประเภทคาร์บอนแบล็ค (Carbon Black) เป็นวัสดุที่พิเศษที่มีการเติมเพื่อเพิ่มความต้านไฟฟ้าสถิตและความทนทานต่อไฟฟ้าสถิต การใช้ Carbon Black ช่วยให้ถุงมีสีดำและความทึบ ซึ่งทำให้เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความคงทนและป้องกันไฟฟ้าสถิต นอกจากคุณสมบัติต้านไฟฟ้าสถิตและความทนทานต่อไฟฟ้าสถิต ถุงต้านไฟฟ้าสถิตที่เติมสาร Carbon Black ยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ ที่สำคัญ เช่น

- ความทึบและความแข็งแรง: Carbon Black มีลักษณะเพิ่มความทึบและความแข็งแรงให้กับวัสดุ, ทำให้ถุงมีความทนทานต่อการทำลายหรือแตก
- ความยืดหยุ่น: ถุงที่มี Carbon Black เติมเข้าไปมกยังมีความยืดหยุ่นที่เพียงพอสำหรับการใช้งาน, ไม่ทำให้ถุงแตกหรือฉีกง่าย
- ความกันน้ำและกันละออง: Carbon Black ช่วยทำให้ถุงมีความกันน้ำและกันละออง
- ความทนทานต่อแสงแดด: ถุงที่มี Carbon Black มักมีความทนทานต่อแสงแดดมากกว่าถุงที่ไม่มี

การใช้ถุงด้านไฟฟ้าสถิตที่เติมสาร Carbon Black พบในหลายงาน เช่น

- การบรรจุสารเคมีและวัสดุที่ต้องการความปลอดภัยจากไฟฟ้าสถิต: ทำให้มักพบในการบรรจุสารเคมี อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือวัสดุที่อ่อนไหวต่อการสะสมไฟฟ้าสถิต
- การใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ต้องการความทนทานต่อไฟฟ้าสถิต: เช่น ในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การผลิต หรือการขนส่ง
- ควรทราบว่า การใช้ Carbon Black อาจทำให้ถุงมีสีดำ และในบางกรณีอาจทำให้มีความขมขื่นหรือสีไปทางสีดำบางประการ ซึ่งอาจต้องพิจารณาตามความต้องการของงานและความสามารถของวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตถุง



ภาพประกอบ 2.13 ตัวอย่างของถุงป้องกันไฟฟ้าสถิต [64]

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

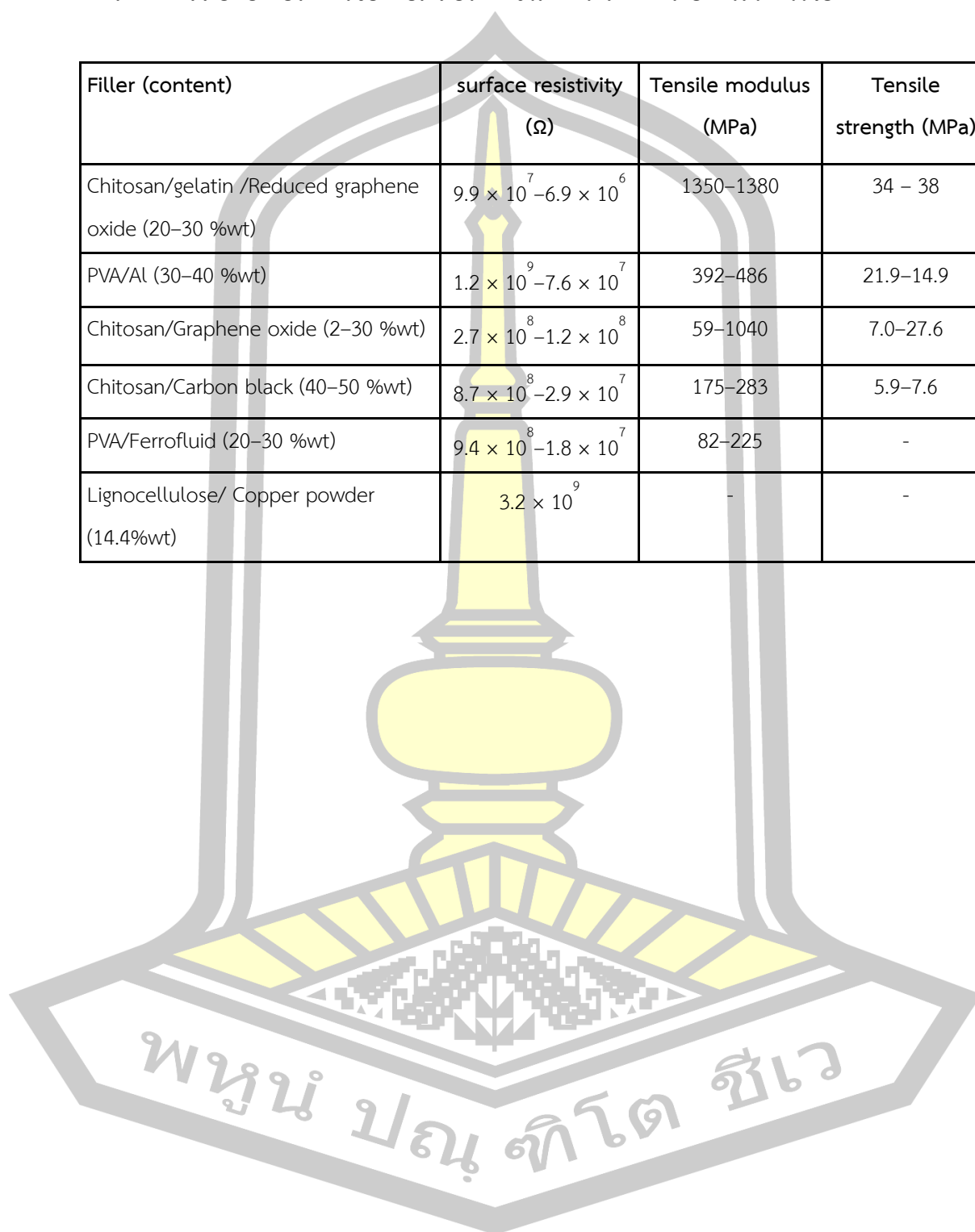
ปัจจุบันมีการนำท่อคาร์บอนนาโน (carbon nanotube) มาใช้เพื่อให้ได้ค่าความไววิเคราะห์ หรือสัญญาณการตอบสนองสูงขึ้นและเวลาการตอบสนองสั้นลง เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวป์เป็นวัสดุนาโนที่ช่วยในการส่งผ่านอิเล็กตรอน (electron transfer) ดังนั้นจึงทำให้สัญญาณที่ได้สูงขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดศักย์ไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารตัวอย่าง

นักวิจัยจำนวนมากได้ทำการวิเคราะห์สมบัติของคอมโพลีเมอร์นำไฟฟ้า และคอมโพลีเมอร์ ESD โดยใช้พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ตามตาราง 2.4 จากรายงานจะเห็นว่าคอมโพลีเมอร์ที่นำเสนอเหล่านี้แสดงสมบัติทางไฟฟ้าและความร้อนที่ดี โดยค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มต้านไฟฟ้าสถิตที่อยู่ในช่วง 10^6 ถึง 10^9 โอห์ม ซึ่งใช้ในงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ บรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ หรืองานที่มีความสำคัญทางไฟฟ้า และยังสามารถปรับปรุงสมบัติทางกล และสมบัติทางความร้อนได้อีก



ตาราง 2.4 สมบัติบางประการของพอลิเมอร์ทางชีวภาพนำไฟฟ้าที่รายงานในงานวิจัย

Filler (content)	surface resistivity (Ω)	Tensile modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Chitosan/gelatin /Reduced graphene oxide (20–30 %wt)	$9.9 \times 10^7 - 6.9 \times 10^6$	1350–1380	34 – 38	3.9–3.4
PVA/Al (30–40 %wt)	$1.2 \times 10^9 - 7.6 \times 10^7$	392–486	21.9–14.9	30–25
Chitosan/Graphene oxide (2–30 %wt)	$2.7 \times 10^8 - 1.2 \times 10^8$	59–1040	7.0–27.6	28.4–3.4
Chitosan/Carbon black (40–50 %wt)	$8.7 \times 10^8 - 2.9 \times 10^7$	175–283	5.9–7.6	9.2–8.4
PVA/Ferrofluid (20–30 %wt)	$9.4 \times 10^8 - 1.8 \times 10^7$	82–225	-	285–195
Lignocellulose/ Copper powder (14.4%wt)	3.2×10^9	-	-	-



นอกจากสมบัติทางไฟฟ้าแล้ว จากงานวิจัยของ Ali F และ Mohan R [70] เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโดยวิธีการใส่สารเสริมแรงประเภทคาร์บอน ได้ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ผ่านการเติมท่อนาโนคาร์บอน และเตรียมขึ้นงานด้วยเทคนิคการผสมแบบหลอมเหลว (melt blending) โดยกำหนดความแตกต่างของปริมาณท่อนาโนคาร์บอนในคอมพอสิต 0.1, 0.5, 1, 3, และ 5 phr โดยขึ้นงานถูกเตรียมในลักษณะแผ่นซีทที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร จากผลวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพบว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 และ 0.5 phr ค่ายังส์มอดูลัส (Young's modulus) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ไม่มีการเติมสารเสริมแรง และเมื่อปริมาณท่อนาโนคาร์บอนมากกว่า 1 phr ปรากฏว่าค่ายังส์มอดูลัสลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากการเกาะที่ท่อนาโนคาร์บอนมีค่า aspect ratio ที่สูงทำให้เมื่อเติมในปริมาณมากเกิดการจับกลุ่มกันเองมากกว่าจับกับพอลิเมอร์ ส่งผลให้การกระจายแรงทำได้ไม่ดี ดังนั้นสมบัติเชิงกลจึงมีค่าต่ำลง สำหรับผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนพบว่าอุณหภูมิในการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) มีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารเสริมแรงมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกให้แก่พอลิเมอร์ส่วนอุณหภูมิในการหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) ระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตบริสุทธิ์และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่ใส่สารเสริมแรง

ดังนั้นการวิจัยนี้จึงเกี่ยวกับการปรับปรุงความยืดหยุ่นของเมทริกซ์ PLLA โดยการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ระหว่าง PLLA และ PBAT จะได้เป็น PLLA-PBAT copolymer จากนั้นนำสารสังเคราะห์ดังกล่าวมาผสมกับ PDLA ในอัตราส่วนน้ำหนัก 1:1 เพื่อให้เป็นโครงสร้างสเตอริโอคอมเพล็กซ์ ซึ่งจะเพิ่มสมบัติทางความร้อน เช่นเดียวกับรายงานก่อนหน้านี้ของเรา การผสม PLLA กับ PDLA ทำให้เกิดการก่อตัวของสเตอริโอคอมเพล็กซ์ ซึ่งมีอุณหภูมิหลอมละลายประมาณ 225 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิของ PLLA หรือ PDLA ที่เป็นโฮโมคริสตัลไลต์ 50 องศาเซลเซียส [19] โดย stereocomplex PLLA-PBAT copolymer ถูกผสมกับ MWCNT เพื่อสร้างฟิล์มคอมโพสิตนำไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการใช้งานด้านไฟฟ้าสถิต และได้ทำการตรวจสอบโครงสร้าง stereocomplex และการเติม MWCNT ว่าส่งผลต่อโครงสร้างทางเคมี ความต้านทานไฟฟ้า สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกลของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตอย่างไร และเท่าที่เราราบ ยังไม่มีรายงานวรรณกรรมเกี่ยวกับสเตอริโอคอมเพล็กซ์ของนาโนคอมโพสิต PLLA-PBAT copolymer/MWCNT มาก่อน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นวัสดุทดแทนฟิล์มป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต เพื่อทดแทนการใช้พอลิเมอร์ที่มาจากปิโตรเลียม ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 Lactide จากบริษัท PURAC Thailand
- 3.1.2 พอลิবিวทีลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (butylene adipate-co-terephthalate, PBAT) หรือชื่อทางการค้า ECOFLEX® จากบริษัท BASF Thailand
- 3.1.3 PDLA เกรด D120 จากบริษัท PURAC Thailand
- 3.1.4 Stannous octanoate ($\text{Sn}(\text{Oct})_2$) จากบริษัท Sigma Aldrich
- 3.1.5 1-dodecanol จากบริษัท Across
- 3.1.6 Multi-walled Carbon Nanotubes จากบริษัท Haydale Technologies (Thailand)
- 3.1.7 คลอโรฟอร์ม จากบริษัท RCI Labscan Thailand.

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 เครื่องซังดิจิตอล ของบริษัท AND Company, Limited. รุ่น HR-300i
- 3.2.2 เครื่อง Gel Permeation Chromatograph (GPC) รุ่น Agilent 1260 Infinity II
- 3.2.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared (FTIR) Spectroscopy) รุ่น frontier and spotlight 200i จากบริษัท PerkinElmer (USA)
- 3.2.4 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) รุ่น D8 Advance Bruker-BioSpin จากบริษัท Bruker
- 3.2.5 เครื่องทดสอบแรงดึง (texture analyser) รุ่น TA.XT Plus จากบริษัท Stable Micro System
- 3.2.6 เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter: DSC) รุ่น DSC-4000 จากบริษัท PerkinElmer (USA)
- 3.2.7 กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM (Scanning Electron Microscopy) รุ่น HITACHI TM4000Plus ของบริษัท HITACHI จำกัด

3.2.8 เครื่องวัดมิติเตอร์แบบดิจิทัลห้อย KEITHLEY รุ่น DMM7510

3.2.9 Thermo gravimetric Analyzer (TGA) ของบริษัท PerkinElmer Instruments รุ่น Pyris Diamond TGA 4000

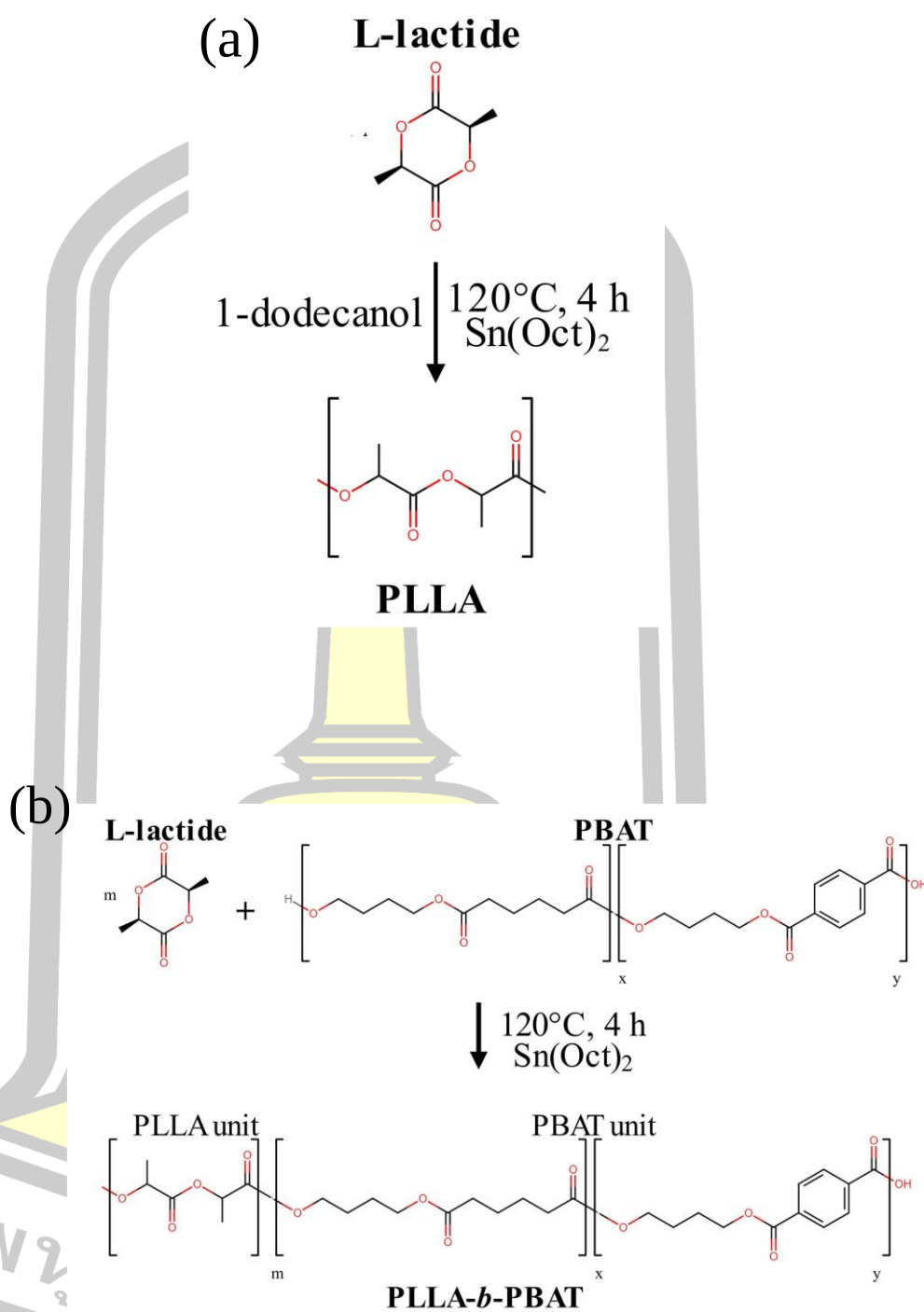
3.2.10 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี (NMR) รุ่น Ascend-400 (Prodigy unit) ของบริษัท Bruker

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

การสังเคราะห์และตรวจสอบสมบัติของ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer ที่สังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง โดยรายละเอียดการสังเคราะห์และการตรวจสอบสมบัติของโคพอลิเมอร์ มีดังนี้

3.4 วิธีการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์

เริ่มจากเตรียมแล็กไทด์ (lactide) มาทำให้บริสุทธิ์ โดยนำมาหลอมละลายกับเมทิลอะซิเตต (methyl acetate) จากนั้นปล่อยให้สารละลายตกผลึก กรองเอาผลึกแล็กไทด์ที่บริสุทธิ์มาอบในตู้สุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จากนั้นสังเคราะห์ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer โดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง ในกลุ่ม PLLA และ PLLA-PBAT copolymer โมโนเมอร์ตามลำดับ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยใช้ lactide ปริมาณ 40 กรัม และ 1-dodecanol ปริมาณ 0.0372 กรัม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับการสังเคราะห์ PLLA และ $\text{Sn}(\text{Oct})_2$ ปริมาณ 0.0678 กรัม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และ PBAT ปริมาณ 13.7828 กรัม สำหรับ PLLA-PBAT copolymer ตามภาพประกอบ 3.1 (a) และ (b) ตามลำดับ โดยพอลิเมอร์ที่เตรียมจะถูกเรียกชื่อในการสังเคราะห์คือ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer



ภาพประกอบ 3.1 การสังเคราะห์ (a) PLLA และ (b) PLLA-PBAT copolymer

3.5 การตรวจสอบสมบัติของโคพอลิเมอร์

การวิเคราะห์ทางกายภาพที่ใช้ในการแยกแยะและวัดขนาดของโมเลกุลของพอลิเมอร์ (polymers) โดยใช้การกระจายแสงหรือความหนาแน่นของสารละลายที่ไหลผ่านในเครื่อง Gel Permeation Chromatograph (GPC) บนคอลัมน์ชนิดเจล. โดยมีขั้นตอนการใช้งานเครื่อง GPC ดังนี้

เตรียมตัวอย่าง: เริ่มต้นโดยละลายสารพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ คือ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer ไปละลายกับเตตระไฮโดรฟูแรน (THF) ที่ความเข้มข้น 1.0 มก./มล. ซึ่งเป็นสารละลายที่ใช้กันอย่างแพร่หลายใน GPC สำหรับตัวอย่างพอลิเมอร์ที่หลากหลาย เป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพสำหรับพอลิเมอร์หลายชนิดและมีคุณสมบัติในการละลายที่ดี

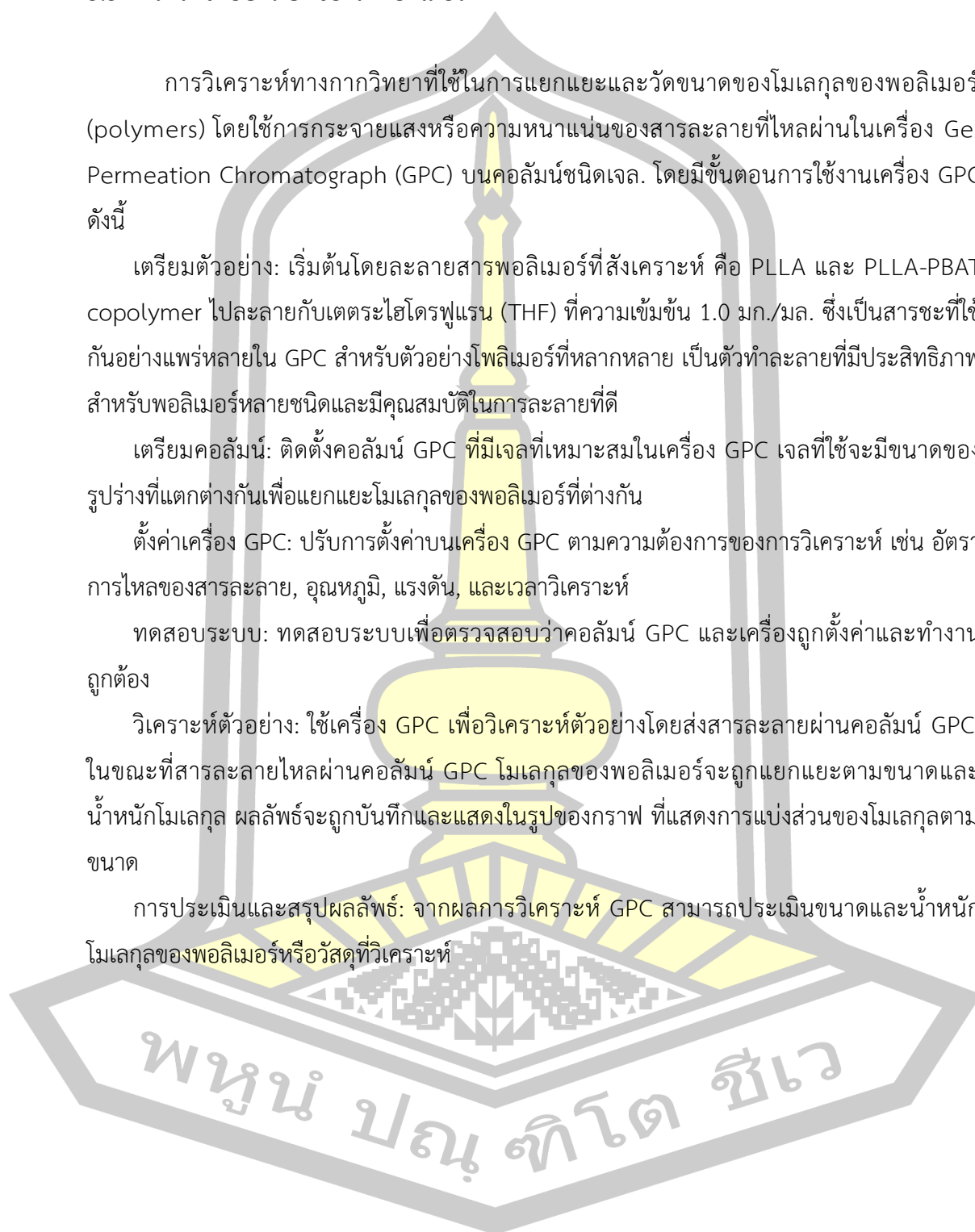
เตรียมคอลัมน์: ติดตั้งคอลัมน์ GPC ที่มีเจลที่เหมาะสมในเครื่อง GPC เจลที่ใช้จะมีขนาดของรูปร่างที่แตกต่างกันเพื่อแยกแยะโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ต่างกัน

ตั้งค่าเครื่อง GPC: ปรับการตั้งค่าบนเครื่อง GPC ตามความต้องการของการวิเคราะห์ เช่น อัตราการไหลของสารละลาย, อุณหภูมิ, แรงดัน, และเวลาวิเคราะห์

ทดสอบระบบ: ทดสอบระบบเพื่อตรวจสอบว่าคอลัมน์ GPC และเครื่องถูกตั้งค่าและทำงานถูกต้อง

วิเคราะห์ตัวอย่าง: ใช้เครื่อง GPC เพื่อวิเคราะห์ตัวอย่างโดยส่งสารละลายผ่านคอลัมน์ GPC. ในขณะที่สารละลายไหลผ่านคอลัมน์ GPC โมเลกุลของพอลิเมอร์จะถูกแยกแยะตามขนาดและน้ำหนักโมเลกุล ผลลัพธ์จะถูกบันทึกและแสดงในรูปของกราฟ ที่แสดงการแบ่งส่วนของโมเลกุลตามขนาด

การประเมินและสรุปผลลัพธ์: จากผลการวิเคราะห์ GPC สามารถประเมินขนาดและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์หรือวัสดุที่วิเคราะห์





ภาพประกอบ 3.2 เครื่อง Gel Permeation Chromatograph (GPC)

โดยพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่ (หมายถึง hydrodynamic volume หรือ random coil) จะออกมาได้เร็วกว่า เนื่องจากไม่สามารถแทรกเข้าไปตามรูพรุนของสารที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ได้ ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีขนาดเล็กกว่าจะไหลผ่านออกจากคอลัมน์ได้ช้ากว่าเนื่องจากโมเลกุลมีขนาดเล็กพอที่จะแทรกเข้าไปในรูพรุนสารที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ได้จึงเสียเวลาในการเดินทางนานขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่า GPC เป็นเทคนิคที่แยกพอลิเมอร์ตามขนาด ดังนั้นบางครั้งจึงอาจจะเรียกชื่อเทคนิคนี้ว่า “ Size Exclusion Chromatography (SEC) ” ก็ได้

3.6 การเตรียมขึ้นรูปชิ้นงานฟิล์ม

นำ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer ที่สังเคราะห์ได้มาเติม PDLA เพื่อให้เกิดโครงสร้างสเตอริโอคอมเพล็กซ์ ผสม MWCNT ที่อัตราส่วน 5 wt% เพื่อให้ฟิล์มสามารถนำไฟฟ้าได้ มาละลายในคลอโรฟอร์ม (Chloroform) ที่อัตราส่วนคลอโรฟอร์มต่อพอลิแลคไทด์ 90 ต่อ 10 โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่องกวนสารละลาย magnetic stirrer เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งได้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำสารละลายไปปั่นในเครื่อง Ultrasonic เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ MWCNT กระจายตัวในสารละลายอย่างสม่ำเสมอ แล้วเทขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มในภาตแก้วที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตาราง 3.1 อัตราส่วนที่ใช้สำหรับเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างโพลิเมอร์ PDLA และท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น

Sample		PLLA (wt%)	PLLA-PBAT copolymer (wt%)	PDLA (wt%)	MWCNT (wt%)
1	PLLA	100	-	-	-
2	PLLA+5MWCNT	100	-	-	5
3	PLLA-PBAT copolymer	-	100	-	-
4	PLLA-PBAT+5MWCNT	-	100	-	5
5	ST-PLLA	50	-	50	-
6	ST-PLLA+5MWCNT	50	-	50	5
7	ST-copolymer	-	50	50	-
8	ST-copolymer+5MWCNT	-	50	50	5

3.7 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า

ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัดแบบดิจิตอลยี่ห้อ KEITHLEY รุ่น DMM7510 ดังภาพประกอบ 3.3 จัดอุปกรณ์การวัดโดยใช้ขั้วตั้งและที่หนีบจับปลายหัววัดให้ขั้วบวกและขั้วลบ ตั้งฉากกับชิ้นงานทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่าง โดยหนึ่งตัวอย่างจะวัดจำนวน 3 ครั้ง ไม่ซ้ำจุด บันทึกค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ได้จากผลการวัดครั้งนี้ วิเคราะห์ผลจากค่าความต้านทานไฟฟ้าของตัวอย่างที่ได้ต่อไป

$$R = \rho \left(\frac{L}{A} \right)$$

โดยที่ R คือ ความต้านทานไฟฟ้าสถิต (ohm, Ω)

ρ คือ ความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุ (ohm-meter)

L คือ ความยาวของวัสดุ (meter)

A คือ พื้นที่ของตัดขวางของวัสดุ (square meter)



ภาพประกอบ 3.3 เครื่องมัลติมิเตอร์

3.8 การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมี

เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR)) เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบและศึกษาโครงสร้างของโมเลกุลของสารได้ทั้งในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส โดยศึกษาแตรนซิชั่นของการสั่นหรือการหมุนของหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลของสารนั้น ๆ โดยเทคนิคนี้เกิดจากกระบวนการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดของโมเลกุล จึงเป็นการวัดการดูดกลืนคลื่นอินฟราเรดที่ทำให้เกิดการแตรนซิชั่นของการสั่นของโมเลกุลและมีผลต่อการสั่น (vibration) ของพันธะภายในโมเลกุล



ภาพประกอบ 3.4 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR)

3.9 การทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบแรงดึง (tension test หรือ tensile test) ใช้แรงดึง (tensile force) ดึงวัสดุอย่างช้า ๆ ทำให้วัสดุยืดออก มีความยาวเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งชิ้นทดสอบขาด แล้วบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึง (tensile stress) กับความเครียดตามแนวดึง (tensile strain) แสดงผลเป็นกราฟความเค้นกับความเครียด (stress-strain curve) หรือ แรงดึงกับระยะการเปลี่ยนรูป (deformation) ซึ่งเป็นระยะที่วัสดุยืดตัวออกจากระยะเดิมโดยเครื่อง Texture analyser จากบริษัท Stable Micro System รุ่น TA.XT Plus ซึ่งนำแผ่นฟิล์มบางมาตัดที่ความกว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร เพื่อเตรียมทำการดึงที่อัตราเร็วในการดึง 1 มิลลิเมตร/นาที จำนวนตัวอย่างละ 5 ชิ้นงาน ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการดึงจนชิ้นงานขาดออกจากกัน



ภาพประกอบ 3.5 เครื่องทดสอบแรงดึง (texture analyser)

3.10 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

วัดสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC 4000 differential scan calorimeter (PerkinElmer, USA) น้ำหนักชิ้นงานประมาณ 3-5 มิลลิกรัม ถูกตัดออกจากฟิล์มและวางในถาดอะลูมิเนียม ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานทดสอบตั้งแต่ 25 ถึง 250 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราในการให้ความร้อน (heating rate) 10 °C /min ค้างไว้ 3 นาที จากนั้นทำให้เย็นตัวลงมาที่ 25 องศาเซลเซียส ที่ heating rate 10 °C/min จากนั้นให้ความร้อนแก่ตัวอย่างอีกครั้งไปจนถึง 250 องศาเซลเซียส ในอัตราเดียวกัน ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน บันทึกอุณหภูมิการตกผลึกแบบเย็น (T_{cc}) และเอนทัลปี อุณหภูมิหลอมละลายแบบโฮโม (T_{m1}) และเอนทัลปี (ΔH_{m1}) อุณหภูมิหลอมเหลวสเตอริโอคอมเพล็กซ์ (T_{m2}) และเอนทัลปี (ΔH_{m2}) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ระดับรวมของผลึก (% X_c) สำหรับทั้งผลึกโฮโมและสเตอริโอคอมเพล็กซ์ (% X_{st}) คำนวณจากสมการต่อไปนี้ [71]

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_{m,hc} + \Delta H_{m,st} - \Delta H_{cc}}{w \times \Delta H_{m(blend)}^0} \times 100\% \quad (2)$$

โดยที่ $\Delta H_{m,hc}$ และ $\Delta H_{m,st}$ คือเอนทัลปีที่หลอมละลายของโฮโมคริสตัลและสเตอริโอคอมเพล็กซ์คริสตัลตามลำดับ; ΔH_{cc} คือเอนทัลปีของการตกผลึกแบบเย็น และ w คือเศษส่วนมวลของ PLLA หรือสเตอริโอคอมเพล็กซ์ในพอลิเมอร์ผสม; $H_{m(blend)}^0$ คือค่าทางทฤษฎีของเอนทัลปีหลอมเหลวสำหรับผลึกสมบูรณ์ โดยคำนวณจาก:

$$H_{m(blend)}^0 = H_{m,hc}^0 \times f_{hc} + H_{m,st}^0 \times f_{st} \quad (3)$$

โดยที่ $H_{m,hc}^0$ และ $H_{m,st}^0$ คือค่าเอนทัลปีสำหรับโฮโมคริสตัลไลต์ (93.6 J/g) และสเตอริโอคอมเพล็กซ์คริสตัลไลต์ (142 J/g) ตามลำดับ ค่า f_{hc} และ f_{st} คือปริมาณสัมพัทธ์ของผลึกโฮโมคริสตัลและสเตอริโอคอมเพล็กซ์ ตามลำดับ ภายใต้สภาวะที่ไม่มีอุณหภูมิความร้อน และคำนวณจาก:

$$f_{hc} (\%) = \frac{\Delta H_{m,hc}}{\Delta H_{m,hc} + \Delta H_{m,st}} \times 100\% \quad (4)$$

$$f_{st} (\%) = \frac{\Delta H_{m,st}}{\Delta H_{m,hc} + \Delta H_{m,st}} \times 100\% \quad (5)$$

โดยที่ $\Delta H_{m,hc}$ และ $\Delta H_{m,st}$ ได้มาจากเทอร์โมแกรมตามสมการ (1) ความเป็นผลึกของ stereocomplex crystallites (X_{st}) ถูกคำนวณจากค่า f_{st} ที่คำนวณได้ในสมการ (5) และใช้ในสมการต่อไปนี:

$$X_{st} (\%) = X_c \times f_{st} \times 100\% \quad (6)$$

พหุ ประสิทธิภาพ



ภาพประกอบ 3.6 เครื่อง Differential scanning Calorimeter (DSC) รุ่น DSC-4000

3.11 การทดสอบโครงสร้างผลึก

XRD เป็นเครื่องมือที่อาศัยหลักการของ Bragg's Law คือ เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบกับระนาบของอะตอมภายในผลึก รังสีเอกซ์จะเกิดการสะท้อนที่มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ ทำให้มีการนำมาใช้ศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง ซึ่งผลึกของสารตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ได้ออกมาแตกต่างกัน ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่าง ๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ได้ ทำให้สามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ (Identification) โครงสร้างผลึกของวัสดุหรือสารตัวอย่างนั้นๆ ได้

พูน ปณ จิต ชเว



ภาพประกอบ 3.7 เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)

3.12 การทดสอบโครงสร้างโมเลกุล

นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี (NMR) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการพิสูจน์โครงสร้างโมเลกุลของสารเคมี โดยอาศัยปรากฏการณ์การดูดกลืนพลังงานสนามแม่เหล็กในย่านความถี่สัญญาณวิทยุที่เรียกว่า Nuclear Magnetic Resonance ที่เกิดกับไอโซโทปของธาตุบางชนิดทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง "สปิน" ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของนิวเคลียสแต่ละชนิดที่มีค่า "สปิน" ไม่เป็นศูนย์ ตัวอย่างเช่น ^1H , ^{13}C , ^{31}P และ ^{19}F เป็นต้น Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Spectroscopy เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับพิสูจน์โครงสร้างของสาร

ตัวอย่างทางเคมีอินทรีย์เคมีอนินทรีย์ ชีวเคมี และผลิตภัณฑ์ทางธรรมชาติ โดยอาศัยคุณสมบัติทางแม่เหล็กของนิวเคลียส นิวเคลียสดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่คลื่นวิทยุผลที่ได้จากการวิเคราะห์คือสเปกตรัม ซึ่งบอกได้ว่านิวเคลียสที่ดูดกลืนพลังงานนั้นมีสภาพแวดล้อมทางเคมีเป็นอย่างไร สามารถระบุได้ว่า นิวเคลียสนั้นมีกี่นิวเคลียสและต่ออยู่กับส่วนใดในโมเลกุล



ภาพประกอบ 3.8 เครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี (NMR)

3.13 ทดสอบสัณฐานวิทยา

การทดสอบด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) จากภาพประกอบ 3.7 เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีกำลังขยายไม่สูง มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การเตรียมตัวอย่างเพื่อที่จะดูด้วยเครื่อง SEM นี้ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวอย่างที่มีขนาดบาง (เพราะไม่ได้ตรวจวัดจากการที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง) การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของ ตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นเครื่อง SEM จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์หน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวของตัวอย่างที่ถูกทดสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น HITACHI TM4000Plus ตัวอย่าง ST และ ST/MWCNT ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

โดยเตรียมพื้นผิวแตกโดยนำไปหักในไนโตรเจนเหลวและตัวอย่างทั้งหมดถูกพ่นเคลือบด้วยชั้นทองบาง (20 นาโนเมตร) ก่อนเข้าเครื่องทดสอบ



ภาพประกอบ 3.9 กล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM

3.13 การทดสอบความเสถียรทางความร้อน

การทดสอบด้วยเทคนิค Thermo Gravimetric Analysis (TGA) เป็นการตรวจสอบลักษณะการผ่านกระบวนการทางความร้อนของวัสดุ โดยทำการศึกษาน้ำหนักที่หายไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยใช้อุณหภูมิ 30 – 600 องศาเซลเซียส แล้วเปรียบเทียบพฤติกรรมของน้ำหนักที่สลายไปกับอุณหภูมิที่ใช้ เริ่มจากเปิดเครื่อง TGA ใส่ค่าที่ได้ลงไปโดยที่น้ำหนักของเม็ดพลาสติกเครื่องจะชั่งให้น้ำหนักของเม็ดพลาสติกที่ใส่ลงในเครื่องประมาณไม่เกิน 10 - 15 มิลลิกรัมต่อครั้ง นำชิ้นส่วนของเม็ดพลาสติกใส่ในแผนใส่ชิ้นงาน เพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที รอจนกว่าอุณหภูมิของเครื่องถึง 600 องศาเซลเซียส ชิ้นงานจะไหม้หมดจนเป็นขี้เถ้า แล้วทำการวิเคราะห์กราฟที่ได้จากการทดสอบโดยวิเคราะห์ที่อุณหภูมิสลายตัวที่สูญเสียน้ำหนัก 10% ($T_{10\%}$)



ภาพประกอบ 3.10 เครื่อง Thermo Gravimetric Analysis (TGA)

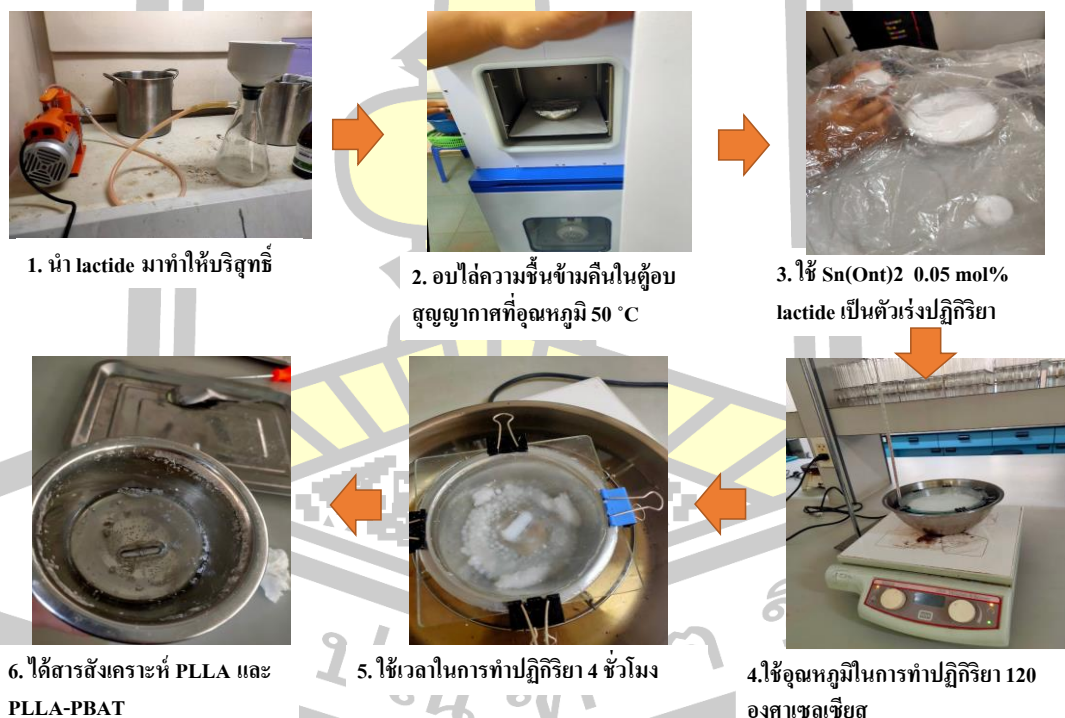


บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การสังเคราะห์ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (Ring-Opening Polymerization) เป็นกระบวนการการสร้างพอลิเมอร์โดยการเปิดลิ่งก่วงในโมโนเมอร์ที่มีลิ่งก่วงปิด จากภาพประกอบ 4.1 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer โดยโมโนเมอร์ที่นำมาใช้คือ Lactide แล้วนำสารตัวเปิดวง (initiator) ในงานวิจัยนี้ใช้ 1-dodecanol เป็นสารเปิดวงสำหรับการสังเคราะห์ PLLA ส่วน PLLA-PBAT copolymer ใช้ PBAT เป็นสารเปิดวง หลังจากเกิดการเปิดวงนั้นๆ โมโนเมอร์จะเริ่มสร้างลิ่งต่อกันที่ตำแหน่งที่เปิดวง โดยมี Sn(Oct)_2 เป็นสารเร่งปฏิกิริยา ใช้เวลาทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

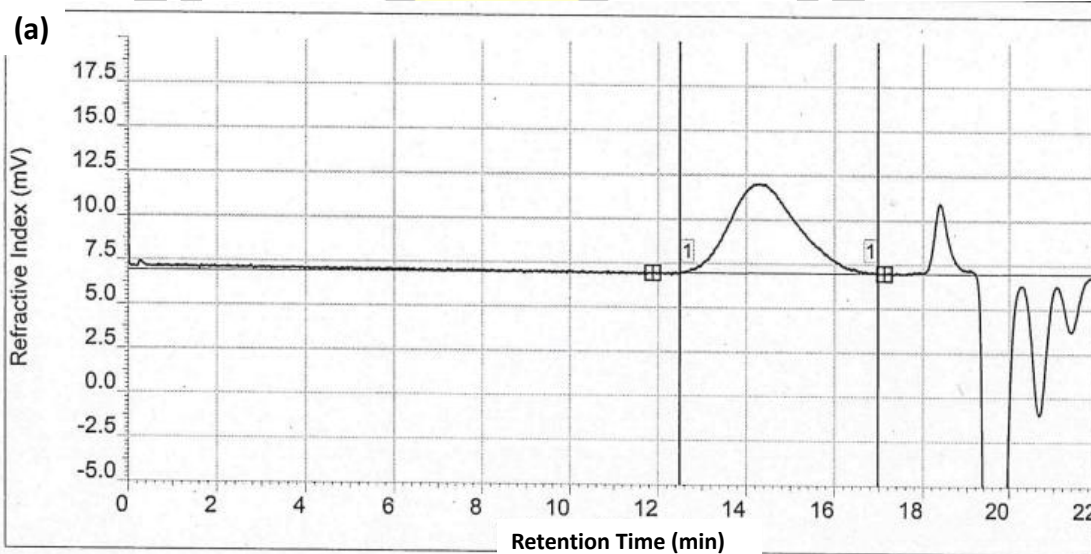


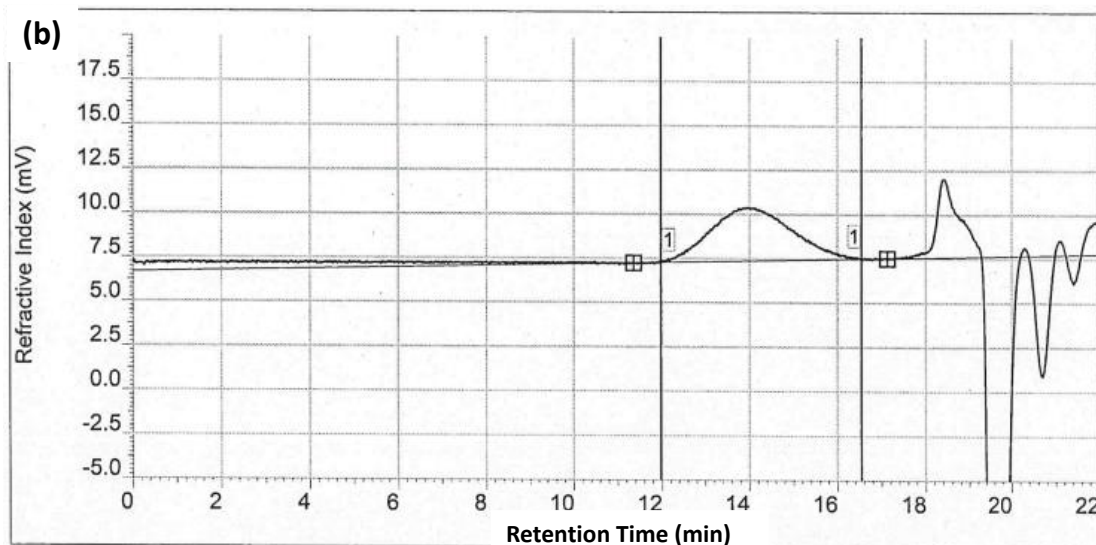
ภาพประกอบ 4.1 การสังเคราะห์ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer

4.2 ผลการวัดน้ำหนักโมเลกุล

การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer ถูกวิเคราะห์โดยเทคนิค gel permeation chromatography (GPC) ซึ่งใช้ tetrahydrofuran (THF) เป็นตัวทำละลาย

โดยพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ เคลื่อนที่ช้ากว่าโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก แต่เนื่องจากว่าภายในคอลัมน์มีเฟสอยู่นิ่ง (stationary phase) ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ทำให้พอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลเล็ก เคลื่อนที่เข้าไปและถูกกักอยู่ภายใน ต้องใช้เวลานานมากกว่าพอลิเมอร์โมเลกุลใหญ่ ดังนั้นพอลิเมอร์โมเลกุลใหญ่จึงถูกชะออกมาก่อน จากภาพประกอบ 4.2 จะเห็นได้ว่า PLLA ออกมาที่ประมาณเวลา 12.5 นาที มีค่า number average molecular weight (M_n), weight average molecular weight (M_w) และ PDI ของ PLLA ประมาณ 32,519 กรัมต่อโมล, 70,932 กรัมต่อโมล, และ 2.5 ส่วน PLLA-PBAT copolymer ออกมาที่ประมาณเวลา 12 นาที มีค่า M_n , M_w และ PDI ประมาณ 38,853 กรัมต่อโมล, 76,998 กรัมต่อโมล, และ 3.3 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า PLLA มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า PLLA-PBAT copolymer เล็กน้อย ดังแสดงค่าน้ำหนักโมเลกุลตามตาราง 4.1





ภาพประกอบ 4.2 Retention time vs response of (a) PLLA และ (b) PLLA-PBAT copolymer

ตาราง 4.1 น้ำหนักโมเลกุลและดัชนีการกระจายน้ำหนักโมเลกุล (polydispersity index, PDI) ของ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer

Sample	M_n (g/mol)	M_w (g/mol)	PDI
PLLA	32,519	70,932	2.5
PLLA-PBAT copolymer	38,853	76,998	3.3

และเมื่อได้พอลิเมอร์สังเคราะห์ตามจุดประสงค์ที่ต้องการแล้ว จึงนำมาทดสอบหล่อขึ้นรูปฟิล์ม ว่าจะสามารถขึ้นรูปได้หรือไม่ โดยใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย โดยเครื่องกวนสารละลายประมาณ 1 ชั่วโมง หรือจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 4.3 จากนั้นเทสารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกันลงบนภาตแก้ว ปหล่อให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพประกอบ 4.4 เมื่อสารละลายระเหยออกหมดแล้วก็ได้แผ่นฟิล์มเพื่อนำไปทดสอบสมบัติด้านอื่นๆ ต่อไป จากภาพประกอบ 4.5 สามารถยืนยันได้ว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์สามารถหล่อขึ้นรูปฟิล์มได้



ภาพประกอบ 4.3 ทำการละลายเม็ดพลาสติกด้วยเครื่องกวนสารละลาย



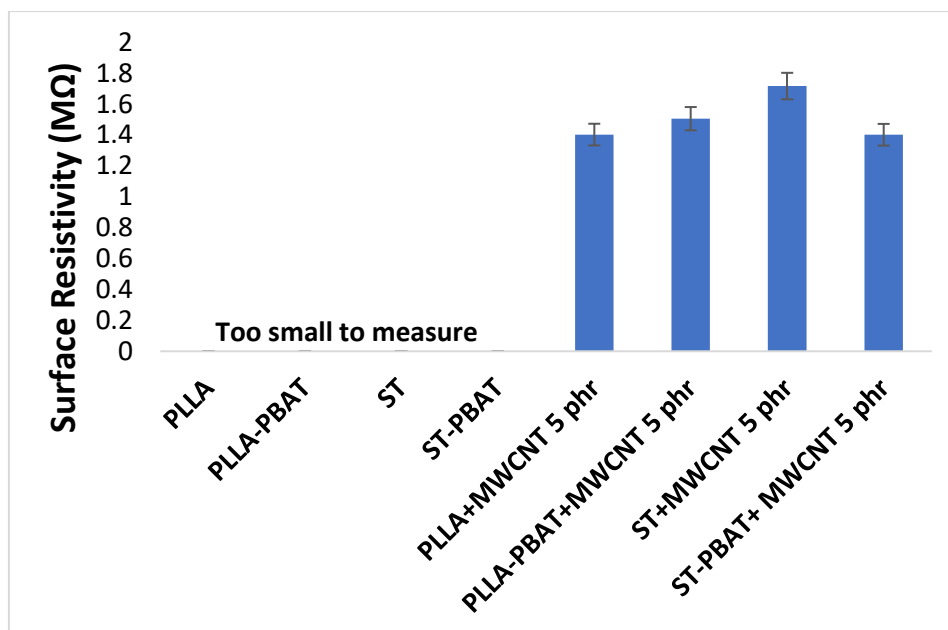
ภาพประกอบ 4.4 เทสารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกันลงบนถาดแก้ว ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 4.5 แผ่นฟิล์มบางของสารสังเคราะห์ที่ไม่เติมและเติม MWCNTs

4.3 ผลการทดลองสมบัติการนำไฟฟ้า

จากกราฟค่าความต้านทานไฟฟ้าของ PLLA, PLLA-PBAT copolymer, ST-PLLA และ ST-PBAT copolymer ที่ผสมและไม่ได้ผสม MWCNTs แสดงในภาพประกอบ 4.6 พบว่า ตัวอย่างที่ไม่ได้ผสม MWCNTs จะไม่นำไฟฟ้า ซึ่งมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ [72] อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่ม MWCNTs ที่ปริมาณ 5 wt% ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ พบว่าตัวอย่างคอมโพสิตแสดงการปรับปรุงการนำไฟฟ้าอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ตัวอย่างคอมโพสิตที่มี MWCNTs ที่ปริมาณ 5 wt% มีความต้านทานไฟฟ้าพื้นผิวที่ $\sim 10^6$ โอห์ม ซึ่งคล้ายกับฟิล์มที่ใช้แล้วในแอปพลิเคชัน ESD ในช่วง 10^6 - 10^9 โอห์ม [7] ซึ่งสังเกตว่า 5 wt% ของ MWCNTs เป็นปริมาณที่ต่ำที่สุด ซึ่งเหนี่ยวนำการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตสำหรับการใช้งานด้าน ESD และเมื่อมีการเพิ่ม MWCNTs ในระบบเกิน 5 wt% ฟิล์มคอมโพสิตจะไม่สามารถขึ้นรูปได้ ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มในกรณีของการผสมโคพอลิเมอร์/MWCNT ปริมาณของ MWCNTs ที่สูงขึ้นส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าลดลง (ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น) อย่างไรก็ตาม ความต้านทานไฟฟ้าพื้นผิวของพอลิเมอร์แต่ละตัวที่เติม MWCNTs 5 wt% ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบ่งชี้ว่าพอลิเมอร์ที่แตกต่างกันไม่ใช่ตัวแปรสำคัญในการควบคุมคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุผสมพอลิเมอร์ที่ผสม MWCNTs



ภาพประกอบ 4.6 Surface resistivity of various of nanotube doped copolymers

4.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FTIR

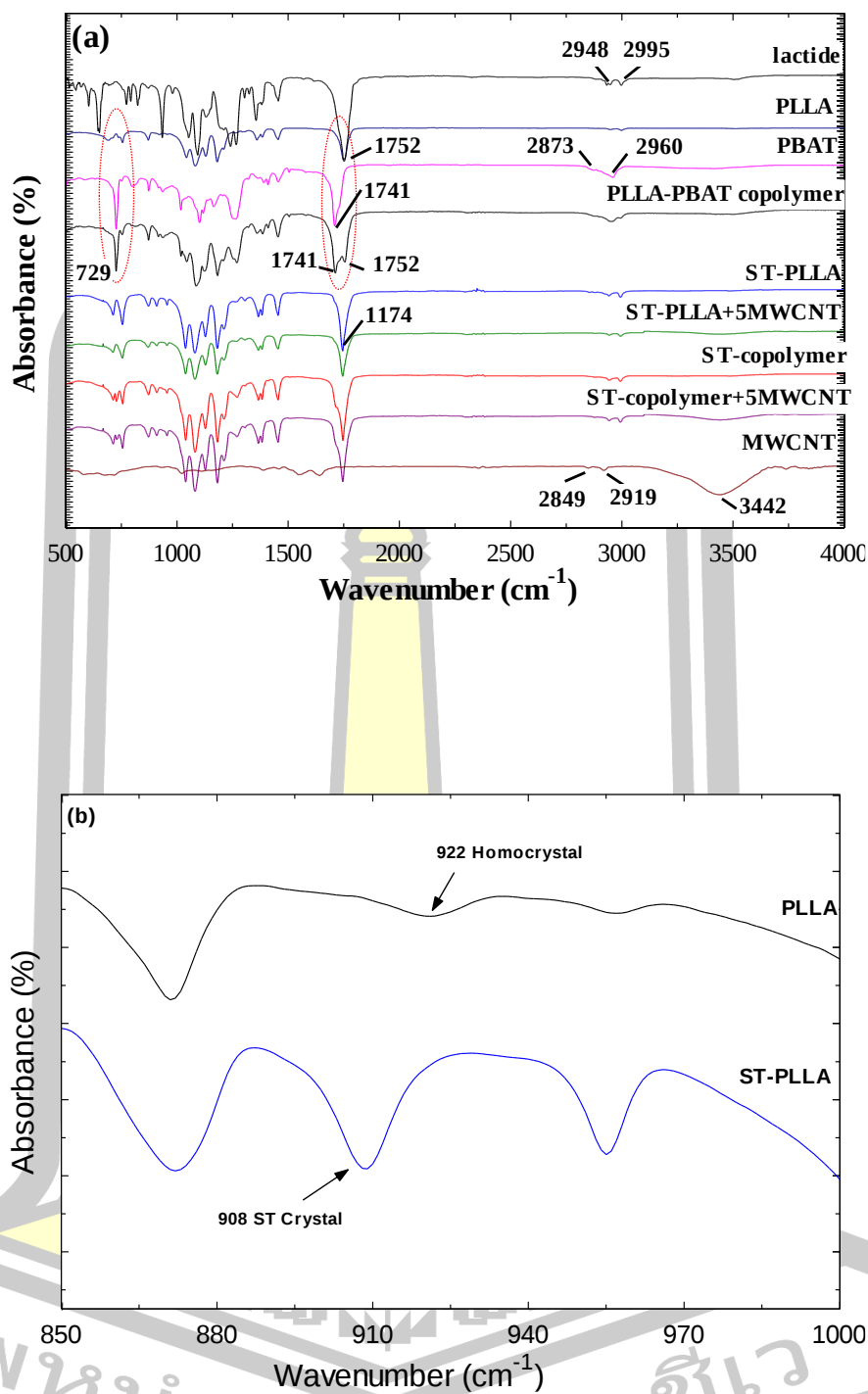
น้ำหนักโมเลกุลของ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer ที่สังเคราะห์ได้คือ $\approx 70,932$ และ $76,998$ กรัม/โมล ตามลำดับ ภาพประกอบ 4.7(a) แสดงสเปกตรัม FTIR ตั้งแต่ 500 ถึง $4,000$ cm^{-1} ของ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer ที่สังเคราะห์ขึ้น ซึ่งสเปกตรัม FTIR ของ PLLA แสดงจุดสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับความไม่สมมาตร ($2,995$ cm^{-1}) และการยืด $-\text{CH}$ แบบสมมาตร ($2,948$ cm^{-1}) นอกจากนี้ PLLA ยังประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงแหวนด้วยการมีอยู่ของ C=O ที่ยืดออกที่ $1,752$ cm^{-1} [73] ในสเปกตรัม FTIR ของ PBAT สอดคล้องกับการสั่นแบบยืดแบบไม่สมมาตรและสมมาตรของกลุ่ม CH_2 ที่พิกัด $2,960$ cm^{-1} และ $2,873$ cm^{-1} ตามลำดับ จุดสูงสุดเหล่านี้บ่งบอกถึงส่วนอะลิฟาติกที่มีอยู่ในโครงสร้างพอลิเมอร์ของ PBAT การมีอยู่ของแถบการดูดกลืนแสงที่ซับซ้อนอย่างมาก ($-\text{C=O}$) ที่พิกัด $1,741$ cm^{-1} ในสเปกตรัมอินฟราเรด (IR) ของ PBAT แสดงว่ามีกลุ่มคาร์บอนิลหลายประเภท [74] จุดสูงสุดที่ 729 cm^{-1} ในสเปกตรัม PBAT บ่งชี้ถึงการมีอยู่ของการสั่นสะเทือนการดัดงอของวงแหวนฟีนิล ซึ่งยืนยันถึงการมีส่วนร่วมของหน่วยอะโรมาติกเทอร์พทาเลตต่อโครงสร้างของพอลิเมอร์ [75]

สเปกตรัม FTIR ของ PLLA-PBAT copolymer แสดงเฉพาะพีคที่แข็งแกร่งที่ตำแหน่ง $1,714\text{ cm}^{-1}$ และ $1,752\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสอดคล้องกับกลุ่มเอสเทอร์ (C=O) ซึ่งเป็นการยึดแบบสั้นของอันตรกิริยาระหว่าง PLLA และ PBAT [76] จากตัวอย่างงานวิจัยของ Malinowski และคณะ [77] รายงานว่าสเปกตรัม FTIR ของ PLLA-PBAT copolymer แสดงการสั่นสะเทือนของวงแหวนเบนซีนในระนาบ CH ที่ตำแหน่ง 729 cm^{-1} ซึ่งไม่ปรากฏอยู่ใน PLLA บริสุทธิ์ [78] ผลลัพธ์นี้ยืนยันว่าสภาวะการสังเคราะห์และตัวริเริ่มสร้างโคพอลิเมอร์ PLLA-PBAT โดยพอลิเมอร์ไอโซไซยาเนตแบบเปิดวงแหวน

จากนั้นจึงทำการผสม PLLA และ PLLA-PBAT copolymer กับ PDLA เพื่อให้ได้โครงสร้างสเตอริโอคอมเพล็กซ์ ซึ่งสเปกตรัม FTIR ของตัวอย่างสเตอริโอคอมเพล็กซ์แสดงจุดสูงสุดที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer บริสุทธิ์ อย่างไรก็ตาม ค่าสูงสุดของ FTIR เปลี่ยนจากตำแหน่ง 922 เป็น 908 cm^{-1} สำหรับโครงสร้าง stereocomplex (ดูภาพประกอบ 4.7(b)) และที่ตำแหน่ง 922 cm^{-1} ถูกกำหนดให้กับ PLLA homocrystallite [79] ในขณะที่จุดสูงสุดที่ตำแหน่ง 908 cm^{-1} นั้นสอดคล้องกับ stereocomplex crystallite [80] นอกจากนี้ ในตัวอย่างสเตอริโอคอมเพล็กซ์ การยืดคาร์บอนิล (C=O) ถูกสังเกตที่ $1,744\text{ cm}^{-1}$

นอกจากนี้ ตัวอย่างพอลิเมอร์คอมโพสิตผสม MWCNTs แสดงแถบความถี่ใกล้เคียงตำแหน่ง $3,442\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเทียบเท่ากับกลุ่มคาร์บอนซิล OH ที่ยึดการสั่น และแถบที่ตำแหน่ง $2,992\text{--}2,888\text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับการยึดแบบสมมาตรของพันธะ C-H ในวัสดุคาร์บอนและช่วง $1,641\text{--}1,548\text{ cm}^{-1}$ ถูกกำหนดให้กับพันธะ C=O [81] นอกจากนี้ โคพอลิเมอร์ที่มี MWCNTs ไม่มีจุดสูงสุดใหม่อื่น ๆ ดังนั้น การผสม MWCNTs เข้ากับโคพอลิเมอร์จึงไม่ทำให้เกิดอันตรกิริยาทางเคมีที่มีนัยสำคัญ กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของโพลีเมอร์ใดๆ เป็นผลมาจากอันตรกิริยาทางกายภาพเพียงอย่างเดียว

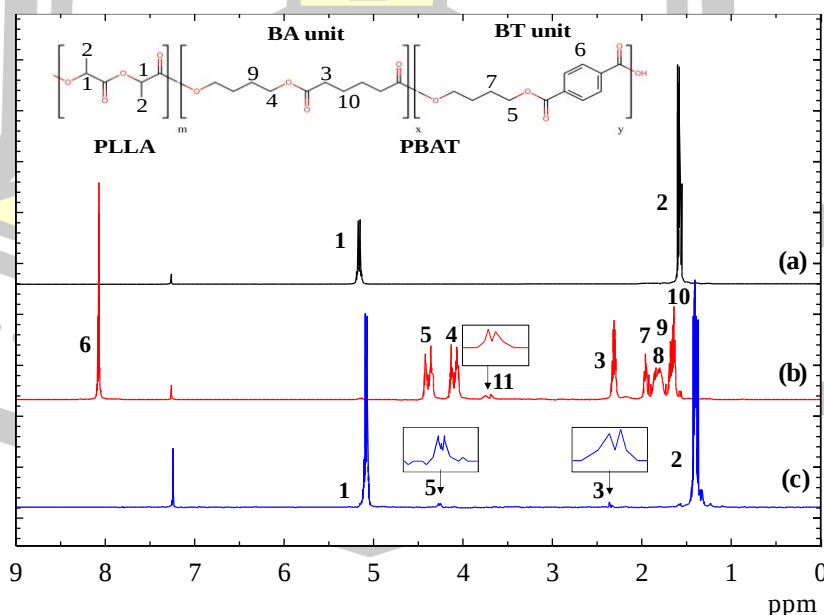




ภาพประกอบ 4.7 FTIR สเปกตรัมของ (a) PLLA, PLLA-PBAT copolymer, stereocomplex polymers และ polymer/MWCNT composites และ (b) ช่วงขยายจาก 850 ถึง $1,000 \text{ cm}^{-1}$ ของ PLLA และ ST-PLLA

4.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วยเทคนิค NMR

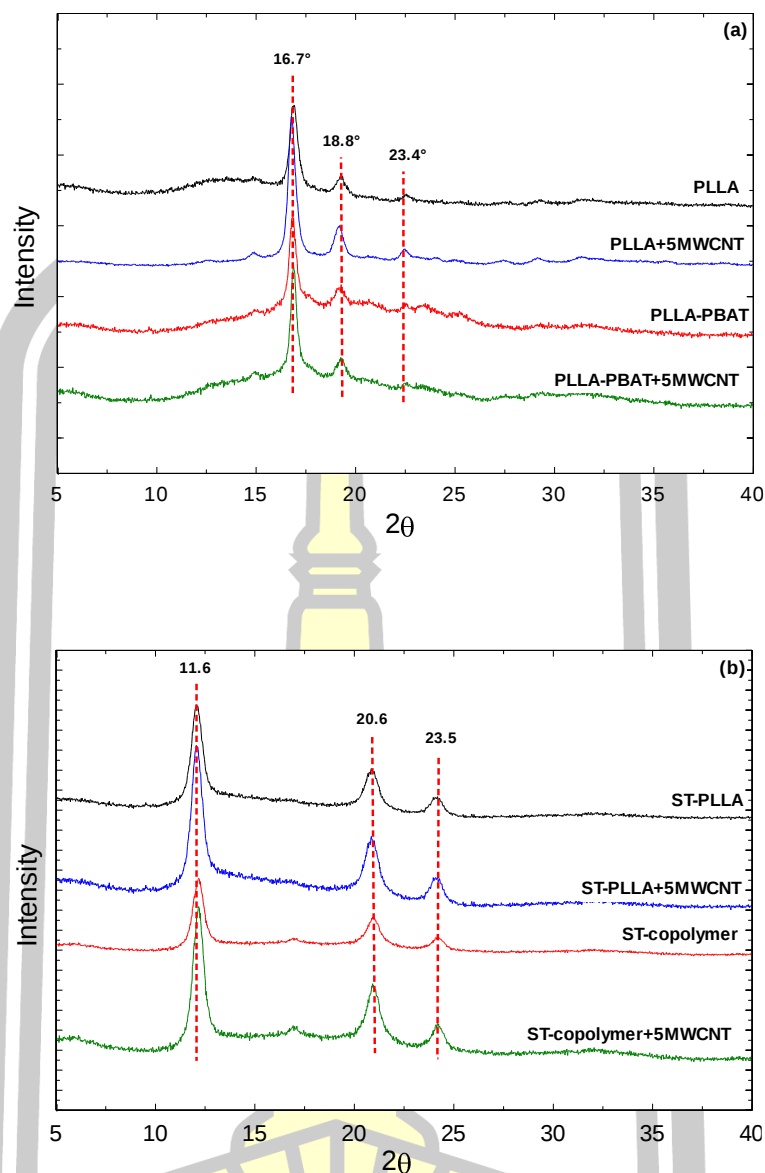
สเปกตรัม $^1\text{H-NMR}$ ของ PLLA, PBAT และ PLLA-PBAT copolymer แสดงในภาพประกอบ 4.8 สเปกตรัมของ PLLA บริสุทธิ์แสดงสัญญาณที่ 5.16 (พีค 1) และ 1.56 (พีค 2) สอดคล้องกับเมทิลโปรตอน (CH) และเมทิลโปรตอน (CH_3) ของหน่วยกรดแล็กติก [82] สำหรับ PBAT แสดงสัญญาณของอะโรมาติกโปรตอนที่ตำแหน่ง 8.09 ppm (พีค 6) บ่งชี้ถึงโครงสร้างฟีนิลของ CH ในวงแหวนเบนซีน และตำแหน่ง 2.34 ppm (พีค 3), ตำแหน่ง 1.67-1.69 ppm (พีค 8) ถูกกำหนดให้กับภายนอกและภายในของกลุ่ม CH_2 ในส่วนของหน่วย BT ตรวจพบโปรตอนเมทิลีนด้านนอกและด้านในที่ตำแหน่ง 4.38-4.46 ppm (พีค 5) และตำแหน่ง 1.66 ppm (พีค 8) ตามลำดับ สำหรับหน่วย BA กลุ่ม CH_2 ในกรด adipic จะปรากฏที่ตำแหน่ง 4.11-4.17 ppm (พีค 4), 2.34 ppm (พีค 3) และ 1.69 ppm (พีค 8) นอกจากนี้ โปรตอนเมทิลีนของหน่วยบิวเทนไดออลใกล้กับหัว -OH ของตัวเริ่มต้นมาโครถูกกำหนดที่ตำแหน่ง 3.65-3.75 ppm (พีค 10) [83] อย่างไรก็ตาม หลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงของโคพอลิเมอร์ PLLA-PBAT พีค 3.67-3.75 ppm หายไปทั้งหมดในสเปกตรัมของ PLLA-PBAT copolymer และสัญญาณโปรตอนใหม่ที่เกี่ยวข้องกับ PLLA ก็ถูกสังเกตเช่นกันที่ตำแหน่ง 5.09 ppm และ 1.49 ppm [84, 85] สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าหมู่ไฮดรอกซิลของ PBAT ได้เริ่มต้น L-แลคไทด์ในพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงแหวน ซึ่งแสดงว่าโครงสร้าง PLLA-PBAT ได้ก่อตัวขึ้นแล้ว



ภาพประกอบ 4.8 $^1\text{H-NMR}$ สเปกตรัมของ (a) PLLA, (b) PBAT และ (c) PLLA-PBAT copolymer

4.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD

เพื่อศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิห้องแสดงในภาพประกอบ 4.9 โดยเทคนิค XRD ถูกใช้วิเคราะห์ฟิล์ม PLLA, PLLA+5MWCNT, PLLA-PBAT copolymer, PLLA-PBAT+5MWCNT, ST-PLLA, ST-PLLA+5MWCNT, ST-copolymer และ ST-copolymer+5MWCNT ผลการทดลองแสดงไว้ในภาพประกอบ 4.9 (a) พบว่า PLLA มีแสดงพีคที่มุม 2θ อยู่ที่ประมาณ 16.7° , 18.8° และ 23.4° [86] และเมื่อ PLLA ผสม MWCNTs จะเห็นได้ว่าพีคการเลี้ยวเบนยังปรากฏอยู่ตำแหน่งเดิม แต่พื้นที่ใต้กราฟที่แสดงระดับความเป็นผลึกมีการเปลี่ยนแปลง คือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อผสม MWCNTs เช่นเดียวกันกับ PLLA-PBAT copolymer ก็แสดงพีคที่ตำแหน่งเดียวกันกับ PLLA และมีแนวโน้มระดับความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อผสม MWCNTs ส่วนของพอลิแลคไทด์แบบสเตอริโอคอมเพล็กซ์ (ST) (ภาพประกอบ 4.9 (b)) แสดงพีคที่มุม 2θ ที่แตกต่างกันสามจุดที่ตำแหน่งที่ประมาณ 11.68° , 20.68° และ 23.58° [87, 88] เมื่อ ST-PLLA ผสม MWCNTs ก็ยังคงแสดงพีคการเลี้ยวเบนที่อยู่ตำแหน่งเดิม และมีแนวโน้มระดับความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อผสม MWCNTs ส่วนตัวอย่าง ST-copolymer พบว่าเกิดพีคการเลี้ยวเบนที่มุม 2θ ที่ตำแหน่งที่ประมาณ 11.68° , 20.68° และ 23.58° ตำแหน่งเหล่านี้ตรงกับค่าที่รายงาน [87, 88] ซึ่งสอดคล้องกับ stereocomplex crystallites ที่ก่อตัวขึ้นในเซลล์หน่วย triclinic ซึ่งในส่วน PLLA และ PDLA บรรจุนานกันในรูปแบบเกลียว [89] และเมื่อ ST-copolymer เติม MWCNTs พีคการเลี้ยวเบนก็ยังเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกันกับ ST-copolymer นอกจากนี้ พีคทั้งหมดของ PLLA-PBAT copolymer และ ST-copolymer ค่อนข้างมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับ PLLA และ ST-PLLA ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณ PBAT ที่เพิ่มขึ้นทำให้การตกผลึกช้าลงและนำไปสู่การตกผลึกขั้นสุดท้ายที่ต่ำลง ในทางกลับกัน เมื่อการเติม MWCNTs ทำให้ตัวอย่างทั้งหมดมีระดับความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น พีคก็จะใหญ่ขึ้น ซึ่งยืนยันว่า MWCNTs มีส่วนกระตุ้นให้เกิดการผลิตนิวเคลียสของการตกผลึกมากขึ้น ผลลัพธ์ที่คล้ายกันได้รับการยืนยันในการวิเคราะห์ DSC



ภาพประกอบ 4.9 XRD profiles ของ (a) PLLA และ (b) ST-PLLA blends

4.7 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน (DSC)

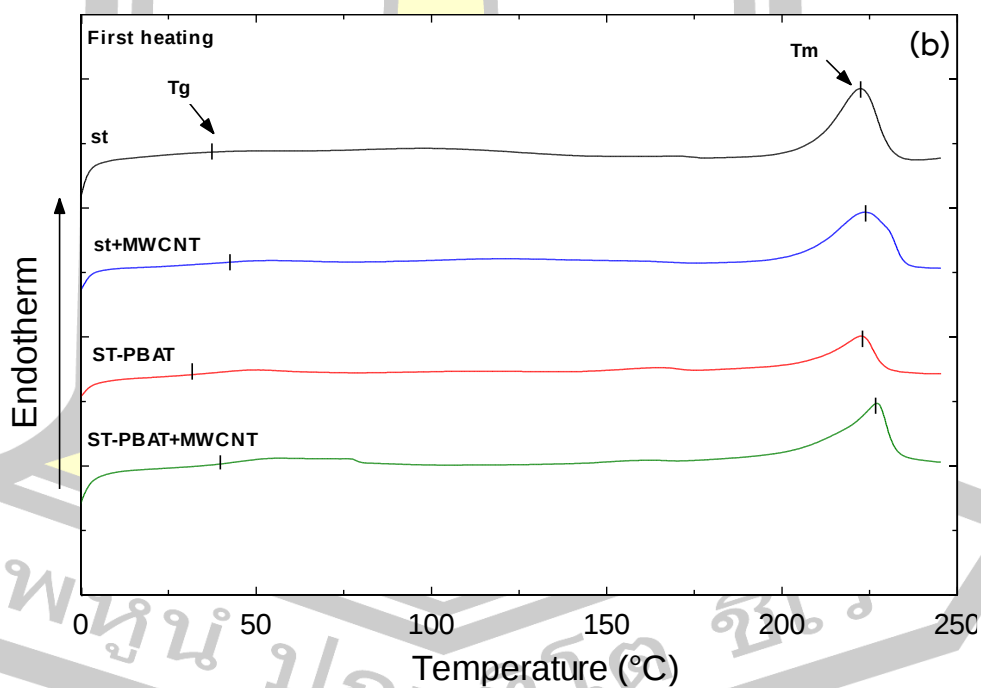
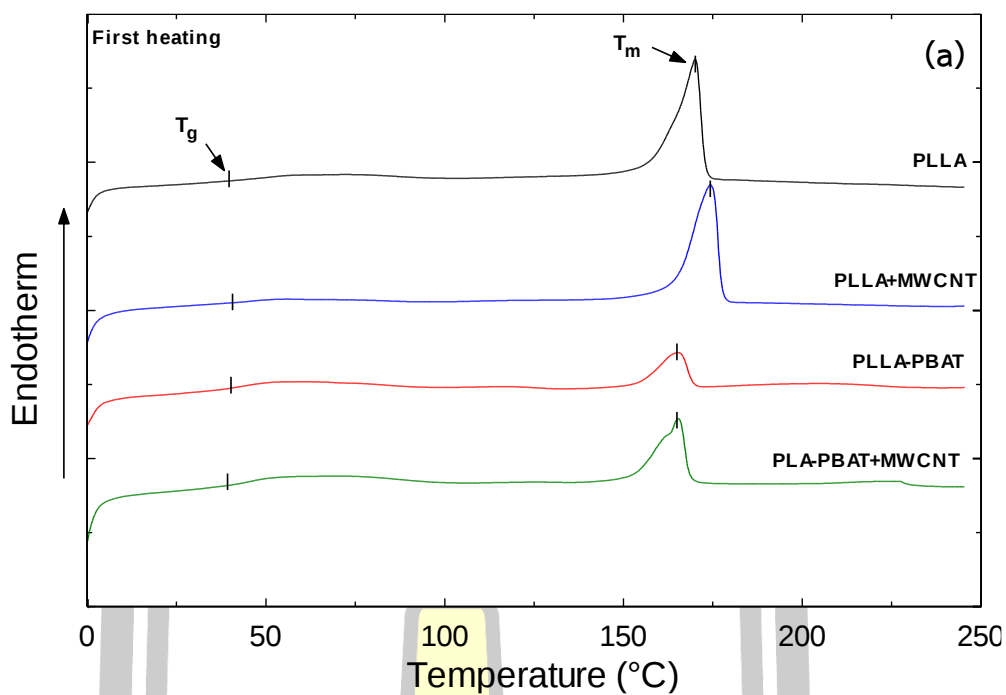
4.7.1 รอบให้ความร้อนครั้งที่ 1 (First heating)

ภาพประกอบ 4.10 แสดงเทอร์โมแกรมความร้อนครั้งที่ 1 ของฟิล์มผสม อุนหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุนหภูมิหลอมเหลว (T_m) และระดับความเป็นผลึก ($\%X_c$) ของชิ้นงานแต่ละชิ้นถูกบันทึกไว้ในตาราง 4.2 จากภาพประกอบ 4.10 (a) พบว่า PLLA มีขั้นตอนทางความร้อนสอง

ขั้นตอน: (1) อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ที่ประมาณ 47 องศาเซลเซียส และ (2) ขั้นตอนการฟิวชันดูดความร้อน (จุดหลอมเหลว, T_m) ที่มีค่าสูงสุดที่ประมาณ 170 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับ PLLA-PBAT copolymer ค่า T_g และ T_m จะลดลงเป็น ~45 องศาเซลเซียส และ ~165 องศาเซลเซียส สิ่งนี้ น่าจะเกิดจาก PBAT ใน PLLA-PBAT copolymer ทำให้สายโซ่โมเลกุลของ PLLA กว้างขึ้นและทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลลดลง ส่งผลให้ลดพลังงานสำหรับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลและการก่อตัวของพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งจะค่อยๆ เพิ่มความยืดหยุ่นของโมเลกุล ผลที่ได้คือวัสดุมีแนวโน้มที่จะอ่อนตัวลงเมื่อได้รับความร้อน [90] เมื่อเติม MWCNTs 5 wt% ลงในพอลิเมอร์ จะพบการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยของ T_g , T_m และ $\%X_c$ ของ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer เนื่องจากการเสริมแรงและผลกระทบนิวเคลียสของ MWCNTs บนพอลิเมอร์ทั้งสอง

นอกจากนี้ ผลลัพธ์ของตัวอย่างสแตอริโอคอมเพล็กซ์แสดงในภาพประกอบ 4.10 (b) จะเห็นว่าตัวอย่างทั้งหมดแสดงการก่อตัวที่สมบูรณ์ของผลึกสแตอริโอคอมเพล็กซ์ (ไม่เกิดโฮโมคริสตัลไลต์) โดยมีจุดหลอมเหลวที่ ~222 - 223 องศาเซลเซียส กล่าวคือ จุดหลอมเหลวอยู่ที่ ~50 องศาเซลเซียส เหนือค่านั่น ของ PLLA [91] ซึ่งค่า T_m ของ ST-PLLA บริสุทธิ์คือ ~222 °C, T_g ~47 องศาเซลเซียส และระดับของผลึก $\%X_{st} = 34\%$ (ดูตาราง 4.2) ในทำนองเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบ ST-PLLA กับ ST-copolymer ค่า T_g และ $\%X_{st}$ ของ ST-โคพอลิเมอร์จะลดลงเป็น ~40 องศาเซลเซียส และ ~17% และ T_m ใกล้เคียงกันที่ 222 องศาเซลเซียส ยิ่งไปกว่านั้น ค่า T_g , T_m และ $\%X_{st}$ ของ ST-PLLA และ ST-copolymer เพิ่มขึ้นด้วย MWCNTs ที่เพิ่มเข้ามา อาจได้รับการยืนยันจากการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยของ T_g และ T_m สำหรับ MWCNTs 5 wt% ที่เพิ่มเข้ามา ซึ่งการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ไม่ดีนั้นเกิดขึ้นกับสารตัวเติมนาโนที่มีความเข้มข้นมากขึ้น นอกจากนี้ ปริมาณของระดับการตกผลึกของพอลิเมอร์ในนาโนคอมโพสิตจะเพิ่มขึ้นเมื่อเติม MWCNTs ซึ่งความเข้มข้นที่มากขึ้นของสารตัวเติมนาโนอาจทำให้สารทำให้เกิดนิวเคลียสมีความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งกระตุ้นให้เกิดการก่อตัวของนิวเคลียสของการตกผลึกมากขึ้น และเพิ่มระดับของการตกผลึก กล่าวอีกนัยหนึ่ง ผลของ DSC ของคอมโพสิตระดับนาโนแสดงให้เห็นว่า MWCNTs ทำหน้าที่เป็นสารทำให้เกิดนิวเคลียสสำหรับเมทริกซ์พอลิเมอร์ [92]

พูน ปณ จิต ชเว



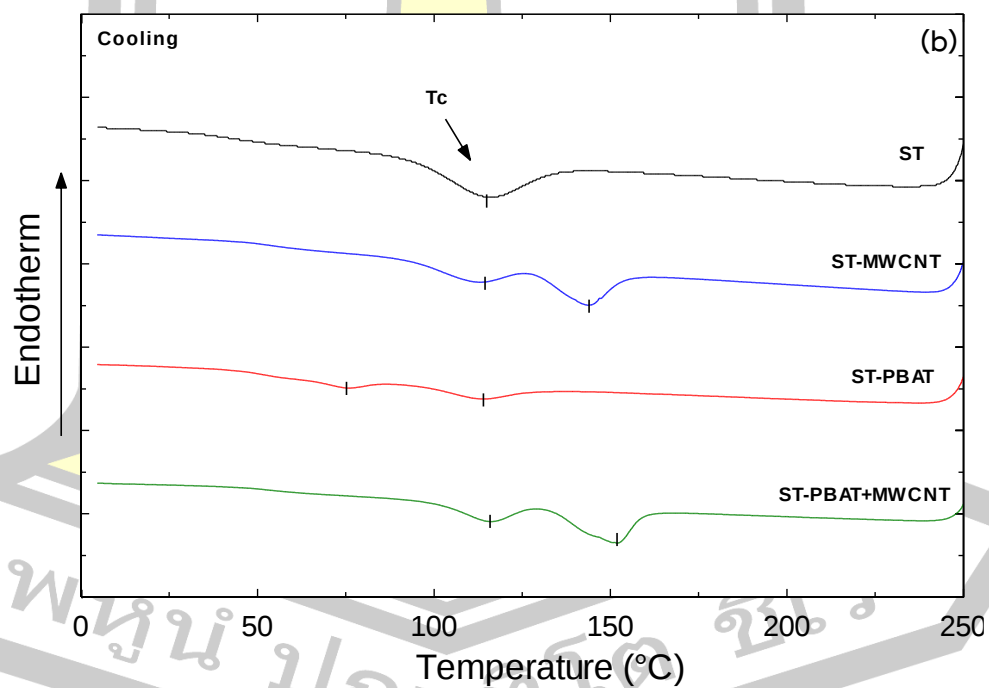
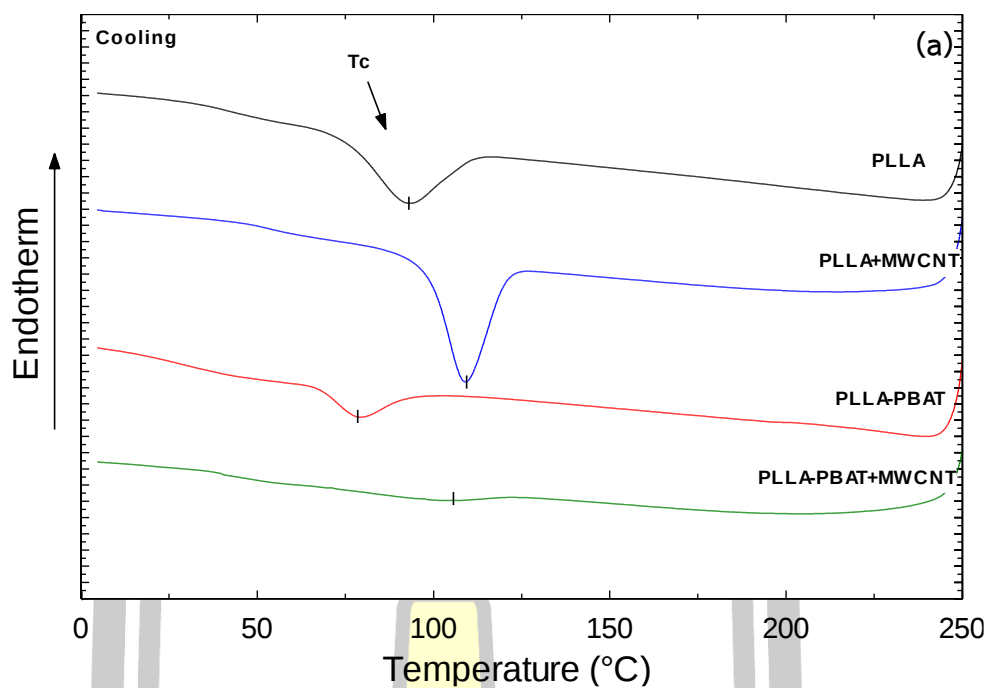
ภาพประกอบ 4.10 DSC first heating thermograms ของ (a) PLLA, PLLA+ 5MWCNT, PLLA-PBAT copolymer, PLLA-PBAT+ 5MWCNT และ (b) ST-PLLA, ST-PLLA+ 5MWCNT, ST-copolymer และ ST-copolymer+ 5MWCNT

ตาราง 4.2 DSC first heating data ของ PLLA, PLLA+ 5MWCNT, PLLA-PBAT copolymer, PLLA-PBAT+ 5MWCNT, ST-PLLA, ST-PLLA+ 5MWCNT, ST-copolymer และ ST-copolymer+ 5MWCNT

Sample	T_g (°C)	Melting 1		Melting 2		%X _c	%X _{st}
		$T_{m,hc}$ (°C)	$\Delta H_{m,hc}$ (J/g)	$T_{m,ST}$ (°C)	$\Delta H_{m,ST}$ (J/g)		
PLLA	47.16	170.0	41.8	-	-	44.6	-
PLLA+5MWCNT	47.82	174.4	42.4	-	-	45.3	-
PLLA-PBAT copolymer	45.56	165.1	13.5	-	-	14.4	-
PLLA-PBAT+5MWCNT	46.21	166.2	22.9	-	-	24.5	-
ST-PLLA	47.20	-	-	222.4	48.3	-	34.0
ST-PLLA+5MWCNT	48.12	-	-	223.6	50.1	-	35.3
ST-copolymer	40.48	-	-	222.6	25.1	-	17.7
ST-copolymer+5MWCNT	43.68	-	-	227.1	45.5	-	32.0

4.7.2 รอบการทำความเย็น (Cooling)

ภาพประกอบ 4.11 แสดงอุณหภูมิการตกผลึก T_c เมื่อเย็นตัวลง สรุปค่าได้ตามตาราง 4.3 ตัวอย่างทั้งหมดแสดงค่า T_c ที่สูงขึ้นเมื่อผสม MWCNTs เข้าไป ซึ่งบ่งชี้ว่าการเริ่มต้นของการตกผลึกจะถูกส่งเสริมเมื่อเติม MWCNT เข้าไปในตัวอย่าง ตัวอย่างเช่น PLLA มีค่า T_c ที่ 92.3 องศาเซลเซียส ส่วน PLLA ผสม MWCNT มีค่า T_c ที่ 109.0 องศาเซลเซียส และการเปลี่ยนแปลงในค่า ΔH_c เพิ่มขึ้นจาก 24.6 เป็น 31.7 J/g เผยให้เห็นว่ามีการเกิดผลึกสูงขึ้นเล็กน้อย แต่ในส่วน of PLLA-PBAT พบว่า มีค่า T_c ที่ 79.0 องศาเซลเซียส เมื่อผสม MWCNTs มีค่า T_c ที่ 100.1 องศาเซลเซียส แต่มีค่า ΔH_c ลดลงจาก 8.5 เป็น 3.7 J/g แสดงถึงมีการเกิดผลึกได้ยากขึ้น เช่นเดียวกับกับ ST-PLLA ที่มีแนวโน้มคล้ายกันกับ PLLA-PBAT copolymer คือมีค่า T_c สูงขึ้น แต่มีค่า ΔH_c ลดลง เมื่อเติม MWCNTs ในส่วนของ ST-copolymer และ ST-copolymer ผสม MWCNTs 5 wt% มีค่า T_c พิกการตกผลึกสองพิก ที่ 74.9, 113.4 องศาเซลเซียส ส่วน 111.5, 143.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ถึงการก่อตัวของทั้งผลึกโฮโมคริสตัลไลต์และผลึกแบบสเตอริโอคอมเพล็กซ์ [93] สิ่งนี้บ่งชี้ว่าโครงสร้างของพอลิเมอร์สังเคราะห์ PLLA-PBAT copolymer อาจส่งผลต่อการจัดเรียงของโมเลกุล ทำให้ PLLA และ PDLA แยกเฟสออกจากกันได้ ส่วนค่า ΔH_c เพิ่มขึ้นเมื่อเติม MWCNTs จาก 4.8, 7.5 J/g เป็น 9.3, 15.7 J/g ตามลำดับ ซึ่งมีการเกิดผลึกสูงขึ้นเล็กน้อย



ภาพประกอบ 4.11 DSC cooling thermograms ของ (a) PLLA, PLLA+ 5MWCNT, PLLA-PBAT copolymer, PLLA-PBAT+ 5MWCNT และ (b) ST-PLLA, ST-PLLA+ 5MWCNT, ST-copolymer และ ST-copolymer+ 5MWCNT

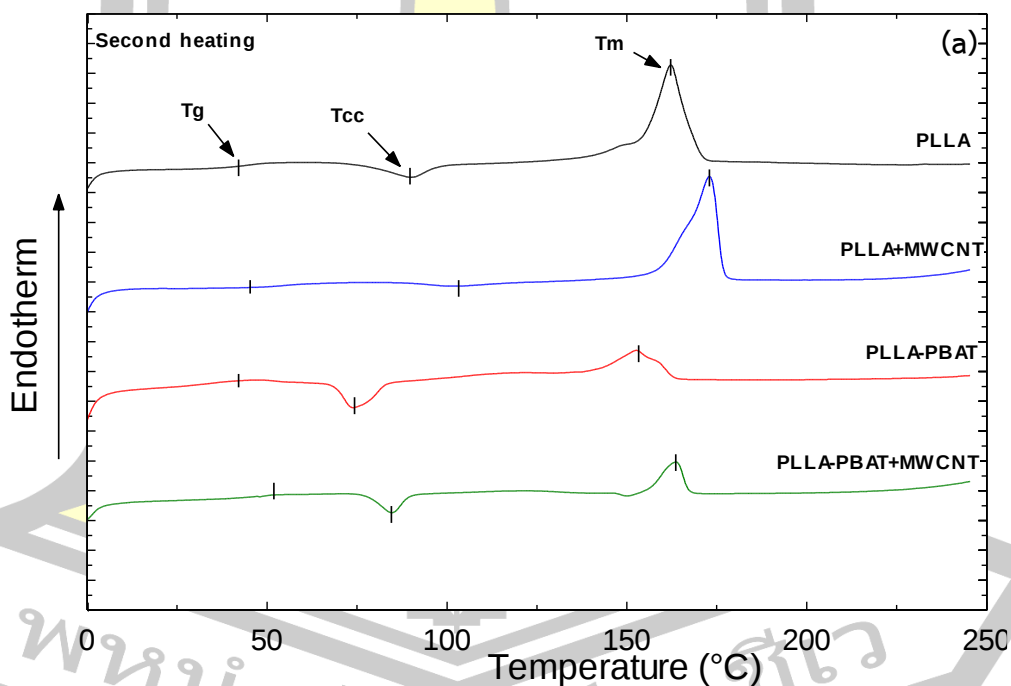
ตาราง 4.3 DSC cooling data ของ PLLA, PLLA+ 5MWCNT, PLLA-PBAT copolymer, PLLA-PBAT+ 5MWCNT, ST-PLLA, ST-PLLA+ 5MWCNT, ST-copolymer และ ST-copolymer+ 5MWCNT

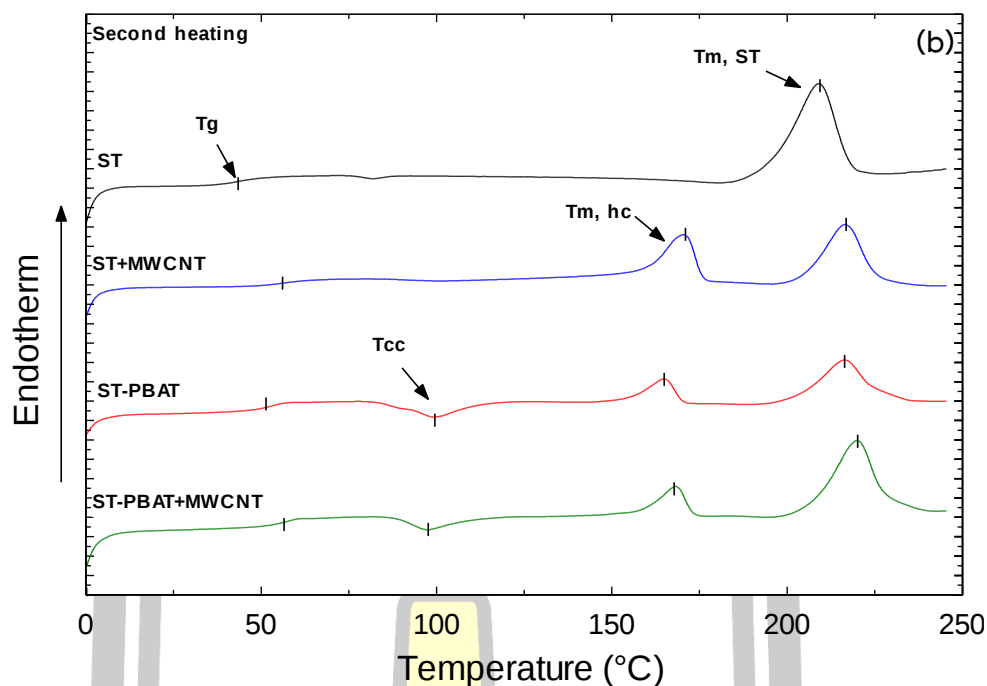
Sample	Crystallization			
	T_{c1} (°C)	(J/g)	T_{c2} (°C)	(J/g)
PLLA	92.3	22.8	-	-
PLLA+5MWCNT	109.0	31.8	-	-
PLLA-PBAT copolymer	79.0	7.5	-	-
PLLA-PBAT+5MWCNT	100.1	3.8	-	-
ST-PLLA	115.0	32.3	-	-
ST-PLLA+5MWCNT	115.5	9.3	143.5	15.7
ST-copolymer	74.9	3.9	113.3	6.9
ST-copolymer+5MWCNT	115.6	7.6	151.8	18.1

4.7.3 รอบให้ความร้อนครั้งที่ 2 (Second heating)

ภาพประกอบ 4.12 และตาราง 4.4 แสดงเทอร์โมแกรมและข้อมูลที่ได้รับจากรอบการให้ความร้อนที่สอง เมื่อเทียบกับรอบการให้ความร้อนครั้งแรก พบว่ารอบการให้ความร้อนครั้งที่สองจะมีการตกผลึกแบบเย็นเนื่องจากอัตราการเย็นตัวที่เร็วกว่า ยิ่งไปกว่านั้น จุดหลอมเหลว เอนทัลปี และความเป็นผลึกต่ำลงในระหว่างรอบการให้ความร้อนที่สอง เราสรุปว่าสิ่งนี้มาจากการสลายตัวของวัสดุระหว่างการให้ความร้อน [94] ภาพประกอบ 4.12 (a) แสดงให้เห็นว่า PLLA บริสุทธิ์มีค่า T_g ที่ประมาณ 43 องศาเซลเซียส, T_{cc} ที่ประมาณ 90 องศาเซลเซียส และ T_m ที่ประมาณ 162 องศาเซลเซียส ส่วน PLLA-PBAT copolymer มี T_g ที่ประมาณ 35 องศาเซลเซียส, T_{cc} ที่ประมาณ 73 องศาเซลเซียส และ T_m ที่ประมาณ 152 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ PLLA บริสุทธิ์ PLLA-PBAT copolymer เปลี่ยนค่า T_g , T_{cc} และ T_m เป็นค่าที่ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญในรอบการให้ความร้อนที่สอง เนื่องจาก PLLA มีระดับของผลึกที่สูงกว่า PLLA-PBAT copolymer ดังนั้น PLLA จึงมีการย่อยสลายที่ต่ำกว่า [95] อย่างไรก็ตาม คล้ายกับวงจรการให้ความร้อนครั้งแรก โดยเมื่อเพิ่ม MWCNTs ค่า T_g และ $\%X_c$ ของ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer เพิ่มขึ้น เนื่องจากความสามารถในการตกผลึกของ PLLA ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จากตัวอย่างงานวิจัยของ Ceregatti T และคณะ [96] รายงานว่า MWCNTs สามารถสร้างนิวเคลียสที่มีความเข้มข้นมากขึ้น ซึ่งกระตุ้นการผลิตนิวเคลียสของการตกผลึกมากขึ้น และเพิ่มระดับของการตกผลึก อาจเป็นผลจากสารนาโนฟิลเลอร์ที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น

จากภาพประกอบ 4.12 (b) ตัวอย่างสเตอริโอคอมเพล็กซ์แสดงการก่อตัวของสเตอริโอคอมเพล็กซ์โดยสมบูรณ์ แสดงเฉพาะการละลายของสเตอริโอคอมเพล็กซ์ในกระบวนการให้ความร้อนครั้งที่สอง โดยไม่ได้ระบุการหลอมละลายของโพลิเมอร์คริสตัล ซึ่งค่า T_g และ T_m อยู่ที่ ~ 44 องศาเซลเซียส และ ~ 208 องศาเซลเซียส และไม่พบจุดสูงสุดของการตกผลึกแบบเย็น สิ่งนี้บ่งชี้ว่าความเข้ากันได้ของ PLLA และ PDLA ยับยั้งการแยกส่วนของโซ่ PLLA/PDLA ที่จัดเรียงสลับกัน และการตกผลึกของ stereocomplex [97] ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อเพิ่ม MWCNTs ลงในสเตอริโอคอมเพล็กซ์ T_g เพิ่มขึ้นเป็น 57.1 องศาเซลเซียสตัวอย่างมีจุดหลอมเหลวสองจุดสูงสุดที่ 170 องศาเซลเซียส และ 216 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นจุดหลอมเหลวของผลึกโพลิเมอร์และสเตอริโอคอมเพล็กซ์ และตัวอย่างยังไม่แสดงการเกิดผลึกแบบเย็น เนื่องจาก PLLA และ PDLA ผสมกันไม่ดีและแสดงการแยกเฟสที่เกิดจาก MWCNTs ที่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสม นอกจากนี้ยังพบจาก ST-copolymer และ MWCNTs ที่เพิ่มเข้ามาว่าจุดสูงสุดของการตกผลึกแบบเย็นปรากฏขึ้นเนื่องจากหลังจากเย็นตัวแล้ว โซ่พอลิเมอร์จะไม่มีเวลามากขึ้นในการคลายตัวและจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างผลึก [98] ในทำนองเดียวกัน T_g , T_m และ $\%X_{st}$ ของ ST-copolymer เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม MWCNTs เนื่องจากการขัดขวางการเคลื่อนที่ของโซ่พอลิเมอร์





ภาพประกอบ 4.12 DSC second heating thermograms ของ (a) PLLA, PLLA+ 5MWCNT, PLLA-PBAT copolymer, PLLA-PBAT+ 5MWCNT และ (b) ST-PLLA, ST-PLLA+ 5MWCNT, ST-copolymer และ ST-copolymer+ 5MWCNT

ตาราง 4.4 DSC second heating data ของ PLLA, PLLA+ 5MWCNT, PLLA-PBAT copolymer, PLLA-PBAT+ 5MWCNT, ST-PLLA, ST-PLLA+ 5MWCNT, ST-copolymer และ ST-copolymer+ 5MWCNT

Sample	T_g (°C)	Cold crystallization		Melting 1		Melting 2		%X _c	%X _{st}
		T_{cc} (°C)	ΔH_{cc} (J/g)	$T_{m,hc}$ (°C)	$\Delta H_{m,hc}$ (J/g)	$T_{m,ST}$ (°C)	$\Delta H_{m,ST}$ (J/g)		
PLLA	43.98	90.0	8.5	162.3	39.6	-	-	33.2	-
PLLA+5MWCNT	56.51	102.8	2.8	172.9	43.0	-	-	42.9	-
PLLA-PBAT copolymer	35.37	73.8	10.7	152.6	12.8	-	-	2.2	-
PLLA-PBAT+5MWCNT	46.80	84.7	6.1	163.7	9.7	-	-	3.8	-
ST-PLLA	44.73	-	-	-	-	208.0	41.9	-	29.5
ST-PLLA+5MWCNT	56.96	-	-	170.3	14.1	216.5	23.2	30.4	18.6
ST-copolymer	53.35	99.0	8.1	164.8	6.7	216.4	20.2	14.5	10.5
ST-copolymer+5MWCNT	56.06	97.5	5.4	168.3	7.3	219.9	32.7	26.2	21.0

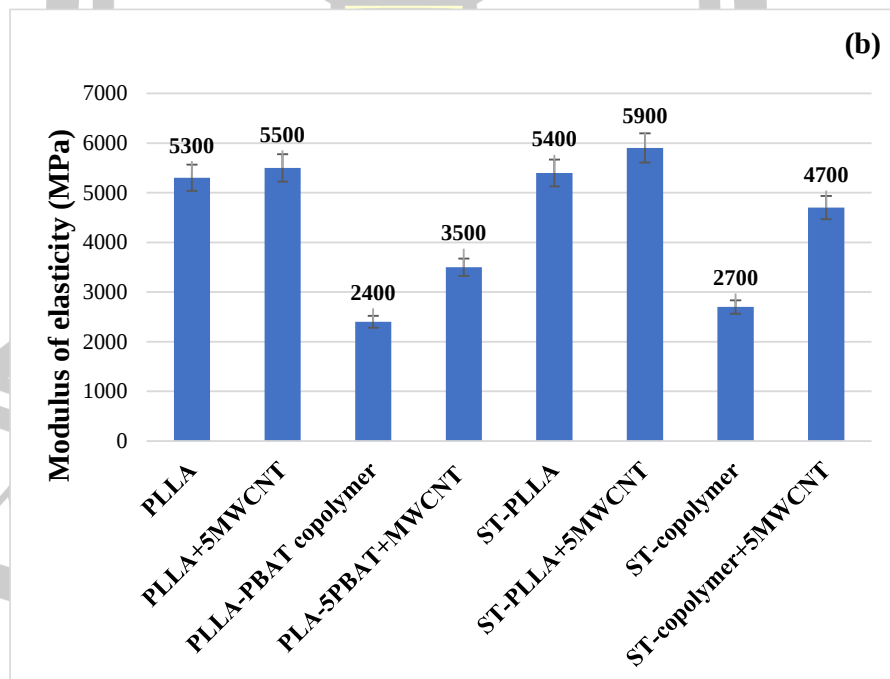
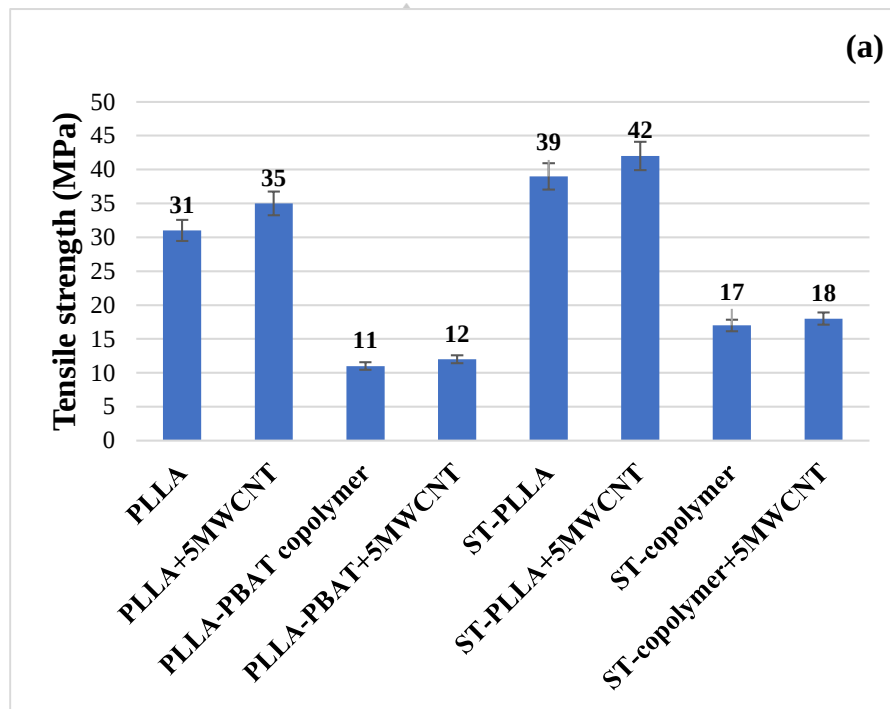
4.8 ผลการทดสอบสมบัติทางกล (Tensile testing)

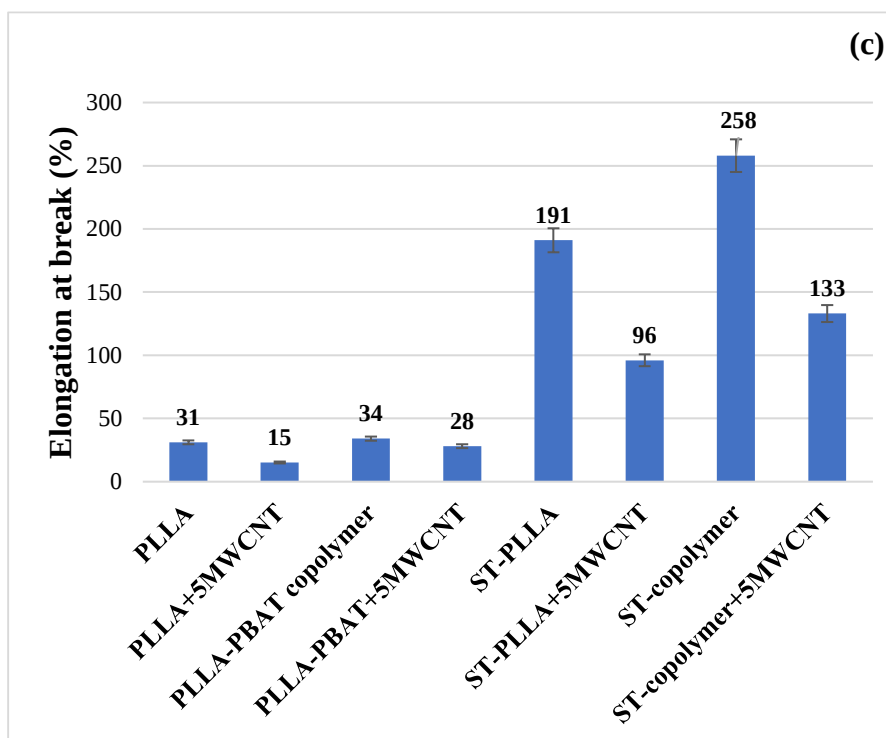
สมบัติทางกลของฟิล์ม PLLA, PLLA-PBAT copolymer, ST-PLLA, ST-copolymer และที่ผสม MWCNT 5 wt% ถูกตรวจสอบโดยเครื่องทดสอบแรงดึง แสดงในภาพประกอบ 4.13 (a) tensile strength, (b) modulus และ (c) %elongation at break

เมื่อวิเคราะห์ค่า tensile strength พบว่า PLLA และ PLLA-PBAT copolymer มีค่าประมาณ 31.3 และ 11.2 MPa ตามลำดับ เมื่อผสม MWCNT พบว่า PLLA และ PLLA-PBAT copolymer มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 34.6 และ 12.4 MPa ตามลำดับ ส่วน ST-PLLA และ ST-copolymer มีค่าสูงกว่า PLLA ที่ประมาณ 39.3 และ 16.9 MPa ตามลำดับ เมื่อ ST-PLLA และ ST-copolymer ผสม MWCNTs จะเห็นว่ามีแนวโน้มตรงข้ามกับ PLLA คือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติม MWCNTs มาที่ประมาณ 42.3 และ 17.4 MPa ตามลำดับ โดยสามารถสรุปได้ว่า ค่าทนทานต่อแรงดึงสูงสุดเมื่อเติมห่อนาโนคาร์บอนของ PLLA มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเติม MWCNTs [99] ในทางกลับกัน ST-PLLA มีแนวโน้มลดลงเมื่อเติม MWCNTs ซึ่งอาจเกิดจาก MWCNTs สามารถกระจายตัวใน PLLA มากกว่า ST

เมื่อวิเคราะห์ค่า modulus พบว่า PLLA และ PLLA-PBAT copolymer มีค่าประมาณ 5300 และ 2400 MPa ตามลำดับ เมื่อ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer ผสม MWCNTs พบว่า มีค่าประมาณ 5500 และ 3500 MPa ตามลำดับ ส่วน ST-PLLA และ ST-copolymer มีค่าประมาณ 5400 และ 2700 MPa ตามลำดับ เมื่อ ST-PLLA และ ST-copolymer ผสม MWCNTs พบว่ามีค่าประมาณ 5900 และ 4700 MPa ตามลำดับ จะเห็นว่า PLLA มีค่ามอดูลัสต่ำกว่า ST-PLLA เล็กน้อย เมื่อเติม MWCNTs พบว่า PLLA และ ST-PLLA มีแนวโน้มค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น ส่วน PLLA-b-PBAT มีค่ามอดูลัสต่ำกว่า ST-copolymer อย่างชัดเจน และเมื่อเติม MWCNTs พบว่า PLLA-b-PBAT และ ST-copolymer กลับมีแนวโน้มค่ามอดูลัสลดลง ซึ่งอาจเกิดจาก MWCNTs สามารถกระจายตัวในตัวอย่างที่ไม่ได้สังเคราะห์บล็อกโคพอลิเมอร์กับ PBAT ได้ดีกว่า

และเมื่อวิเคราะห์ค่า %elongation at break พบว่า PLLA และ PLLA-PBAT copolymer มีค่าประมาณ 31.1 และ 34.1 % ตามลำดับ เมื่อ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer ผสม MWCNT พบว่า มีค่าประมาณ 28.2 และ 14.5 % ตามลำดับ ส่วน ST-PLLA และ ST-copolymer มีค่าประมาณ 190.7 และ 258.2 % ตามลำดับ เมื่อ ST-PLLA และ ST-copolymer ผสม MWCNTs พบว่ามีค่าประมาณ 132.6 และ 96.2 % ตามลำดับ จะเห็นว่า ST-copolymer มีความสามารถในการยืดสูงสุด และทุกตัวอย่างที่เติมห่อนาโนคาร์บอนจะมีความสามารถในการยืดน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเติมห่อนาโนคาร์บอน เนื่องจากสมบัติของห่อนาโนคาร์บอนที่มีความแข็งแรงสูงเมื่อเติมเข้าไปจะทำให้ตัวอย่างมีความสามารถในการยืดลดลง [100]



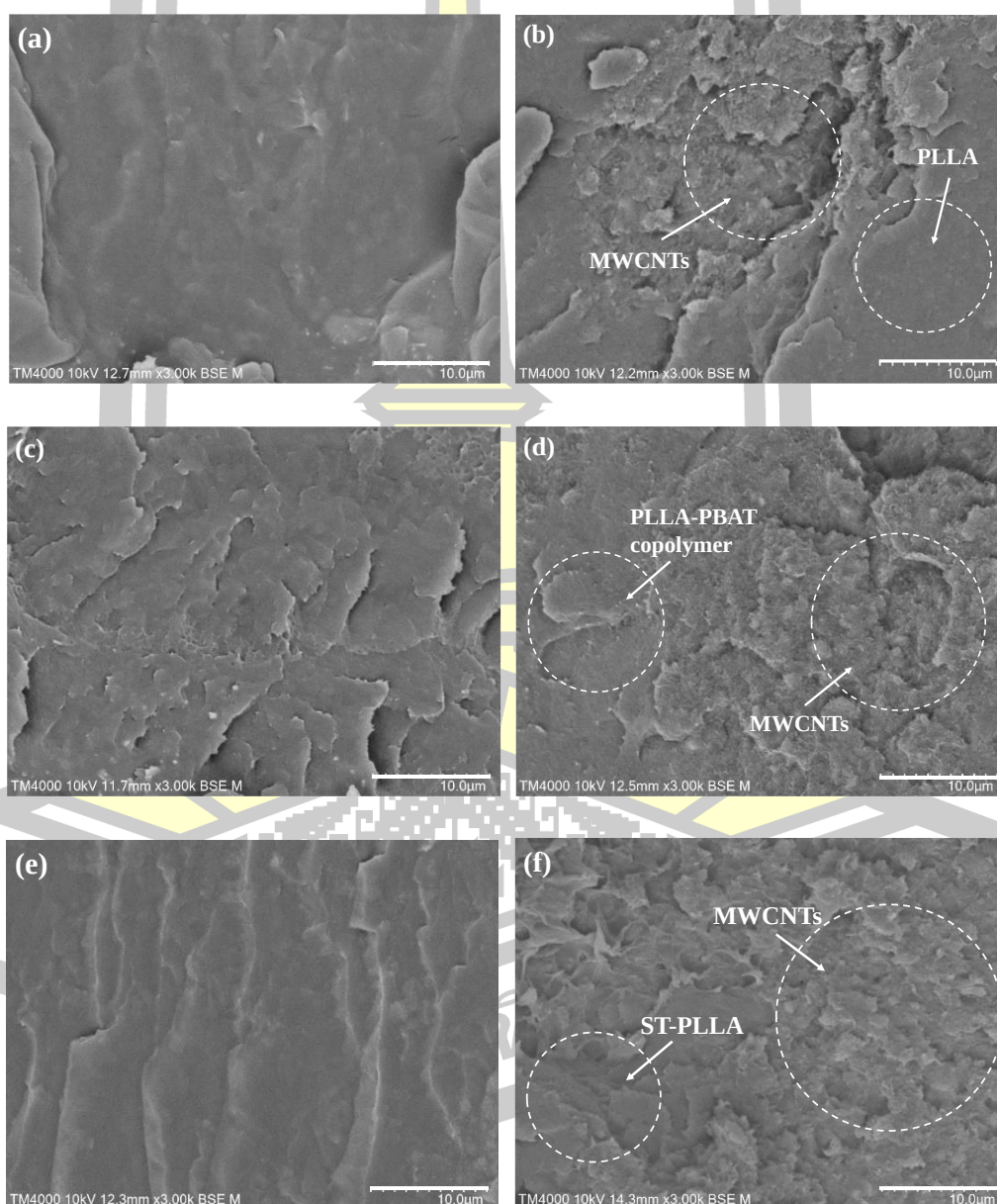


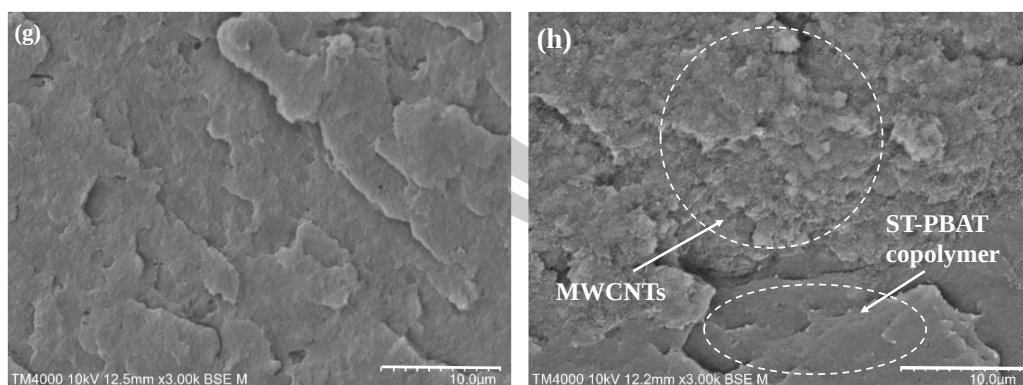
ภาพประกอบ 4.13 tensile properties ของ PLLA, PLLA+ 5MWCNT, PLLA-PBAT copolymer, PLLA-PBAT+5MWCNT, ST-PLLA, ST-PLLA+5MWCNT, ST-copolymer และ ST-copolymer+ 5MWCNT ของ (a) tensile strength, (b) modulus of elasticity และ (c) elongation at break

4.9 ผลการทดสอบสัณฐานวิทยา

การทดสอบสัณฐานวิทยาของลักษณะผิวที่แตกหักโดยไนโตรเจนเหลวของ PLLA, PLLA-PBAT copolymer, ST-PLLA และ ST-copolymer ที่เติมและไม่เติม MWCNT 5 wt% แสดงในภาพประกอบ 4.14 ภายใต้กำลังขยาย 3000 เท่า ตัวอย่าง PLLA และ ST-PLLA (ภาพประกอบ 4.14 (a) และ (e)) แสดงให้เห็นว่าสัณฐานวิทยาเป็นเนื้อเดียวกัน เป็นที่ชัดเจนว่าโครงสร้างเฟสต่อเนื่องที่ดีนั้นก่อตัวขึ้นในส่วนผสมที่ผสมผสมกัน ทำให้เกิดการแตกหักแบบเปราะทั่วไป [80] ในขณะเดียวกัน PLLA-PBAT copolymer และ ST-copolymer ที่แตกหัก (ภาพประกอบ 4.14 (c) และ (g)) แสดงพื้นผิวที่ขรุขระและแสดงพฤติกรรมที่เหนียวมากกว่า PLLA และ ST-PLLA บริสุทธิ์ตามลำดับ เป็นการแสดงให้เห็นว่าการยึดเกาะระหว่างผิวของ PLLA ได้รับการปรับปรุงโดยการสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ คล้ายกับงานวิจัยของ Srithep Y และคณะ [82] รายงานว่า เมื่อพอลิเมอร์ผสมกับโคพอลิเมอร์ จะพบว่าพื้นผิวหน้าตัดจะมีลักษณะหยาบกว่า หมายความว่ามีความเหนียวเฉพาะที่เกิดขึ้นระหว่างการแตกหัก ซึ่งบ่งชี้ว่าโคพอลิเมอร์ปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างผิวหน้าของ PLLA นอกจากนี้ การจับ

กลุ่มรวมตัวกันที่มองเห็นได้ในบางส่วนมีความชัดเจนมากขึ้นใน PLLA, PLLA-PBAT copolymer, ST-PLLA และ ST-copolymer จากการผสม MWCNTs (ภาพประกอบ 4.14 (b), (d), (f) และ (h)) ซึ่งเกิดการ MWCNTs ถูกกระจายในเฟสพอลิเมอร์ แต่เนื่องจากปฏิสัมพันธ์ของ van der Waals ที่แข็งแกร่ง ชุดรวมของ MWCNTs จึงถูกรวบรวมและพันกัน [101] ด้วยการรวมตัวของ MWCNTs ในพอลิเมอร์ผสม ทำให้พบการรวมตัวของ MWCNTs ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งอาจทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม MWCNTs ลดลงเล็กน้อย นี่เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่เป็นไปได้สำหรับการลดลงของการยึดตัวที่จุดแตกหักที่สังเกตได้ก่อนหน้านี้





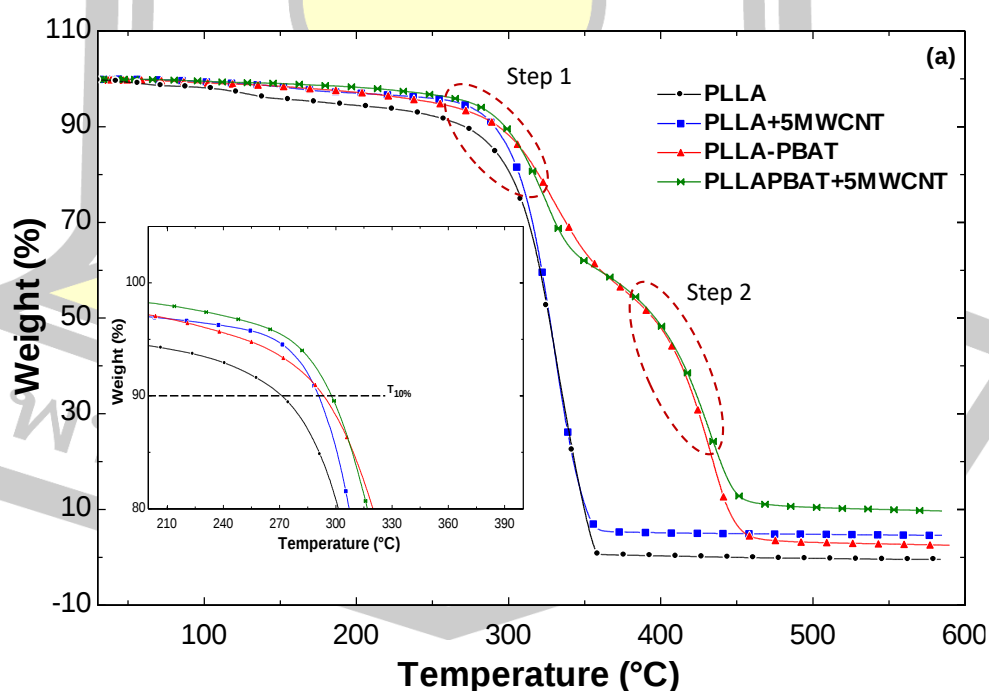
ภาพประกอบ 4.14 SEM micrographs พื้นผิวแตกหักของ (a) PLLA, (b) PLLA+5MWCNT, (c) PLLA-PBAT copolymer, (d) PLLA-PBAT copolymer+5MWCNT, (e) ST-PLLA, (f) ST-PLLA+5MWCNT, (g) ST-copolymer และ (h) ST-copolymer+5MWCNT

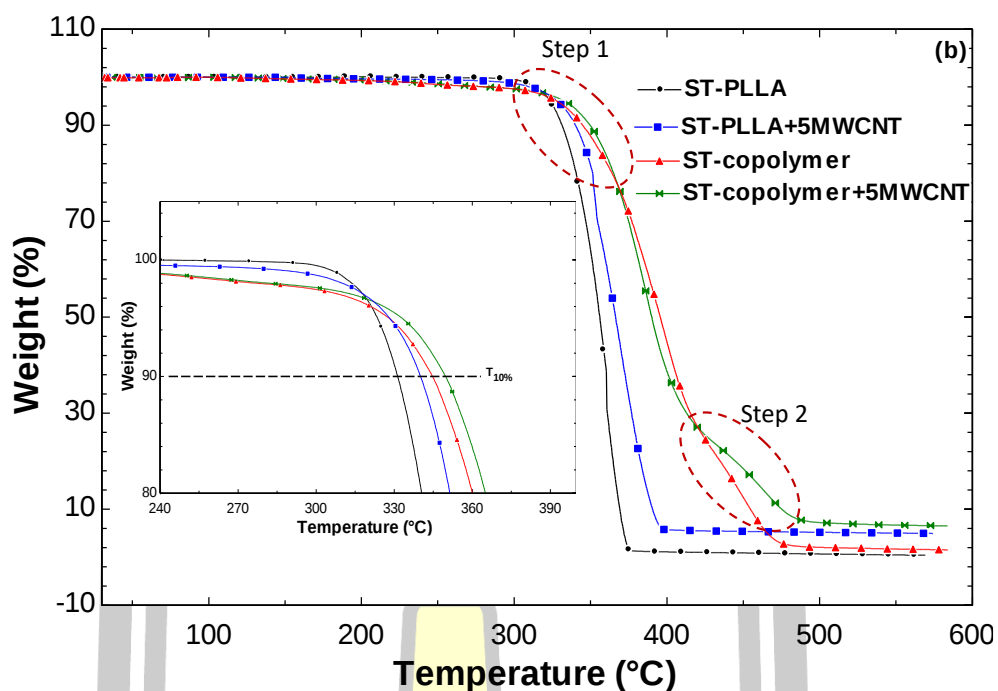
4.10 การทดสอบความเสถียรภาพทางความร้อน (Thermo Gravimetric Analysis)

ความเสถียรทางความร้อนของ PLLA, PLLA-PBAT copolymer, ST-PLLA, ST-copolymer ที่มีและไม่มี MWCNTs ถูกกำหนดจากการวัดการสูญเสียมวลระหว่างการให้ความร้อนตั้งแต่ 30 ถึง 600 องศาเซลเซียสโดยเครื่อง TGA ซึ่งผลลัพธ์แสดงไว้ในภาพประกอบ 4.15 และตาราง 4.5 แสดงรายการ อุณหภูมิที่การสูญเสียมวล 10% ($T_{10\%}$) และสารตกค้าง (%) ที่ 600 องศาเซลเซียสจากภาพประกอบ 4.15 (a) แสดงเส้นโค้ง TGA ของ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer ที่มีและไม่มีคอมโพสิตนาโน MWCNTs การสลายตัวเนื่องจากความร้อนของ PLLA และ PLLA+MWCNT ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนเดียว ดังที่แสดงในตาราง 4.5 ค่า $T_{10\%}$ ของ PLLA คือ 278.2 องศาเซลเซียสและ 292.8 องศาเซลเซียสสำหรับ PLLA+MWCNT เส้นโค้ง TGA ของคอมโพสิต PLLA+MWCNT แสดงความเสถียรทางความร้อนที่สูงกว่า PLLA บริสุทธิ์ ยิ่งไปกว่านั้น PLLA และ PLLA-PBAT copolymer ที่มี MWCNT แสดงขั้นตอนการย่อยสลายสองขั้นตอน (ดูภาพประกอบ 4.15 (a)) ใน PLLA-PBAT copolymer นั้น PLLA จะเริ่มย่อยสลายที่ ~290 องศาเซลเซียส (ขั้นตอนที่ 1) ในขณะที่ PBAT จะลดลงที่ ~400 องศาเซลเซียส (ขั้นตอนที่ 2) ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิการย่อยสลายด้วยความร้อนที่แตกต่างกันของเฟส PLLA และ PBAT [102] นอกจากนี้ เมื่อเพิ่ม MWCNTs ลงใน PLLA-

PBAT copolymer ความเสถียรทางความร้อนของส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งบ่งชี้ว่า MWCNTs สามารถเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของ PLLA ได้ [103]

จากภาพประกอบ 4.15 (b) สเตอริโอคอมเพล็กซ์มีแนวโน้มลดลงอย่างช้าๆ เมื่อเทียบกับ PLLA ตัวอย่าง Stereocomplex มีความคงตัวทางความร้อนสูงกว่า PLLA ~20% ผลลัพธ์ที่ได้ในที่นี่เผยให้เห็นว่าการสลายตัวด้วยความร้อนของตัวอย่างสเตอริโอคอมเพล็กซ์ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้นอันเป็นผลมาจากปฏิสัมพันธ์ที่แข็งแกร่งระหว่างสายโซ่ PLLA และ PDLA การเคลื่อนที่ของโมเลกุลจึงลดลงอย่างมาก ซึ่งส่งผลให้การสลายตัวเนื่องจากความร้อนลดลง [104] จากตาราง 4.5 แสดงค่า $T_{10\%}$ ของ ST-PLLA คือ 343.9 °C, ST-PLLA+MWCNT คือ 345.0 °C, ST-copolymer คือ 345.3 องศาเซลเซียสและ ST- copolymer +MWCNT คือ 347.6 องศาเซลเซียสผลที่ได้แสดงให้เห็นการเพิ่ม MWCNTs ให้กับ ST-PLLA และ ST-copolymer ทำให้มีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงขึ้น [101] เราสรุปได้ว่า MWCNTs ตลอดทั้งพอลิเมอร์เมทริกซ์ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนของนาโนคอมโพสิตเป็นส่วนใหญ่ และคุณสมบัติทางความร้อนได้รับการปรับปรุง คล้ายกับผลลัพธ์ของ PLLA ตัวอย่าง ST-copolymer และ ST-copolymer+MWCNT แสดงขั้นตอนการย่อยสลายสองขั้นตอน โดย ST-PLLA เริ่มย่อยสลายที่ ~350 องศาเซลเซียส (ขั้นตอนที่ 1) ในขณะที่ PBAT ย่อยสลายที่ ~430 องศาเซลเซียส (ขั้นตอนที่ 2) .นอกจากนี้ มวลสารตกค้างยังเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่ม MWCNTs เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วพวกมันจะสลายตัวในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าที่ตรวจสอบในที่นี้ [105]





ภาพประกอบ 4.15 TGA thermograms ของ (a) PLLA, PLLA-PBAT copolymer และ their blends with MWCNTs, และ (b) ST-PLLA, ST-copolymer และ their blends with MWCNTs
 ตาราง 4.5 TGA data determined ของ PLLA, PLLA+MWCNT, PLLA-PBAT copolymer, PLLA-PBAT+MWCNT, ST, ST+MWCNT, ST-PBAT และ ST-PBAT+MWCNT

Sample	T _{10%} (°C)	Residue (%) (600 °C)
PLLA	281.2	0
PLLA+5MWCNT	285.8	4.5
PLLA-PBAT copolymer	278.4	2.4
PLLA-PBAT copolymer+5MWCNT	282.6	9.5
ST-PLLA	343.9	0.4
ST-PLLA+5MWCNT	345.0	4.9
ST-PBAT copolymer	345.3	1.3
ST-PBAT cpolymer+5MWCNT	347.6	6.2

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

- PLLA และ PLLA-PBAT copolymer ถูกสังเคราะห์ได้สำเร็จโดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงของแลคไทด์ โดยใช้ 1-dodecanol และ PBAT เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ตามลำดับ และ Stannous octoate ถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ทั้งสอง โดยได้น้ำหนักโมเลกุล (M_w) ของ PLLA = 70,932 กรัม/โมล และ PLLA-PBAT copolymer = 76,998 กรัม/โมล ซึ่งความเหนียวของ PLLA ได้รับการปรับปรุงโดยโคพอลิเมอร์กับ PBAT จากการผลการเพิ่มประสิทธิภาพของการยึดตัว ณ จุดขาด
- โครงสร้างสแตอริโอคอมพลิกซ์ของ PLLA และ PLLA-PBAT copolymer ถูกเตรียมด้วยการเติม PDLA ที่อัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็น ST-PLLA และ ST-copolymer จากผล DSC พบว่าโครงสร้าง ST สามารถเพิ่มอุณหภูมิหลอมเหลวของ PLLA และโคพอลิเมอร์ขึ้นมากกว่า 50 องศาเซลเซียสและโซโมคริสตัลของ PLLA และโคพอลิเมอร์สามารถเป็นผลึกของ สแตอริโอคอมพลิกซ์อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ ST-PLLA และ ST-copolymer ยังสามารถเพิ่มความยืดหยุ่นสูงขึ้น 516 และ 756 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับ PLLA ถึงแม้จะเติม MWCNT ก็ยังคงมีความยืดหยุ่นสูงกว่า
- เมื่อเติม MWCNT 5 wt% พบว่า ความต้านทานไฟฟ้าบนพื้นผิวของตัวอย่างมีค่าประมาณ $1.2-1.8 \times 10^6$ โอห์ม ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งาน ESD การค้นพบนี้เป็นรากฐานสำหรับการตรวจสอบเพิ่มเติมเกี่ยวกับคอมโพสิตพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพแบบมัลติฟังก์ชันที่มีศักยภาพสำหรับการใช้งาน ESD

5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานที่ดียิ่งขึ้นของท่อนาโนคาร์บอน การปรับปรุงคุณสมบัติการละลายและการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอน ตัวเติมฟังก์ชันสำหรับการปรับปรุงฟังก์ชันบนท่อนาโนคาร์บอน ได้แก่ กรดแก่ พอลิเมอร์ โลหะ สารชีวโมเลกุล และสารประกอบที่มีหมู่อัลคิลและอะโรมาติก ท่อนาโนคาร์บอนที่มีการเติมด้วยตัวเติมฟังก์ชันเหล่านี้พบว่าละลายในตัวทำละลายต่างๆ ได้ดีกว่าท่อนาโนคาร์บอนแบบปกติ



บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

1. Shen L, Haufe JI, Patel M. Product Overview and Market Projection of Emerging Bio-Based Plastics-PRO-BIP 2009–Final Report. 2009.
2. สุปรารธนา ชุณหะวัณ. ความสำคัญของบรรจุภัณฑ์ต่อการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับสินค้าส่งออก. กรมส่งเสริมการส่งออก. 2546:1-6.
3. Narkis M, Lidor G, Vaxman A, Zuri L. New injection moldable electrostatic dissipative (ESD) composites based on very low carbon black loadings. Journal of Electrostatics. 1999;47(4):201-14.
4. Petrović ZS, Martinović B, Divjaković V, Budinski-Simendić J. Polypropylene–Carbon black interaction in conductive composites. Journal of Applied Polymer Science. 1993;49(9):1659-69.
5. Terrones M, Terrones H, Dresselhaus MS, Dresselhaus G, Charlier JC, Hernández E. Electronic, thermal and mechanical properties of carbon nanotubes. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2004;362(1823):2065-98.
6. อภิชาติ ด้านวิทยากุล. ท่อนาโนคาร์บอน: วัสดุในอนาคต. MTEC. 2553;ตุลาคม - ธันวาคม 2553:13-8.
7. Singh SP, El-Khateeb H. Evaluation of a proposed test method to measure surface and volume resistance of static dissipative packaging materials. Packag Technol Sci. 1994;7(6):283-9.
8. Srihata W, Jamnongkan T, Rattanasak U, Boonsang S, Kaewpirom S. Enhanced electrostatic dissipative properties of chitosan/gelatin composite films filled with reduced graphene oxide. Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2017;28:999-1010.
9. ปฐมพงศ์ ชนะนิล ศิริพร ไสสะอาด และ ศรตวรรัช สีหาราช. อิทธิพลของการเติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติทางไฟฟ้าของยางธรรมชาติ. วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์. 2560;9(1):50-62.

10. Poosala A, Kurdsuk W, Aussawasathien D, Pentrakoon D. Graphene Nanoplatelet/Multi-Walled Carbon nanotube/Polycarbonate Hybrid Nanocomposites for Electrostatic Dissipative Applications: Preparation and Properties. *Chiang Mai J Sci.* 2014;41(5.2):1274-86.
11. Drumright RE, Gruber PR, Henton DE. Polylactic Acid Technology. *Advanced Materials.* 2000;12(23):1841-6.
12. ชัยพลษ อภาเวท. การศึกษาการปรับปรุงสมบัติความเหนียวของ PLA ด้วยการผสม PBS. การประชุมวิชาการรายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี 2554. 2554:1419–23.
13. Martinez de Arenaza I, Sarasua J-R, Amestoy H, López-Rodríguez N, Zuza E, Meaurio E, et al. Polylactide Stereocomplex Crystallization Prompted by Multiwall Carbon Nanotubes. *J Appl Polym Sci.* 2013;130.
14. Al-Itry R, Lamnawar K, Maazouz A. Improvement of thermal stability, rheological and mechanical properties of PLA, PBAT and their blends by reactive extrusion with functionalized epoxy. *Polymer Degradation and Stability.* 2012;97(10):1898-914.
15. Veang-in O, Srithep Y. Characterization of Polymer Composites between Poly (lactic acid) and Poly (butylene succinate) with Chain Extender. *J Sci Technol MSU.* 2017;36:517-26.
16. ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์ และ กษมา จารุกัจจ. การผลิตฟิล์มพลาสติกชีวภาพจากพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเพรตเทอแรพธาเรต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2556.
17. Ramontja J, Ray SS, Pillai SK, Luyt AS. High-performance carbon nanotube-reinforced bioplastic. *Macromol Mater Eng.* 2009;294(12):839-46.
18. Pholharn D, Srithep Y, editors. Optimization of poly (L-lactide)-polybutylene adipate terephthalate diblockcopolymer by ring opening polymerization. The International Conference on Materials Research and Innovation; 2019 2018 Dec 17–21; Bangkok, Thailand: IOP Publishing.
19. Srithep Y, Pholharn D, Turng L-S, Veang-in O. Injection Molding and Characterization of Polylactide Stereocomplex. *Polym Degrad Stab.* 2015;120:290-9.
20. Srithep Y, Pholharn D. Plasticizer effect on melt blending of polylactide stereocomplex. *E POLYMERS.* 2017;17.

21. Kulkarni RK, Moore EG, Hegyeli AF, Leonard F. Biodegradable poly(lactic acid) polymers. *Journal of Biomedical Materials Research*. 1971;5(3):169-81.
22. Datta R, Tsai S-P, Bonsignore P, Moon S-H, Frank JR. Technological and economic potential of poly(lactic acid) and lactic acid derivatives. *FEMS Microbiology Reviews*. 1995;16(2):221-31.
23. Kfoury G, Raquez J-M, Hassouna F, Odent J, Toniazzi V, Ruch D, et al. Recent advances in high performance poly(lactide): from "green" plasticization to super-tough materials via (reactive) compounding. *Front Chem*. 2013;1:32-.
24. Singh RP, Pandey JK, Rutot D, Degée P, Dubois P. Biodegradation of poly(ϵ -caprolactone)/starch blends and composites in composting and culture environments: the effect of compatibilization on the inherent biodegradability of the host polymer. *Carbohydrate Research*. 2003;338(17):1759-69.
25. Yuan D, Xu C, Chen Z, Chen Y. Crosslinked bicontinuous biobased polylactide/natural rubber materials: Super toughness, "net-like"-structure of NR phase and excellent interfacial adhesion. *Polymer Testing*. 2014;38:73-80.
26. Zhao Q, Ding Y, Yang B, Ning N, Fu Q. Highly efficient toughening effect of ultrafine full-vulcanized powdered rubber on poly(lactic acid)(PLA). *Polymer Testing*. 2013;32(2):299-305.
27. Berthé V, Ferry L, Bénézet JC, Bergeret A. Ageing of different biodegradable polyesters blends mechanical and hygrothermal behavior. *Polymer Degradation and Stability*. 2010;95(3):262-9.
28. Jiao L, Huang C-L, Zeng J-B, Wang Y-Z, Wang X-L. Miscibility, crystallization and mechanical properties of biodegradable blends of poly(l-lactic acid) and poly(butylene succinate-b-ethylene succinate) multiblock copolymer. *Thermochimica Acta*. 2012;539:16-22.
29. Homklin R, Hongsriphan N. Mechanical and Thermal Properties of PLA/PBS Co-continuous Blends Adding Nucleating Agent. *Energy Procedia*. 2013;34:871-9.
30. Slager J, Domb AJ. Biopolymer stereocomplexes. *Adv Drug Deliv Rev*. 2003;55(4):549-83.
31. Tsuji H. Poly(lactide) Stereocomplexes: Formation, Structure, Properties, Degradation, and Applications. *Macromol Biosci*. 2007;5:569-97.

32. Tsuji H, Ikada Y. Stereocomplex formation between enantiomeric poly(lactic acid)s. XI. Mechanical properties and morphology of solution-cast films. *Polymer*. 1999;40(24):6699-708.
33. Tsuji H, Fukui I. Enhanced Thermal Stability of Poly(lactide)s in the Melt by Enantiomeric Polymer Blending. *Polymer*. 2003;44(10):2891-6.
34. Tsuji H. In vitro hydrolysis of blends from enantiomeric poly(lactide)s Part 1. Well-stereo-complexed blend and non-blended films. *Polymer*. 2000;41(10):3621-30.
35. Tsuji H. In vitro hydrolysis of blends from enantiomeric poly(lactide)s. Part 4: well-homo-crystallized blend and nonblended films. *Biomaterials*. 2003;24(4):537-47.
36. อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุลม. พอลิแลกติกแอซิด : พอลิเอสเทอร์จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้. *วิศวกรรมสาร มก.* 2554;24(77):99-110.
37. Chen G-Q, Patel MK. Plastics Derived from Biological Sources: Present and Future: A Technical and Environmental Review. *Chemical Reviews*. 2012;112(4):2082-99.
38. Paoprasert P. Polymers from Biological Sources: A Literature Review. *KKU Res J*. 2013;18:536-47.
39. Lertworasirikul A. Poly (lactic acid): polyester from renewable resources. *Kasetsart Engineering Journal*. 2011;77:99-110.
40. Garlotta D. A Literature Review of Poly(Lactic Acid). *Journal of polymers and the environment*. 2001;v. 9(no. 2):pp. 63-84-2001 v.9 no.2.
41. Lim L-T, Auras R, Rubino M. Processing technologies for poly (lactic acid). *Progress in polymer science*. 2008;33(8):820-52.
42. Auras R, Lim L-T, Selke S, Tsuji H. *Poly(Lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications*. Wiley. 2010:1-.
43. Kaplan DL. *Biopolymers from renewable resources*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Germany. 1998:374-9.
44. Endo S, Takizawa R, Okuda K, Takada H, Chiba K, Kanehiro H, et al. Concentration of polychlorinated biphenyls (PCBs) in beached resin pellets: Variability among individual particles and regional differences. *Marine Pollution Bulletin*. 2005;50(10):1103-14.

45. Rasal RM, Janorkar AV, Hirt DE. Poly(lactic acid) modifications. *Progress in Polymer Science*. 2010;35(3):338-56.
46. Xiao L, Wang B, Yang G, Gauthier M. Poly(Lactic Acid)-Based Biomaterials: Synthesis, Modification and Applications. 2012.
47. Sarasa J, Gracia JM, Javierre C. Study of the biodegradation of a bioplastic material waste. *Bioresource Technology*. 2009;100(15):3764-8.
48. Gironi F, Piemonte V. Bioplastics and Petroleum-based Plastics: Strengths and Weaknesses. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2011;33(21):1949-59.
49. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. งานวิจัยและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพชนิด PLA. คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2556.
50. Güven O. *Polymer Blends Handbook*, L.A. Utracki (Ed.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands (2002), (two volumes, 1442pp.). *Radiation Physics and Chemistry*. 2005;73:65-8.
51. Koning C, Van Duin M, Pagnoulle C, Jerome R. Strategies for compatibilization of polymer blends. *Progress in Polymer Science*. 1998;23(4):707-57.
52. Deng Y, Thomas NL. Blending poly(butylene succinate) with poly(lactic acid): Ductility and phase inversion effects. *European Polymer Journal*. 2015;71:534-46.
53. Bhatia A, Gupta R, Bhattacharya S, Choi H. Compatibility of Biodegradable Poly (lactic acid) (PLA) and Poly (butylene succinate) (PBS) Blends for Packaging Application. *Korea Australia Rheology Journal*. 2007;19.
54. สมหมาย ผิวสอาด สรพงษ์ ภวสุปรีห์ ภูริทัต ใจหลัก อุบล อินทร์สุวรรณ และ วราภรณ์ ผิวสอาด. การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด พอลิบิวทีลีนซัคซิเนตโคโอะติเฟทและพอลิบิวทีลีนอติเฟท เทอเลฟทาเลท (PBAT) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเป่าฟิล์ม. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี 2554. 2554:1155-9.
55. Wang L-F, Rhim J-W, Hong S-I. Preparation of poly(lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend films using a solvent casting method and their food packaging application. *LWT - Food Science and Technology*. 2016;68:454-61.

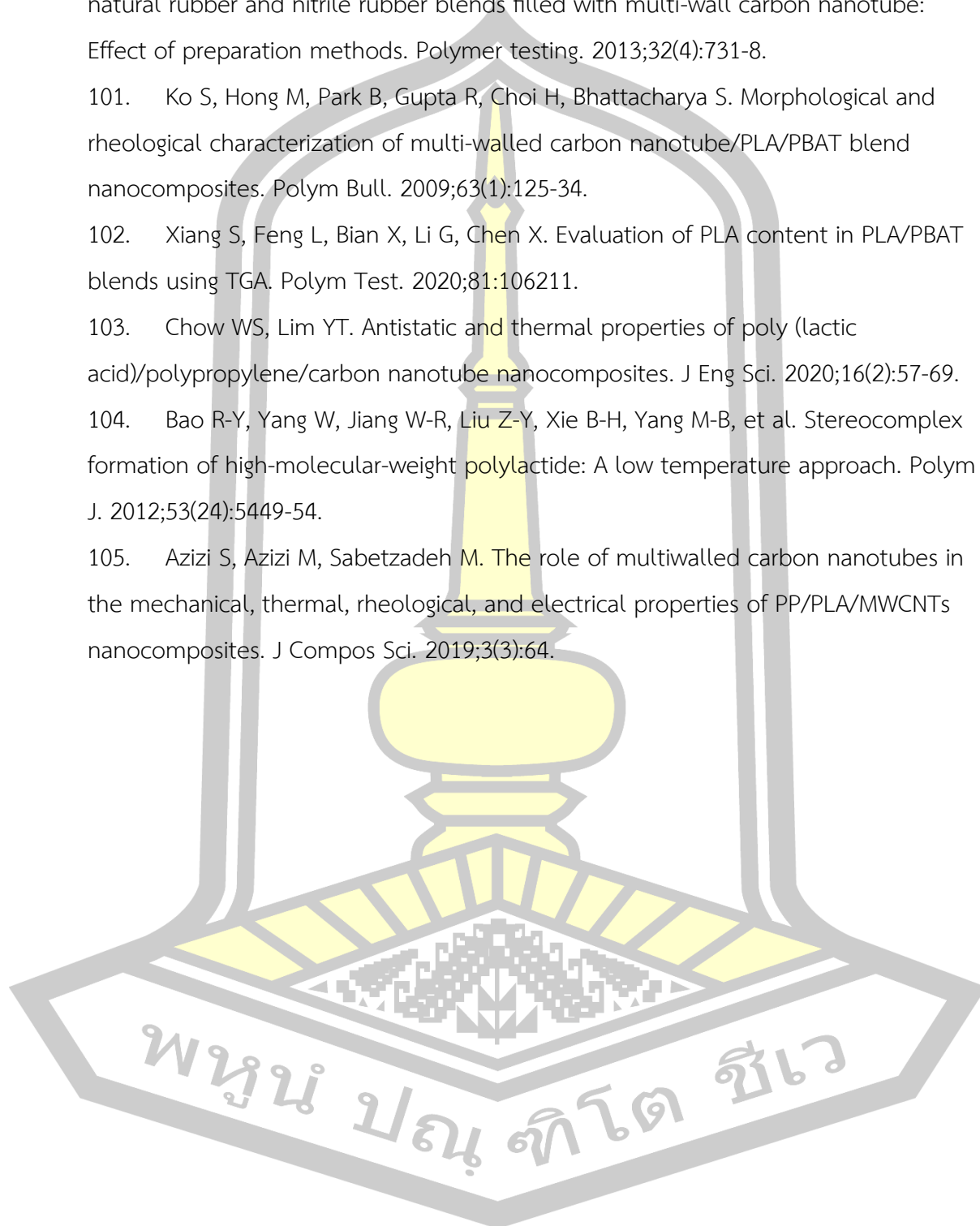
56. Pivsa-Art W, Pavasupree S, O-Charoen N, Insuan U, Jailak P, Pivsa-Art S. Preparation of Polymer Blends Between Poly (L-Lactic Acid), Poly (Butylene Succinate-Co-Adipate) and Poly (Butylene Adipate-Co-Terephthalate) for Blow Film Industrial Application. *Energy Procedia*. 2011;9:581-8.
57. Wang C, Wang Z, Zhang X. Amphiphilic building blocks for self-assembly: from amphiphiles to supra-amphiphiles. *Accounts of chemical research*. 2012;45(4):608-18.
58. Zhang X, Li Y-X, Chen X, Wang X, Xiaoyi X, Liang Q, et al. Synthesis and characterization of the paclitaxel/MPEG-PLA block copolymer conjugate. *Biomaterials*. 2005;26:2121-8.
59. Chumeka W, Pasetto P, Pilard JF, Tanrattanakul V. Bio-based diblock copolymers prepared from poly (lactic acid) and natural rubber. *Journal of Applied Polymer Science*. 2015;132(6).
60. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. นาโนเทคโนโลยี คลื่นลูกใหม่แห่งศตวรรษที่ 21. กรุงเทพฯ:ฐานมีเดีย เน็ตเวิร์ค. 2549.
61. Feynman RP. *Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology: There's Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics* CRC Pres LLC. 2003.
62. *Packaging Material Standards for ESD Sensitive Items: Electronic Components Industry Association (ECIA); 1988. 49 p.*
63. Wang Y, Jing X. Intrinsically conducting polymers for electromagnetic interference shielding. *Polymers for Advanced Technologies*. 2005;16(4):344-51.
64. น่วมเจริญ แ. สมบัติทางกายภาพของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิไบทีลีนซึกซิเนตคอมพอสิต: จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
65. บริษัทมิซูมิ ประเทศไทย จำกัด. วัสดุในงานเกี่ยวกับด้านไฟฟ้าสถิตย์. MISUMI Technical knowledge 2559.
66. Phuchaduek W, Jamnongkan T, Rattanasak U, Boonsang S, Kaewpirom S. Improvement in physical and electrical properties of poly (vinyl alcohol) hydrogel conductive polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2015;132(28).
67. Srihata W, Rattanasak U, Kaewpirom S, editors. Preparation and characterization of chitosan composite films for use in anti-electrostatic discharge application. *Pure and applied chemistry international conference*; 2015.

68. Phuchaduek W, Rattanasak U, Kaewpirom S. Investigations on electrostatic dissipative materials derived from Poly (vinyl alcohol)/ferrofluid composites. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*. 2013;35(5).
69. Pavlović M, Gligorić M, Ćosović V, Bojanić V, Tomić M, Pavlović M. Electrical conductivity of the electrodeposited copper powder filled lignocellulose composites. *Contemporary materials*. 2014(2):203-11.
70. Ali F, Mohan R. Thermal, Mechanical, and Rheological Properties of Biodegradable Polybutylene Succinate/Carbon Nanotubes Nanocomposites. *Polymer Composites*. 2009;31:1309–14.
71. Sarasua JR, Arraiza AL, Balerdi P, Maiza I. Crystallinity and Mechanical Properties of Optically Pure Polylactides and Their Blends. *Polym Eng Sci*. 2005;45(5):745-53.
72. Ke K, McMaster M, Christopherson W, Singer KD, Manas-Zloczower I. Highly sensitive capacitive pressure sensors based on elastomer composites with carbon filler hybrids. *Compos Part A Appl Sci Manuf*. 2019;126:105614.
73. Pholham D, Srithep Y, Morris J, editors. Effect of initiators on synthesis of poly (L-lactide) by ring opening polymerization. 2017 Global Conference on Polymer and Composite Materials (PCM 2017); 2017 May 23-25; Guangzhou, China: IOP Publishing.
74. Hexig A, Hexig B. Characterization of Compositional Gradient Structure of Polymeric Materials by FTIR Technology. In: Theophanides T, editor. *Infrared Spectroscopy-Materials Science, Engineering and Technology*. Rijeka, Croatia: IntechOpen; 2012. p. 339-52.
75. Tavares L, Ito N, Salvadori M, Dos Santos D, Rosa D. PBAT/kraft lignin blend in flexible laminated food packaging: Peeling resistance and thermal degradability. *Polym Test*. 2018;67:169-76.
76. Wu D, Huang A, Fan J, Xu R, Liu P, Li G, et al. Effect of blending procedures and reactive compatibilizers on the properties of biodegradable poly (butylene adipate-co-terephthalate)/poly (lactic acid) blends. *J Polym Eng*. 2021;41(2):95-108.

77. Malinowski R, Moraczewski K, Raszkowska-Kaczor A. Studies on the Uncrosslinked Fraction of PLA/PBAT Blends Modified by Electron Radiation. *Mater.* 2020;13(5):1068.
78. Kilic NT, Can BN, Kodat M, Ozkoc G. Compatibilization of PLA/PBAT blends by using Epoxy-POSS. *J Appl Polym Sci.* 2019;136(12):47217.
79. Srithep Y, Pholharn D. Plasticizer effect on melt blending of polylactide stereocomplex. *e-Polymers.* 2017;17(5):409-16.
80. Veang-in O, Srithep Y, Morris J, Pholharn D. Characterization of Polymer Composites between Stereocomplex Polylactide Blends with Poly (methyl methacrylate). *J Mater Sci.* 2021;28(4):474-81.
81. Ahmad AF, Aziz SA, Obaiys SJ, Zaid MHM, Matori KA, Samikannu K, et al. Biodegradable poly (lactic acid)/poly (ethylene glycol) reinforced multi-walled carbon nanotube nanocomposite fabrication, characterization, properties, and applications. *Polym J.* 2020;12(2):427.
82. Srithep Y, Veang-In O, Pholharn D, Turng L-S, Morris J. Improving Polylactide Toughness by Plasticizing with Low Molecular Weight Polylactide-Poly (Butylene Succinate) Copolymer. *J Renew Mater.* 2021;9(7):1267.
83. Zhao P, Liu W, Wu Q, Ren J. Preparation, mechanical, and thermal properties of biodegradable polyesters/poly (lactic acid) blends. *J Nanomater.* 2010;2010:1-6.
84. Pholharn D, Srithep Y, editors. Optimization of poly (L-lactide)-polybutylene adipate terephthalate diblock copolymer by ring opening polymerization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; 2019: IOP Publishing.
85. Ding Y, Lu B, Wang P, Wang G, Ji J. PLA-PBAT-PLA tri-block copolymers: Effective compatibilizers for promotion of the mechanical and rheological properties of PLA/PBAT blends. *Polym Degrad Stab.* 2018;147:41-8.
86. Xiao H, Lu W, Yeh JT. Effect of plasticizer on the crystallization behavior of poly (lactic acid). *J Appl Polym Sci.* 2009;113(1):112-21.
87. Shao J, Xiang S, Bian X, Sun J, Li G, Chen X. Remarkable melting behavior of PLA stereocomplex in linear PLLA/PDLA blends. *Ind Eng Chem Res.* 2015;54(7):2246-53.

88. Tsuji H. Poly (lactide) Stereocomplexes: Formation, Structure, Properties, Degradation, and Applications. *Macromol Biosci.* 2005;5(7):569-97.
89. Kang Y, Chen P, Shi X, Zhang G, Wang C. Preparation of open-porous stereocomplex PLA/PBAT scaffolds and correlation between their morphology, mechanical behavior, and cell compatibility. *RSC Adv.* 2018;8(23):12933-43.
90. Shinyama K. Mechanical and electrical properties of polylactic acid with aliphatic-aromatic polyester. *J Eng Sci.* 2018;2018:1-7.
91. Ikada Y, Jamshidi K, Tsuji H, Hyon SH. Stereocomplex formation between enantiomeric poly (lactides). *Macromolecules.* 1987;20(4):904-6.
92. Ceregatti T, Pecharki P, Pachekoski WM, Becker D, Dalmolin C. Electrical and thermal properties of PLA/CNT composite films. *Rev Mater.* 2017;22(3).
93. Srithep Y, Pholharn D, Turng L-S, Veang-in O. Injection Molding and Characterization of Polylactide Stereocomplex. *Polymer Degradation and Stability.* 2015;120:290-9.
94. Srithep Y, Pholhan D, Turng L-S, Akkaprasa T. Stereocomplex formation in injection-molded poly (L-lactic acid)/poly (D-lactic acid) blends. *J Polym Eng.* 2019;39(3):279-86.
95. Li X, Ai X, Pan H, Yang J, Gao G, Zhang H, et al. The morphological, mechanical, rheological, and thermal properties of PLA/PBAT blown films with chain extender. *Polym Adv Technol.* 2018;29(6):1706-17.
96. Ceregatti T, Pecharki P, Pachekoski WM, Becker D, Dalmolin C. Electrical and thermal properties of PLA/CNT composite films. *Rev Mater.* 2017;22.
97. Bai H, Deng S, Bai D, Zhang Q, Fu Q. Recent advances in processing of stereocomplex-type polylactide. *Macromol Rapid Commun.* 2017;38(23):1700454.
98. Srithep Y, Pholharn D, Morris J, editors. Injection-molded poly (L-lactic acid)/poly (D-lactic acid) blends: Thermal and mechanical properties. *AIP Conference Proceedings*; 2019; Taipei, Taiwan: AIP Publishing LLC.
99. Bokobza L. Multiwall carbon nanotube-filled natural rubber: Electrical and mechanical properties. *Express Polymer Letters.* 2012;6(3).

100. Kueseng P, Sae-oui P, Rattanasom N. Mechanical and electrical properties of natural rubber and nitrile rubber blends filled with multi-wall carbon nanotube: Effect of preparation methods. *Polymer testing*. 2013;32(4):731-8.
101. Ko S, Hong M, Park B, Gupta R, Choi H, Bhattacharya S. Morphological and rheological characterization of multi-walled carbon nanotube/PLA/PBAT blend nanocomposites. *Polym Bull*. 2009;63(1):125-34.
102. Xiang S, Feng L, Bian X, Li G, Chen X. Evaluation of PLA content in PLA/PBAT blends using TGA. *Polym Test*. 2020;81:106211.
103. Chow WS, Lim YT. Antistatic and thermal properties of poly (lactic acid)/polypropylene/carbon nanotube nanocomposites. *J Eng Sci*. 2020;16(2):57-69.
104. Bao R-Y, Yang W, Jiang W-R, Liu Z-Y, Xie B-H, Yang M-B, et al. Stereocomplex formation of high-molecular-weight polylactide: A low temperature approach. *Polym J*. 2012;53(24):5449-54.
105. Azizi S, Azizi M, Sabetzadeh M. The role of multiwalled carbon nanotubes in the mechanical, thermal, rheological, and electrical properties of PP/PLA/MWCNTs nanocomposites. *J Compos Sci*. 2019;3(3):64.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	อรปรียา เวียงอินทร์
วันเกิด	วันที่ 27 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2529
สถานที่เกิด	จังหวัดขอนแก่น
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	89 หมู่ 6 ตำบลลำชี อำเภอน้ำขุ่น จังหวัดกาฬสินธุ์ รหัสไปรษณีย์ 46130
ประวัติการศึกษา	- พ.ศ. 2543 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสตรีศึกษา จังหวัดร้อยเอ็ด - พ.ศ. 2549 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสตรีศึกษา จังหวัดร้อยเอ็ด - พ.ศ. 2550 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรม การผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี - พ.ศ. 2560 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม - พ.ศ. 2566 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	- พ.ศ. 2558 ได้รับทุนภูมิพล ระดับปริญญาโท - พ.ศ. 2559 ทุนค่าใช้จ่ายโครงการวิจัยของนิสิตระดับปริญญาโท ประจำปี งบประมาณ 2559 - พ.ศ. 2561 ได้รับทุนวิทยานิพนธ์ดีเด่น ระดับปริญญาโท - พ.ศ. 2563 โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (ทุน TGIST) ระดับปริญญาเอก ประจำปีงบประมาณ 2563 - พ.ศ. 2564 ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อพัฒนานิสิตระดับบัณฑิตศึกษา (ปริญญาเอก) งบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2564
ผลงานวิจัย	- พ.ศ. 2557 เรื่อง Mechanical, Thermal and Morphological Properties of Plasticized Poly (lactic acid)-Sisal Fibers Composites ได้รับรางวัล Best Paper ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ The Sixth International Conference on Sciences, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being - พ.ศ. 2558 เรื่อง Injection molding and characterization of polylactide stereocomplex. Y Srithep, D Pholharn, LS Turng, O

Veang-in. Polymer Degradation and Stability 120, 290-299

- พ.ศ. 2558 เรื่อง Sustainable polymers: from recycling of non-biodegradable to renewable resources composites and foams. Y SRITHEP, LS TURNG, J MORRIS, D PHOLHARN, O VEANGIN. Engineering Access 1 (2), 24-28

- พ.ศ. 2559 เรื่อง Effects of nucleation and stereocomplex formation of poly (lactic acid). Y Srithep, D Pholharn, LS Turng, O Veang-in, J Morris. Journal of Polymer Engineering 36 (7), 673-679

- พ.ศ. 2559 เรื่อง Characterization of Plasticized Polylactide Stereocomplex ได้รับรางวัล Best Paper ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ The Eighth International Conference on Sciences, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being

- พ.ศ. 2560 เรื่อง การวิเคราะห์ผลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีเร็นซัคซิเนตเมื่อเติมสารช่วยยืดสายโซ่โมเลกุล ได้รับรางวัลวิทยานิพนธ์ดีเด่น ระดับปริญญาโท กลุ่มวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จากโครงการประกวดวิทยานิพนธ์ดีเด่น ปีการศึกษา 2560 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

- พ.ศ. 2560 เรื่อง การวิเคราะห์ผลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีเร็นซัคซิเนตเมื่อเติมสารช่วยยืดสายโซ่โมเลกุล Characterization of Polymer Composites between Poly (lactic acid) and Poly (butylene succinate) with Chain Extender. O Veang-in, Y Srithep

- พ.ศ. 2560 เรื่อง Effect of banana fibers and plasticizer on melt processing of poly (vinyl alcohol). Y Srithep, D Pholharn, O

Veang-in, S Yangyuen. Journal of Polymer Engineering 37 (4), 335-343

- พ.ศ. 2560 เรื่อง การวิเคราะห์คุณลักษณะของพอลิแลคติกแอซิดนาโนคอมโพสิต Characterization of Poly (lactic acid) Nanocomposites. Y Srithep, Y Baimark, O Veang-in

- พ.ศ. 2562 เรื่อง การวิเคราะห์ผลของการใช้พอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำเพื่อเป็นพลาสติกไซเซอร์ในพอลิแลคติกแอซิดน้ำหนักโมเลกุลสูง Characterization of Using Low Molecular Weight Poly(lactic acid) as a Plasticizer in High Molecular Weight Poly(lactic acid). อรปริยา เวียงอินทร์ และ ยศฐา ศรีเทพ

- พ.ศ. 2562 เรื่อง ผลของสารช่วยยืดสายโซ่พอลิเมอร์ และเส้นใยกล้วยต่อสมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ Effect of Chain Extender and Banana Fiber on Properties of Poly(vinyl alcohol). Yottha Srithep, Dutchanee Pholharn, Supan Yangyuen, Onpreeya Veang-in

- พ.ศ. 2562 เรื่อง ผลของชนิดตัวทำละลายต่อลักษณะเส้นใยพอลิแลคไทด์ที่เตรียมด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง Effect of Solvents on Polylactide Fiber Morphology Prepared by Electrospinning Process. Yottha Srithep, Onpreeya Veang-in and Alongkorn Lamom

- พ.ศ. 2563 เรื่อง อิเล็กโตรสปินนิงของวัสดุผสมพอลิคาโพรแลคโตนและพอลิแลคไทด์ : สมบัติทางความร้อน ทางกล และการย่อยสลาย Electrospinning of Polycaprolactone and Polylactide Blends : Thermal, Mechanical Properties and Biodegradability. Yottha Srithep, Thiptida Akkaprasa and Onpreeya Veang-in

- พ.ศ. 2564 เรื่อง Improving Polylactide Toughness by Plasticizing with Low Molecular Weight Polylactide-Poly (Butylene Succinate) Copolymer. Y Srithep, O Veang-In, D Pholharn, LS Turng, J Morris. Journal of Renewable Materials 9 (7), 1267

- พ.ศ. 2565 เรื่อง Characterization of Polymer Composites between Stereocomplex Polylactide Blends with Poly (methyl methacrylate). O Veang-in, Y Srithep, J Morris, D Pholharn. Materials Science 28 (4), 474-481

- พ.ศ. 2565 เรื่อง Characterization of injection molded polylactide stereocomplexes blended with thermoplastic starch and chain extender. Y Srithep, D Pholharn, O Veang-in, J Morris. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1234 (1), 012023

- พ.ศ. 2566 เรื่อง Toughening Polylactide Stereocomplex by Injection Molding with Thermoplastic Starch and Chain Extender. Y Srithep, D Pholharn, P Worajittiphon, K Sriprateep, O Veang-In, J Morris. Polymers 15 (9), 2055

