



การพัฒนาฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบระดับนาโนระหว่างพอลิแลกติกแอซิดกับพอลิเอธิลีนไกลคอลที่
เติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ทางชีวภาพจากสารสกัดจากพืชเพื่อใช้ในงานบรรจุภัณฑ์

แบบแอกทีฟ

โดย

นายสิทธิกร บัวทอง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบระดับนาโนระหว่างพอลิแลกติกแอซิดกับพอลิเอธิลีนไกลคอลที่เติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ทางชีวภาพจากสารสกัดจากพืช
เพื่อใช้ในการบรรจุภัณฑ์แบบแอคทีฟ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2568
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

DEVELOPMENT OF POLY(LACTIC ACID) AND POLY(ETHYLENE GLYCOL)
NANOCOMPOSITE FILMS WITH BIOSYNTHESIZED ZINC OXIDE
NANOPARTICLES BY PLANT EXTRACTS FOR ACTIVE PACKAGING APPLICATION



By
Mr. Sittikorn BAWTHONG

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

Academic Year 2025

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	การพัฒนาฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบระดับนาโนระหว่างพอลิแลกติกแอซิดกับพอลิเอธิลีนไกลคอลที่เติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ทางชีวภาพจากสารสกัดจากพืชเพื่อใช้ในงานบรรจุภัณฑ์แบบแอคทีฟ
โดย	นายสิทธิกร บัวทอง
สาขาวิชา	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผนก ก แบบ ก 2
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. ญัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

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

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ญัฐวดี ชัยยุตต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. ญัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บวรกิตติ เนคมานุรักษ์)

660920007 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2

คำสำคัญ : फिल्मบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ, พอลิแลกติกแอซิด, พอลิเอทิลีนไกลคอล, อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์, การสังเคราะห์ทางชีวภาพ, สมบัติต้านจุลชีพ

นาย สิทธิกร บัวทอง: การพัฒนาฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบระดับนาโนระหว่างพอลิแลกติกแอซิดกับพอลิเอทิลีนไกลคอลที่เติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ทางชีวภาพจากสารสกัดจากพืชเพื่อใช้ในงานบรรจุภัณฑ์แบบแอคทีฟ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์แบบแอคทีฟ (Active Packaging Film) โดยใช้ออนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการเชิงชีวภาพ จากสารสกัดสมุนไพร ได้แก่ ใบฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculata* leaves) และเปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana* peels) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) ในการเปลี่ยนซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรตให้เป็น ZnO NPs โดยกระบวนการสังเคราะห์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและนำไปประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหาร ZnO NPs ที่ได้จากการใช้สารสกัดใบฟ้าทะลายโจร (ZnO NPs APL) มีรูปทรงกลมขนาดอนุภาคประมาณ 368.91 ± 99.35 นาโนเมตร ขณะที่ ZnO NPs จากเปลือกมังคุด (ZnO NPs GMP) มีรูปทรงแท่งเหลี่ยม ขนาดอนุภาคแนวยาวประมาณ 2479.86 ± 687.16 นาโนเมตร และแนวขวาง 669.13 ± 96.38 นาโนเมตร ซึ่งความแตกต่างของรูปร่างอนุภาคจะผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติต้านจุลชีพ โดย ZnO NPs GMP แสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อ *E. coli* ได้ดีกว่า ZnO NPs APL ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่เสริมด้วย ZnO NPs เพื่อศึกษาผลของการเติม ZnO NPs ต่อสมบัติของฟิล์ม พบว่าการเติม PEG 6000 MW จะแสดงความเป็น Plasticizer ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของ PLA ขณะที่การเติม ZnO NPs GMP ที่สัดส่วน 1.5 wt% ช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน ความแข็งแรงเชิงกล และผลการวิเคราะห์ FTIR และ XRD ยืนยันการเกิดพันธะ Zn-O ส่วนผล SEM และ TEM แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เสริม ZnO NPs GMP มีพื้นผิวเรียบ โปร่งใส มากกว่า ZnO NPs APL นอกจากนี้ ฟิล์ม PLA/PEG/ZnO NPs ยังแสดงสมบัติการต้านเชื้อจุลชีพที่ดีต่อทั้ง *S. aureus* และ *E. coli* โดยเฉพาะฟิล์มที่ใช้ ZnO NPs GMP ซึ่งให้ความโปร่งใสและการยับยั้งเชื้ออย่างมีประสิทธิภาพ จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่า สารสกัดสมุนไพรทั้งสองชนิดสามารถใช้ในการสังเคราะห์ ZnO NPs ที่มีรูปร่างและสมบัติแตกต่างกัน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ โดยฟิล์มที่ผสม ZnO NPs GMP เหมาะสำหรับบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่ต้องการความโปร่งใสและการต้านเชื้อสูง ส่วนฟิล์มที่เสริม ZnO NPs APL เหมาะสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการป้องกันแสงและยับยั้งจุลชีพ



660920007 : Major POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

Keyword : Active packaging Poly(lactic acid) (PLA) Poly(ethylene glycol) (PEG) Zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) Green synthesis Antibacterial activity

Mr. Sittikorn BAWTHONG : Development of Poly(lactic acid) and poly(ethylene glycol) nanocomposite films with biosynthesized zinc oxide nanoparticles by plant extracts for active packaging application Thesis advisor : Assistant Professor Ph.D. Pajaera Patanathabutr

This research focuses on the development of active packaging films using zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) synthesized via a bioprocess from *Andrographis paniculata* leaves and *Garcinia mangostana* peels, which act as reducing agents to convert zinc acetate dihydrate into ZnO NPs. The synthesis is environmentally friendly and safe for food packaging. The ZnO NPs obtained from *Andrographis paniculata* leaves are spherical with an average diameter of 286 nm, while those from *Garcinia mangostana* peels are rod-shaped, with an average diameter of 443 nm. The difference in particle morphology affects both physical properties and antimicrobial activity, with ZnO NPs GMP showing superior inhibition of *Escherichia coli* compared to ZnO NPs APL. Polymer films composed of polylactic acid/polyethylene glycol (PLA/PEG) incorporated with ZnO NPs were studied to evaluate the effect on film properties. The addition of PEG enhanced PLA's flexibility, while the incorporation of ZnO NPs GMP at 1.5 wt% improved thermal stability, mechanical strength, and particle dispersion, confirmed by FTIR and XRD analyses. SEM and TEM images showed that films with ZnO NPs GMP exhibited smoother, more transparent surfaces and uniform structures. The PLA/PEG/ZnO NPs films also demonstrated significant antimicrobial properties, particularly the ZnO NPs GMP films, which exhibited excellent microbial inhibition against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. Based on these findings, both herbal extracts can be used to synthesize ZnO NPs with distinct shapes and properties, suited to specific applications. Films with ZnO NPs GMP are suitable for active packaging that requires high transparency and antimicrobial properties, while ZnO NPs APL reinforced films are suitable for packaging that requires light protection and antimicrobial properties.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และคำแนะนำอันทรงคุณค่าจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการวิจัย และช่วยตรวจสอบความถูกต้องของเนื้อหาอย่างละเอียดถี่ถ้วนตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์ ที่สละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บวรกิตติ์ เนคมานุรักษ์ อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่กรุณาให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบ พร้อมทั้งให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการปรับปรุงและพัฒนาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ที่ได้อบรม สั่งสอน และถ่ายทอดความรู้ให้แก่ผู้วิจัยจนสามารถดำเนินการศึกษาวิจัยจนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและสถานที่สำหรับการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาทุกท่านที่ช่วยเหลือและประสานงานด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ และคุณไพโรจน์ ตั้งศุภธวัช วิศวกรประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุที่กรุณาให้คำแนะนำและสอนการใช้เครื่องมือต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยมีความชำนาญยิ่งขึ้น และสามารถดำเนินงานวิจัยได้อย่างราบรื่น

ขอขอบคุณทุนการศึกษาและทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานทางวิชาการจากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับการสนับสนุนทุนในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ท้ายที่สุด ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ ดูแล และสนับสนุนผู้วิจัยมาโดยตลอดจนทำให้การศึกษาและการทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สิทธิกร บัวทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ณ
สารบัญตาราง.....	ต
สารบัญรูป.....	ด
สารบัญอักษรย่อ.....	บ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3. ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4. ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1. พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid) : PLA).....	4
2.2. พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol : PEG).....	7
2.3. นาโนคอมโพสิต (Nanocomposite).....	9
2.4. บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active packaging).....	11
2.5. อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide).....	12
2.5.1. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide).....	12
2.5.2. การเตรียมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากวิธีการทางชีวภาพ.....	14
2.5.3. พีซีที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	17

2.5.3.1. ใบฟ้าทะลายโจร.....	17
2.5.3.2. เปลือกมังคุด	18
2.6. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Review of related literature)	20
2.6.1. ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ.....	20
2.6.2. การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์	22
2.6.3. พอลิเมอร์คอมโพสิต	31
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	46
3.1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	46
3.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	46
3.3. วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	47
3.4. เครื่องมือที่ใช้การวิเคราะห์.....	49
3.5. เครื่องมือที่ใช้การขึ้นรูป.....	50
3.6. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	50
3.6.1. การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยใช้สารสกัดจากสมุนไพร	50
3.6.1.1. การศึกษาการสกัดจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจรหรือเปลือกมังคุด	51
3.6.1.2. การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสมุนไพรฟ้าทะลายโจร (<i>Andrographis paniculata</i> leaves) หรือ เปลือกมังคุด (<i>Garcinia</i> <i>mangostana</i> peels).....	52
3.6.2. การศึกษาฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกล คอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	54
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	71
4.1. การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยใช้สารสกัดจากสมุนไพร.....	71
4.1.1. การศึกษาการสกัดจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจรหรือเปลือกมังคุด.....	71
4.1.1.1. การศึกษาการดูดกลืนแสงของสารสกัดจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจรหรือเปลือก มังคุด.....	72

4.1.1.2. การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารสกัดจากสมุนไพรรักษาแผลไฟไหม้หรือเปื่อย มั่งคุด.....	77
4.1.1.3. การศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของสารสกัดจากสมุนไพรรักษาแผลไฟไหม้ หรือเปื่อยมั่งคุด	78
4.1.1.4. การศึกษาการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากสมุนไพรรักษาแผลไฟไหม้หรือ เปื่อยมั่งคุด	80
4.1.2. การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากสารสกัดจากสมุนไพรรักษาแผลไฟไหม้หรือ เปื่อยมั่งคุด.....	82
4.1.2.1. การศึกษาการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจาก สมุนไพรรักษาแผลไฟไหม้หรือเปื่อยมั่งคุด.....	82
4.1.2.2. การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจาก สมุนไพรรักษาแผลไฟไหม้หรือเปื่อยมั่งคุด.....	83
4.1.2.3. การศึกษาขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพรรักษาแผลไฟไหม้ หรือเปื่อยมั่งคุด.....	85
4.1.2.4. การศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสาร สกัดจากสมุนไพรรักษาแผลไฟไหม้หรือเปื่อยมั่งคุด.....	87
4.1.2.5. การศึกษาสัณฐานวิทยาและวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของอนุภาคนาโน ซิงค์ออกไซด์ ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพรรักษาแผลไฟไหม้หรือเปื่อยมั่งคุด.....	88
4.1.2.6. การศึกษาสัณฐานวิทยาภายในของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัด จากสมุนไพรรักษาแผลไฟไหม้หรือเปื่อยมั่งคุด.....	91
4.1.2.7. การศึกษาต้านเชื้อจุลินทรีย์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจาก สมุนไพรรักษาแผลไฟไหม้หรือเปื่อยมั่งคุด.....	94
4.2. การศึกษาฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	96
4.2.1. การศึกษาค่าดัชนีการไหลของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/ พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	96
4.2.2. การศึกษาสมบัติทางเคมีของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/ พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	99

4.2.2.1. การศึกษาการการส่องผ่านแสงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	99
4.2.2.2. การศึกษาหุ้ฟงักชั้นของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	103
4.2.2.3. การศึกษาการบวมตัวของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	106
4.2.2.4. การศึกษาการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	109
4.2.2.5. การศึกษามุมสัมผัสน้ำของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	112
4.2.3. การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	114
4.2.3.1. การศึกษาเสถียรภาพและการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	114
4.2.3.2. การศึกษาสมบัติทางความร้อนและการหาปริมาณผลึกของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	119
4.2.4. การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)....	125

4.2.4.1 การศึกษาการดัดงอของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)	125
4.2.4.2 การศึกษาการฉีกขาดของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	131
4.2.5. การศึกษาลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	135
4.2.5.1. การศึกษาค่าสี และความแตกต่างสีของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	136
4.2.5.2. การศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)	140
4.2.5.1. การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	143
4.2.6. การศึกษาต้านเชื้อจุลินทรีย์ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)....	148
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	152
5.1. สรุปผลการวิจัย.....	152
5.1.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยใช้สารสกัดจากสมุนไพร	152
5.1.2 การศึกษาฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	153
5.2. ข้อเสนอแนะ	156
รายการอ้างอิง	157

ภาคผนวก.....	163
ภาคผนวก ก. ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ	164
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณ.....	218
ภาคผนวก ค. การนำเสนอผล.....	222
ประวัติผู้เขียน	233



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ ที่สกัดด้วยเมทานอลที่แตกต่างกัน [31]	20
ตารางที่ 2.2 สารประกอบเปลือกมังคุดและปริมาณสารประกอบฟีนอล [33]	22
ตารางที่ 2.3 ระยะการยับยั้งของสารสกัด A.alata และ ZnO NPs ต่อแบคทีเรีย 8 สายพันธุ์ [34]	26
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของฟิล์มผสม PLA/PEG ที่ MW ต่าง ๆ [36]	32
ตารางที่ 2.5 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PEG, PLA และ PLA/PEG [36]	35
ตารางที่ 2.6 การเตรียมอัตราส่วนของการเตรียมนาโนคอมโพสิตฟิล์ม [37]	39
ตารางที่ 2.7 ผลของ ZnO (50 nm และ 100 nm) และ Ag-Cu (100 nm) ต่อสมบัติทางความร้อนของนาโนคอมโพสิตฟิล์ม [37]	40
ตารางที่ 2.8 การส่องผ่านของ UV ของนาโนคอมโพสิตฟิล์ม [37]	44
ตารางที่ 3.1 การสกัดสารสกัดจากสมุนไพรใบฟ้าทะลายโจร (<i>Andrographis paniculata</i> leaves) หรือเปลือกมังคุด (<i>Garcinia mangostana</i> peels) ที่อัตราส่วนสมุนไพร บดผง 5, 10 และ 15 กรัม น้ำหนักแห้งต่อสารละลายเอทานอลและน้ำ 100 มิลลิลิตร	50
ตารางที่ 3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)	55
ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนที่ทำการ Master batch สำหรับการขึ้นฟิล์มพอลิเมอร์พอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอลและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์	58
ตารางที่ 4.1 สารสกัดจากสมุนไพรที่ได้จาก <i>Andrographis paniculata</i> leaves และ <i>Garcinia mangostana</i> peels โดยใช้ตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ ในปริมาณ 100 มิลลิลิตร	75
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยการทดสอบ DLS ของอนุภาคของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร ZnO NPs <i>Andrographis paniculata</i> leaves (ZnO NPs APL) และ ZnO NPs <i>Garcinia mangostana</i> peels (ZnO NPs GMP)	85

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ย Crystallite Size D (nm) จากการทดสอบ XRD ของ ZnO NPs Commercial grade , ZnO NPs Andrographis paniculate leaves (ZnO NPs APL) และ ZnO NPs Garcinia mangostana peels (ZnO NPs GMP)..... 87

ตารางที่ 4.4 การต้านเชื้อจุลชีพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร 94

ตารางที่ 4.5 การบวมตัวของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง..... 106

ตารางที่ 4.6 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) เป็นเวลา 24-168 ชั่วโมง109

ตารางที่ 4.7 การสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)..... 114

ตารางที่ 4.8 สมบัติทางความร้อนและปริมาณผลึกของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) 119

ตารางที่ 4.9 ค่าโมดูลัส, ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)..... 126

ตารางที่ 4.10 ค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) 131

ตารางที่ 4.11 ค่าสีและความแตกต่างของสีของฟิล์มฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) 136

ตารางที่ 4.12 สันฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/ พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่ผ่านการทดสอบการดึงยึด ใช้สภาวะการทดสอบที่พลังงาน 15 kV ที่กำลังขยาย 500x, 1000x และ 1500x ตามลำดับ 144

ตารางที่ 4.13 สันฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/ พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ที่ผ่านการทดสอบการดึงยึด ใช้สภาวะการทดสอบที่พลังงาน 15 kV ที่กำลังขยาย 500x, 1000x และ 1500x ตามลำดับ 145

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของกรดแลคติก [11]	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ PLA, PDLLA, PLLA และ PDLA [12]	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้าง Polyethylene glycol [14]	8
รูปที่ 2.4 ขนาดอนุภาคนาโน [16]	9
รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์แบบ Top-down และ Bottom-up [17]	10
รูปที่ 2.6 บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active packaging) [19]	12
รูปที่ 2.7 โครงสร้างซิงค์ออกไซด์ [20]	13
รูปที่ 2.8 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จาก Zinc acetate [22].....	14
รูปที่ 2.9 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จาก Zinc dihydrate และ NaOH [23]	15
รูปที่ 2.10 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากสารประกอบฟีนอล [24]	16
รูปที่ 2.11 โครงสร้างสารประกอบฟีนอล [25].....	16
รูปที่ 2.12 ใบฟ้าทะลายโจร [26].....	17
รูปที่ 2.13 สูตรโครงสร้างของสารที่พบในสมุนไพรฟ้าทะลายโจร [27].....	18
รูปที่ 2.14 ผลไม้มังคุด [29].....	19
รูปที่ 2.15 สูตรโครงสร้างของสารที่พบในเปลือกมังคุด [30].....	19
รูปที่ 2.16 สารประกอบฟีนอลในฟ้าทะลายโจร [32].....	21
รูปที่ 2.17 สเปกตรัม EDAX ของ ZnO NPs ที่สังเคราะห์โดยใช้สารสกัดจาก A.alata [34].....	22
รูปที่ 2.18 รูปแบบ XRD ของ ZnO NPs ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้สารสกัด A.alata [34].....	23
รูปที่ 2.19 สเปกตรัม FT-IR ของ (a) สารสกัด A.alata (b) ZnO NPs [34].....	24
รูปที่ 2.20 การวิเคราะห์ DLS ของ ZnO NPs [34].....	24
รูปที่ 2.21 ภาพ SEM ของ ZnO NPs ที่ได้จากของสารสกัด A.alata (a) 1 μ m (b) 500 nm [34]	25

รูปที่ 2.22 สเปกตรัม UV – Vis ของ (a) สารสกัด A.alata และ ZnO NPs (b) Tauc plot [34]..	25
รูปที่ 2.23 การแพร่กระจายของดิस्कเพื่อศึกษาฤทธิ์ต้านเชื้อจุลินทรีย์ของสารสกัดจากพืช A.alata และสังเคราะห์ ZnO NPs 1: สารสกัด A.alata-50 μ L, 2: สารสกัด A.alata-100 μ L, 3: ZnO NPs – 50 μ L และ 4: ZnO NPs – 100 μ L [34].....	26
รูปที่ 2.24 รูปแบบ XRD ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์.....	27
รูปที่ 2.25 สเปกตรัม UV-Vis ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ จากเปลือกมังคุด (ZnO-Gm-E) [35].....	28
รูปที่ 2.26 การวิเคราะห์ FTIR ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์จาก เปลือกมังคุด (ZnO-Gm-E) และสารสกัดเปลือกมังคุด [35].....	29
รูปที่ 2.27 ภาพ SEM สัณฐานวิทยาของ ZnO-Gm-E (a) สัณฐานวิทยา (b) ขนาดอนุภาค [35].....	29
รูปที่ 2.28 กลไกการเกิดอนุภาคนาโน ZnO [24].....	30
รูปที่ 2.29 ภาพ TEM (a-c) 1 วัน, (d-f) 4 วัน, (g-i) 7 วันของ ZnO NPs ของสารสกัด จากเปลือกเงาะ [24].....	31
รูปที่ 2.30 สเปกตรัม ATR-FT-IR ของ PEG 20000, พิล์ม PLA บริสุทธิ์ และฟิล์มผสม PLA/PEG [36].....	33
รูปที่ 2.31 รูปแบบ XRD ของ PLA, PEG บริสุทธิ์ที่มี MW ต่างกัน และฟิล์มผสม PLA/PEG [36]...	34
รูปที่ 2.32 (a)-(c) ผลลัพธ์ DSC และ (d) TGA ของฟิล์มผสม PLA/PEG และ PLA บริสุทธิ์ [36]...	35
รูปที่ 2.33 (a) Stress-strain curves, (b) stress in the yield point, (c) Young’s modulus, and (d) elongation at break ของฟิล์มผสม PLA และ PLA/PEG [36].....	36
รูปที่ 2.34 ภาพ SEM ของฟิล์มผสม PLA/PEG ที่มี PEG (a) MWs และ (b) ความเข้มข้นต่างกัน [36].....	37
รูปที่ 2.35 สเปกตรัมยูวีของฟิล์มผสม PLA/PEG ที่มีความเข้มข้น PEG (a) และ (b) MW ต่างกัน[36].....	38
รูปที่ 2.36 OTR ของฟิล์มผสม PLA และ PLA/PEG [34].....	39
รูปที่ 2.37 ผลของการเติม PEG 5 %wt ต่อค่า T_g ของนาโนคอมโพสิตฟิล์ม [37].....	41

รูปที่ 2.38 ผลของการเติม ZnO (100 nm) และ Ag-Cu (100 nm) ที่ 1 % wt ของอนุภาคนาโนต่อค่า T_g ของนาโนคอมโพสิตฟิล์ม [37].....	41
รูปที่ 2.39 ผลของการเติม ZnO (100 nm) และ Ag-Cu (100 nm) ที่ 2 % wt ของอนุภาคนาโนต่อค่า T_m ของนาโนคอมโพสิตฟิล์ม [37].....	42
รูปที่ 2.40 ผลของการเติม ZnO (50 และ 100 nm) และ Ag-Cu (100 nm) ที่ 2 % wt ของอนุภาคนาโนต่อค่า T_{cc} ของนาโนคอมโพสิตฟิล์ม [37]	43
รูปที่ 2.41 ค่าการสลายตัวของ PLA/PEG (a), PLA/PEG/ZnO 2% ขนาด 50 nm (b), PLA/PEG/ZnO 2% ขนาด 100 nm (c) และ PLA/PEG/Ag-Cu alloy 2 % ขนาด 100 nm.....	44
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการสกัดสมุนไพรและสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยใช้สารสกัดจากสมุนไพร.....	63
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษาเอกลักษณ์ของสารสกัดสมุนไพร	64
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการศึกษาเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร 65	
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล/อนุภาคนาโน... 66	
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล/อนุภาคนาโน... 67	
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล/อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์	68
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการศึกษาเอกลักษณ์ของฟิล์มผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล/อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 1	69
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการศึกษาเอกลักษณ์ของฟิล์มผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล/อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 2	70
รูปที่ 4.1 UV-spectra ของสารสกัดจากสมุนไพร a) <i>Andrographis paniculate</i> leaves และ b) <i>Garcinia mangostana</i> peels ของตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ.....	72
รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของสารสกัดสมุนไพรจาก a) <i>Andrographis paniculata</i> leaves และ b) <i>Garcinia mangostana</i> peels ของตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ.....	74
รูปที่ 4.3 สารสกัดจากสมุนไพรที่ได้จาก a) <i>Andrographis paniculata</i> leaves และ b) <i>Garcinia mangostana</i> peels ของตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ ในปริมาณ 100 มิลลิลิตร.....	75

รูปที่ 4.4 FTIR-spectra ของสารสกัดจากสมุนไพร a) *Andrographis paniculate* leaves และ... 77

รูปที่ 4.5 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกจาก a) *Andrographis paniculata* leaves และ b) *Garcinia mangostana* peels ของตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ..... 79

รูปที่ 4.6 การทดสอบการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากสมุนไพร a) *Andrographis paniculate* leaves และ b) *Garcinia mangostana* peels ของตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ..... 80

รูปที่ 4.7 UV-spectra ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร ZnO NPs *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP)..... 82

รูปที่ 4.8 FTIR-spectra ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร ZnO NPs *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP)..... 83

รูปที่ 4.9 XRD pattern ของ ZnO NPs Commercial grade, ZnO NPs *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP) 87

รูปที่ 4.10 ภาพ SEM และการกระจายขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร (a-c) ZnO NPs *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ (d-e) ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP)..... 89

รูปที่ 4.11 EDX spectra ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร a) ZnO NPs *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ b) ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP)..... 90

รูปที่ 4.12 ภาพ TEM ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร ZnO NPs a) ZnO NPs *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ b) ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP) 92

รูปที่ 4.13 การต้านเชื้อจุลินทรีย์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากสารสกัดสมุนไพร (1) ZnO NPs *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ (2) ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP) ต่อเชื้อ a) *S. aureus* และ b) *E. coli*..... 94

รูปที่ 4.14 MFR ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) a) ดัชนีการไหลของเม็ดวัสดุผสม

PLA/PEG และ PLA/PEG/ZnO ก่อนกระบวนการ masterbatch และ b) ดัชนีการไหลของฟิล์มวัสดุ เสริมองค์ประกอบ PLA/PEG/ZnO หลังการทำ masterbatch	97
รูปที่ 4.15 UV-Vis spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/ พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG).....	100
รูปที่ 4.16 UV-Vis spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/ พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) a) PLA/PEG/ZnO NPs จาก <i>Andrographis paniculate</i> leaves และ b) PLA/PEG/ZnO NPs จาก <i>Garcinia mangostana</i> peels.....	101
รูปที่ 4.17 FTIR-spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/ พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	103
รูปที่ 4.18 FTIR-spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/ พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) a) PLA/PEG/ZnO NPs จาก <i>Andrographis paniculate</i> leaves และ b) PLA/PEG/ZnO NPs จาก <i>Garcinia mangostana</i> peels.....	105
รูปที่ 4.19 การบวมตัวของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/ พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง.....	107
รูปที่ 4.20 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/ พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	110
รูปที่ 4.21 มุมสัมผัสของไอน้ำของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/ พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	112
รูปที่ 4.22 TGA thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/ พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	115
รูปที่ 4.23 DTG thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/	116
รูปที่ 4.24 DSC thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/	121

รูปที่ 4.25 DSC thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/ พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	121
รูปที่ 4.26 ค่าโมดูลัสของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/ พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	127
รูปที่ 4.27 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	127
รูปที่ 4.28 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	128
รูปที่ 4.29 ค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดตามแนว Machine Direction (MD) ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	132
รูปที่ 4.30 ค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดตามแนว Transverse Direction (TD) ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	133
รูปที่ 4.31 ความโปร่งแสงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/ พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG)	137
รูปที่ 4.32 ความโปร่งแสงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/ พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs).....	137
รูปที่ 4.33 XRD pattern ของ a) ฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/..	141
รูปที่ 4.34 การต้านเชื้อจุลชีพของฟิล์ม (1) PLA/PEG (90:10) และฟิล์มผสม PLA/PEG/ZnO NPs ชนิด (2-4) APL และ (5-7) GMP ที่มีปริมาณอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 0.5 ,1.5 และ 2.5% ตามลำดับ ต่อเชื้อ a) S. aureus และ b) E. coli	149

สารบัญย่อ

PLA	คือ	พอลิแลกติกแอซิด
PEG	คือ	พอลิเอธิลีนไกลคอล
PLA/PEG	คือ	พอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล
ZnO NPs	คือ	อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์
APL	คือ	ใบฟ้าทะลายโจร (<i>Andrographis paniculata</i> leaves)
GMP	คือ	เปลือกมังคุด (<i>Garcinia mangostana</i> peels)
ZnO NPs APL	คือ	อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ จากสมุนไพรใบฟ้าทะลายโจร
ZnO NPs GMP	คือ	อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ จากสมุนไพรเปลือกมังคุด
PLA/PEG/ZnO NPs	คือ	พอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอลและ อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์
เอทานอล 75%	คือ	เอทานอลผสมน้ำในอัตราส่วน ที่ 75:25 โดยน้ำหนัก
<i>S.aureus</i>	คือ	แบคทีเรียแกรมบวก (G+) <i>Staphylococcus aureus</i>
<i>E.coli</i>	คือ	แบคทีเรียแกรมลบ (G-) <i>Escherichia coli</i>
MD	คือ	ทิศทางการดึงของฟิล์มออกจากเครื่องหล่อฟิล์ม
TD	คือ	ทิศทางการดึงจากกับแนวการผลิตฟิล์ม (แนวขวางของฟิล์ม)

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีเป็นสิ่งที่สังคมให้ความสนใจอย่างมาก นาโนเทคโนโลยีจะมีบทบาทที่สำคัญ และเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ โดยนาโนเทคโนโลยีจะเกี่ยวข้องกับ การสังเคราะห์วัสดุในระดับอะตอมโมเลกุลซึ่งจะมีขนาดเล็กจะอยู่ในช่วงประมาณ 1-100 นาโนเมตร ซึ่งจะทำให้มีสมบัติที่ดีขึ้นทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ ส่งผลทำให้เกิดประโยชน์ต่อผู้ใช้ สบายและเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจได้ นาโนเทคโนโลยีจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในด้านวัสดุเรียกว่าวัสดุนาโน เช่น การพัฒนาฟิล์มพลาสติกนาโนคอมโพสิต ที่มีความสามารถในการกั้นการผ่านของก๊าซบางชนิด และไอน้ำได้เป็นอย่างดี เพื่อนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่ยืดอายุในการเก็บรักษาความสดของผักและผลไม้ หรือการผลิตอนุภาคนาโนมาใช้ในการฆ่าเชื้อจุลชีพ [1]

ในชีวิตประจำวันจะพบว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์ส่วนใหญ่และจำนวนมากจะทำมาจากพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และต้องใช้เวลาหลายปีในการสลายตัว จึงเป็นมลพิษและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นวงกว้าง โดยในปัจจุบันได้มีการผลิตพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่น พอลิแลคติกแอซิด (PLA) พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (PBS) และพอลิบิวทีลีนอะดิเพต-โค-เทเรพทาเลท (PBAT) โดยในงานวิจัยนี้ได้นำพอลิแลคติกแอซิด (PLA) เนื่องจากมีสมบัติที่น่าสนใจ เช่น มีความแข็งแรง ไม่เป็นพิษ และได้จากกรดแลคติกด้วยการหมักแป้งและน้ำตาลจากพืชต่าง ๆ เช่น ข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลังที่สามารถปลูกทดแทนขึ้นมาใหม่และยังสามารถย่อยสลายได้ แต่พอลิแลคติกแอซิด (PLA) ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความเหนียวที่ต่ำ มีความเปราะ ยืดหยุ่นได้น้อย ทำให้ยากต่อการขึ้นรูป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีการนำพอลิเอธิลีนไกลคอล (PEG) ซึ่งไม่เป็นพิษ ย่อยสลายได้ และเข้ากันได้ทางชีวภาพ มาปรับปรุงสมบัติของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ให้มีความยืดหยุ่นสามารถขึ้นรูปได้ง่ายและต้านทานการเสีรูปได้ดีขึ้นทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) จึงเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ [2] โดยทั่วไปฟิล์มผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) จะมีกระบวนการขึ้นรูปด้วยการใช้ตัวทำละลาย ซึ่งจะไม่สามารถทำได้ในอุตสาหกรรม และประสิทธิภาพของฟิล์มอาจแตกต่างจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตด้วยกระบวนการอัดรีด ทำให้ฟิล์มมีสมบัติทางความร้อน สมบัติเคมี และสมบัติเชิงกลที่ได้รับการปรับปรุงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการที่ผลิตด้วยตัวทำละลาย [3]

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดสีขาวเป็นสารที่ช่วยยับยั้งแบคทีเรีย (Anti-Bacteria) และมีความสามารถในการป้องกันรังสี UV-A และ UV-B แต่ซิงค์ออกไซด์ ZnO ทั่วไปจะมีความโปร่งแสงที่ต่ำ มีประสิทธิภาพการดูดซับแสงและการยับยั้งแบคทีเรียที่น้อยกว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO-NPs) โดยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO-NPs) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเปลี่ยนขนาดอนุภาคซิงค์ออกไซด์ให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับอนุภาคนาโนเมตร (10^{-9} นาโนเมตร) จะมีความบริสุทธิ์สูงมีสีขาวและไม่ละลายในน้ำ สามารถป้องกันรังสี UV-A และ UV-B ต้านทานแบคทีเรีย (Anti-Bacteria) [4]

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการใช้วัสดุชีวภาพเพื่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO-NPs) จึงได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากเป็นการเพิ่มมูลค่าวัสดุชีวภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งวัสดุชีวภาพจะประกอบด้วยสารหลายชนิด เช่น กรดฟีนอลิก อัลคาลอยด์ ฟลาโวนอยด์ และเทอร์พีนอยด์ สารประกอบเหล่านี้มีความสามารถในการสร้างอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO-NPs) ผ่านกระบวนการรีดอกซ์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์และช่วยในการรักษาเสถียรภาพของการทำงานของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ได้ดี

ฟ้าทะลายโจรจัดเป็นสมุนไพรท้องถิ่นในประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ นิยมนำส่วนของใบและลำต้นมาทำเป็นยารักษาโรค จากการศึกษาค้นคว้าวิจัยได้พบสารเคมีในส่วนต่าง ๆ ของพืชอยู่หลายชนิด ซึ่งใบฟ้าทะลายโจรจะมีสารประกอบจำพวก ฟลาโวน ฟลาโวนไกลโคไซด์ ซึ่งจะเป็นสารประกอบฟีนอลิก [5] เช่นเดียวกับเปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana*) สารเคมีที่พบในส่วนเปลือกของมังคุดประกอบไปด้วยสารประกอบฟีนอลิกกลุ่มต่าง ๆ ได้แก่ แทนนิน ฟลาโวนอยด์ และแซนโทนส์ เพนตัน [6] จึงมีแนวคิดที่จะนำวัสดุชีวภาพจากใบฟ้าทะลายโจรหรือเปลือกมังคุดนำมาสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) เพื่อนำไปใช้ในบรรจุภัณฑ์ที่สามารถต้านเชื้อจุลชีพ

ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้ต้องการสังเคราะห์และพิสูจน์เอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ที่เตรียมจากวัสดุชีวภาพจากใบฟ้าทะลายโจรหรือเปลือกมังคุดและศึกษาผลของการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางเคมี สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยาและการต้านเชื้อจุลชีพของฟิล์มบรรจุภัณฑ์

1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อสังเคราะห์และพิสูจน์เอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ที่เตรียมจากวัสดุชีวภาพจากใบฟ้าทะลายโจรหรือเปลือกมังคุด
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางเคมี สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยาและการต้านเชื้อจุลชีพของฟิล์มบรรจุภัณฑ์

1.3. ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 สังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากวัสดุชีวภาพจากสารสกัดใบฟ้าทะลายโจรแบบบอบแห้งหรือเปลือกมังคุดแบบบอบแห้ง
- 1.3.2 ใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก
- 1.3.3 ในการผสม Plasticized PLA มีการจำกัดการใช้ Polyethylene glycol ที่ MW. 6000 g/mol

1.4. ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สารอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ที่เตรียมได้จะแสดงเอกลักษณ์จำเพาะ มีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน มีสมบัติในการดูดกลืนแสงและต้านเชื้อจุลชีพได้
- 1.4.2 การเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) จะส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน การดูดกลืนแสงและการต้านเชื้อจุลชีพของฟิล์มบรรจุภัณฑ์

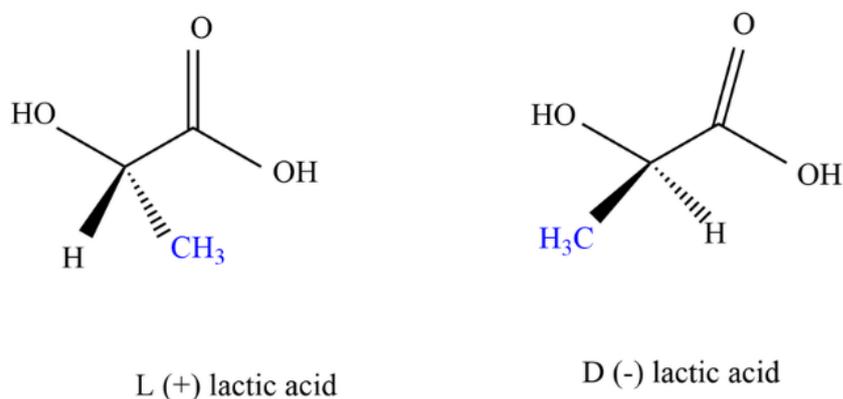
บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1. พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid) : PLA)

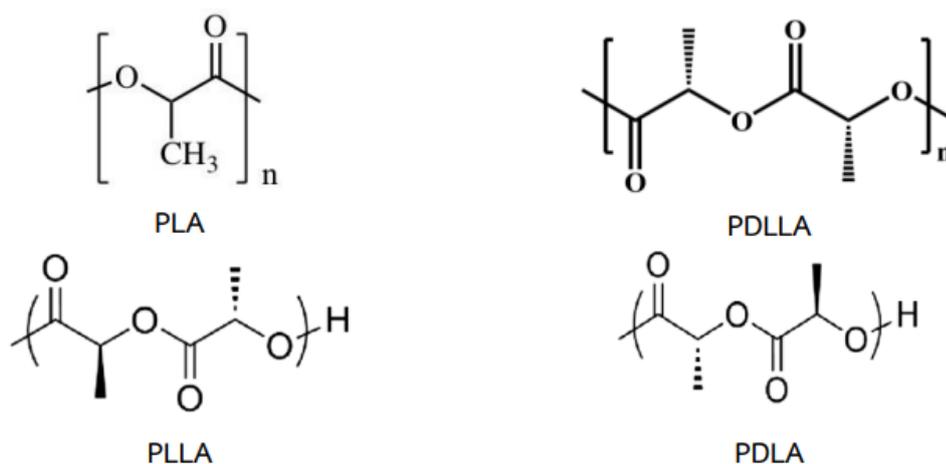
พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid) หรือ PLA) เป็นพลาสติกที่ได้จากพืชจำพวกแป้ง ข้าวโพด มันสำปะหลัง เป็นต้น ซึ่งจะเป็นพลาสติกชีวภาพที่สามารถสลายตัวเองได้ (Compostable polymer) ทำให้ได้มีการนำ PLA ไปประยุกต์ใช้งาน แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดอย่างมากในช่วงแรก พบว่ามีต้นทุนการผลิตที่สูง สัณฐานที่ได้ปริมาณน้อย และมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการใช้เทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการผลิตทำให้การผลิต PLA ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงและมีต้นทุนที่ลดลงทำให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน จึงส่งผลให้ PLA ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางมากขึ้น สมบัติที่โดดเด่นของ PLA นั้น คือ ความสามารถในการสลายตัวได้ ผลิตจากแหล่งวัตถุดิบที่ยั่งยืน (Sustainable sources) มีความเป็นพิษที่ต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [2-4] ส่งผลให้ PLA จึงเป็นวัสดุที่ตอบโจทย์ในการแก้ไขปัญหาขยะในสังคมได้เป็นอย่างดี โดยที่เห็นได้ชัดคือการนำไปทำเป็นวัสดุสำหรับการผลิตบรรจุภัณฑ์อาหารและผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคอื่น ๆ จึงทำให้ PLA จัดเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสามารถแก้ไขปัญหาการกำจัดขยะในสังคม อีกทั้งถูกใช้เป็นวัสดุสำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์อาหารและผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคอื่น ๆ [7]

PLA จะประกอบไปด้วยโมโนเมอร์ คือ กรดแลคติก ซึ่งจะมีโครงสร้างสองรูปแบบในการจัดเรียงตัว คือ แบบดี-ไอโซเมอร์ และแบบแอล-ไอโซเมอร์ ในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นนิแอนนชิโอเมอร์ (Enantiomer) จะมีความว่องไวต่อแสง (Optical active) ที่แตกต่างกัน ซึ่งมีสูตรเคมีที่เหมือนกัน แต่การจัดเรียงตัวโครงสร้างรูปแบบสามมิติไม่เหมือนกัน โดยมีการบิดระนาบที่แตกต่างกัน ในธรรมชาติส่วนใหญ่จะพบในรูปแบบของแอล-ไอโซเมอร์หรือในรูปของผสมระหว่างแอล-ไอโซเมอร์และดี-ไอโซเมอร์ เป็นหลัก [8-10]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของกรดแลกติก [11]

เนื่องจาก PLA มีสองไอโซเมอร์ โดยสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่สังเคราะห์ได้จะประกอบไปด้วยโมโนเมอร์ชนิดแอล-ไอโซเมอร์ ที่มารวมตัวกันเป็นสายโซ่พอลิเมอร์จะได้เป็นพอลิแลกติก-แลกติกแอซิด (Poly(L-lactic acid) : PLLA) หรือสามารถเกิดจากโมโนเมอร์ที่มีส่วนผสมของราซิติก ทำให้ได้เป็นพอลิดีแอล-แลกติกแอซิด (Poly(D,L-lactic acid) : PDLLA) และการเกิดแบบดี-ไอโซเมอร์ (Poly(D-lactic acid) : PDLA) ในปัจจุบันการทำกรดแลกติกบริสุทธิ์ทำได้ยาก ซึ่งไอโซเมอร์ที่แตกต่างกันส่งผลต่อความเป็นผลึก (Crystallinity) ของพอลิเมอร์ โครงสร้างของ PLA, PDLLA, PLLA และ PDLA จะแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ PLA, PDLLA, PLLA และ PDLA [12]

อย่างไรก็ตาม PLA ยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น เปราะ ทนความร้อนต่ำ และยืดหยุ่นต่ำ ดังนั้นการนำ PLA ไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น จึงเป็นวิธีการหนึ่งในการปรับปรุงคุณสมบัติของ PLA ให้เหมาะสมกับการใช้งานที่หลากหลาย ดังตัวอย่างต่อไปนี้

- PLA blend PBAT [12]

PBAT หรือ Poly (butylene adipate-terephthalate) เป็นโพลิเอสเตอร์ชนิดหนึ่ง ที่มีความยืดหยุ่นสูง ทนความร้อนดี การเบลนด์ PLA/PBAT ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น ทนความร้อน และความเหนียวของ PLA เหมาะสำหรับใช้ผลิตฟิล์ม กระจกพลาสติก และชิ้นส่วนยาง

- PLA blend PHA [12]

PHA หรือ Polyhydroxyalkanoate เป็นโพลิเอสเตอร์ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ผสม PLA/PHA ช่วยเพิ่มความย่อยสลายทางชีวภาพ ความทนทานต่อสภาพแวดล้อม และความสามารถในการทนทานต่อสารเคมีของ PLA เหมาะสำหรับใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์อาหาร วัสดุทางการแพทย์ และผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง

- PLA blend PEG [12]

PLA/PEG blend เป็นการผสม Polylactic Acid (PLA) กับ Polyethylene Glycol (PEG) ซึ่งเป็นการผสมพลาสติกชีวภาพ เพิ่มความยืดหยุ่น เพิ่มความทนทานต่อความร้อน ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จึงนิยมใช้ในทางการแพทย์ หรือใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์อาหาร

- PLA blend Cellulose nanofibers [12]

Cellulose nanofibers (CNF) เป็นวัสดุเสริมแรงชนิดหนึ่ง ที่มีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา การผสม PLA/CNF ช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และความทนทานต่อแรงกระแทกของ PLA เหมาะสำหรับใช้ผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อุปกรณ์กีฬา และวัสดุทางการแพทย์

2.2. พอลิเอธิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol : PEG)

พอลิเอธิลีนไกลคอล(Polyethylene glycol) หรือ PEG เป็นสารประกอบอินทรีย์จะประกอบด้วยหน่วยย่อยของเอธิลีนออกไซด์ ($-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O}-$) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นของเหลว สีใส ไม่มีกลิ่น อาจจะมีรสชาติหวานเล็กน้อย โดยความหนืดของ PEG จะขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุล โดย PEG จะมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำ จะเป็นของเหลวที่มีความหนืดที่ต่ำ เมื่อเทียบกับ PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูง จะเป็นของเหลวที่มีความหนืดที่สูงจนถึงของแข็ง PEG จะมีหลายเกรดที่นำมาใช้งานสำหรับงานที่ต่างกักัน โครงสร้าง Polyethylene glycol จะแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.3

ประโยชน์ของพอลิเอธิลีนไกลคอล (PEG) ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ [13]

- การใช้เป็นตัวทำละลาย
พอลิเอธิลีนไกลคอล นั้นละลายได้ดีในน้ำ แอลกอฮอล์ และสารประกอบอินทรีย์หลายชนิดจึงถูกใช้เป็นตัวทำละลายในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ยา เครื่องสำอางและหมึกพิมพ์
- การใช้เป็นสารหล่อลื่น
สมบัติเด่นของพอลิเอธิลีนไกลคอล คือนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่นที่ดี จึงถูกใช้ในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น น้ำยาหล่อลื่น ยาสระผม ครีมนวดผม และโลชั่น
- การใช้เป็นสารเพิ่มความชื้น
การดูดซับความชื้นของพอลิเอธิลีนไกลคอลจากอากาศนั้นทำได้ดี จึงถูกใช้ในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ครีมบำรุง โลชั่น และยาสีฟัน
- การใช้เป็นสารทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน
พอลิเอธิลีนไกลคอลจะช่วยทำให้ส่วนผสมต่าง ๆ ผสมเข้ากันได้ดี จึงถูกใช้ในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ยา เครื่องสำอาง และอาหาร
- การใช้เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่น
การเติมพอลิเอธิลีนไกลคอล ทำให้พลาสติกมีความยืดหยุ่นมากขึ้น จึงถูกใช้เติมแต่งในพลาสติกเพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ

ตัวอย่างการใช้พอลิเอธิลีนไกลคอล (PEG) ในพลาสติก [13]

- พลาสติกพอลิเอธิลีน (PE)

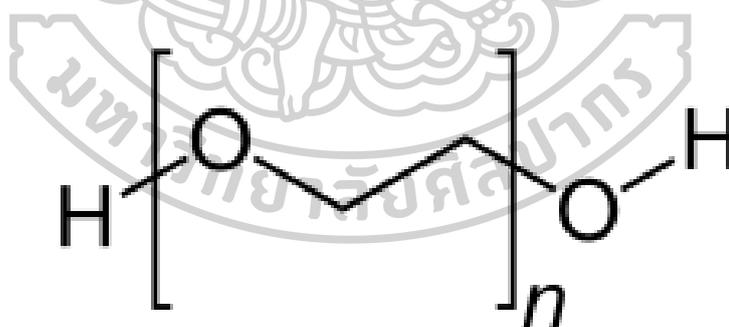
พอลิเอธิลีนไกลคอลจะถูกใช้เป็นสารเติมแต่งในพอลิเอธิลีน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ความยืดหยุ่น ความทนทานต่อแรงดึง และความโปร่งแสง พอลิเอธิลีนไกลคอลยังสามารถช่วยลดอุณหภูมิการหลอมละลายของพอลิเอธิลีน ซึ่งทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น

- พลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC)

พอลิเอธิลีนไกลคอลถูกใช้เป็นสารเติมแต่งในพอลิไวนิลคลอไรด์ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ความยืดหยุ่น ความทนทานต่อแรงดึง และความเหนียว พอลิเอธิลีนไกลคอลยังสามารถช่วยลดความไวต่อเปลวไฟของพอลิไวนิลคลอไรด์

- พลาสติกพอลิเอสเทอร์

พอลิเอธิลีนไกลคอลถูกใช้เป็นสารเติมแต่งในพอลิเอสเทอร์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ เช่น ความยืดหยุ่น ความทนทานต่อแรงดึง และความทนทานต่อสารเคมี พอลิเอธิลีนไกลคอลยังสามารถช่วยลดอุณหภูมิการหลอมละลายของพอลิเอสเทอร์ซึ่งทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น



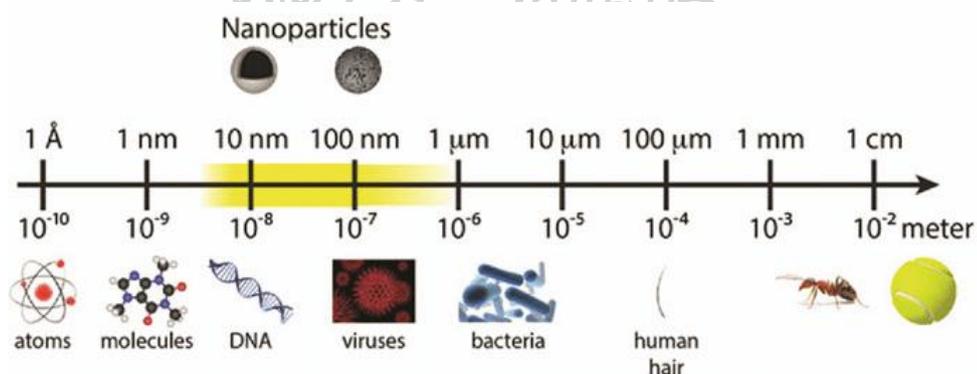
รูปที่ 2.3 โครงสร้าง Polyethylene glycol [14]

2.3. นาโนคอมโพสิต (Nanocomposite)

วัสดุนาโนคอมโพสิต (Nano composite) หมายถึง วัสดุที่ประกอบไปด้วยส่วนประกอบอย่างน้อยสองชนิด โดยมีอย่างน้อยหนึ่งส่วนประกอบมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร (1-100 นาโนเมตร) ดังรูปที่ 2.4 ทำให้อาณาภาคนาโนคอมโพสิตจะมีความละเอียดที่สูงและสมบัติของคอมโพสิตเกิดการเปลี่ยนแปลงไป ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาออกมาในหลายรูปแบบ จะขึ้นอยู่กับรูปแบบของ มิติ (Dimension) ของวัสดุนาโนนั้น ซึ่งจะสามารถแบ่งประเภทการได้ออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ

1. วัสดุนาโน 1 มิติ (One-dimension)
2. วัสดุนาโน 2 มิติ (Two-dimension)
3. วัสดุนาโน 3 มิติ (Three-dimension)

ในส่วนของกระบวนการผลิตโดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แนวทาง ได้แก่ การผลิตจากใหญ่ไปเล็ก (Top-down) และการผลิตจากเล็กไปใหญ่ (Bottom-up) จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึง 2 แนวทางในการผลิตโครงสร้างระดับนาโนที่แตกต่างกัน [15]



รูปที่ 2.4 ขนาดอนุภาคนาโน [16]

1. วิธีการจากใหญ่ไปเล็ก หรือ Top-down approach เป็นวิธีการผลิตนาโนคอมโพสิตโดยเริ่มจากวัสดุที่มีขนาดใหญ่ และค่อย ๆ ย่อขนาดลงสู่ระดับนาโน โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น การบดแบบละเอียด (Mechanical milling), การสลายตัวด้วยไฟฟ้าเคมี (Electrochemical etching) และการสังเคราะห์ด้วยไมโครอิมัลชัน (Microemulsion synthesis) เป็นต้น
- ข้อดีของวิธีการจากใหญ่ไปเล็ก
- สามารถผลิตนาโนคอมโพสิตที่มีโครงสร้างที่ควบคุมได้

- สามารถผลิตนาโนคอมโพสิตที่มีองค์ประกอบที่หลากหลาย
- สามารถผลิตนาโนคอมโพสิตในปริมาณมาก

ข้อเสียของวิธีการจากใหญ่ไปเล็ก

- กระบวนการผลิตอาจซับซ้อนและมีราคาแพง
- นาโนคอมโพสิตที่ผลิตได้อาจมีข้อจำกัดด้านคุณสมบัติ

2. วิธีการจากเล็กไปใหญ่ หรือ Bottom-up Approach เป็นวิธีการผลิตนาโนคอมโพสิต โดยเริ่มจากองค์ประกอบขนาดเล็กระดับโมเลกุลอะตอมหรืออนุภาคแล้วประกอบขึ้นเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ที่ซับซ้อนสู่ระดับนาโน โดยใช้เทคนิคต่าง ๆ เช่น คาร์บอนนาโนทิวป์ (Carbon nanotube), กราฟีน (Graphene) และนาโนดอท (Nano dot) เป็นต้น

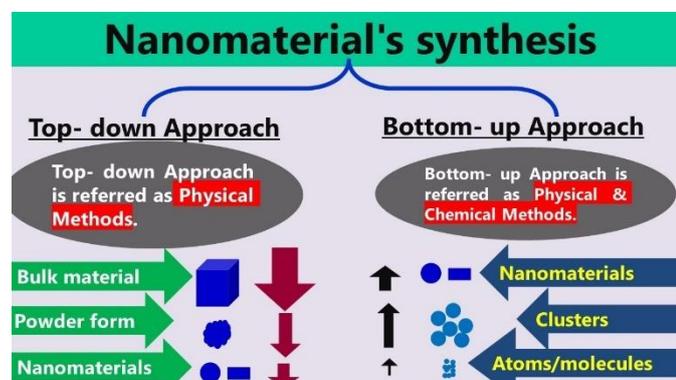
ข้อดีของวิธีการจากเล็กไปใหญ่

- ควบคุมโครงสร้างได้ละเอียด และสามารถสร้างโครงสร้างที่ซับซ้อน
- ประหยัดพลังงานและวัสดุ

ข้อเสียของวิธีการจากเล็กไปใหญ่

- กระบวนการผลิตอาจซับซ้อนและมีราคาแพง
- ใช้เวลานาน

ดังนั้น นาโนคอมโพสิต (Nanocomposites) หรือวัสดุประกอบนาโน จะเป็นวัสดุขนาดนาโนที่มีส่วนประกอบจากวัสดุที่มีคุณสมบัติต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปประกอบกัน เช่นเดียวกับนาโนคอมโพสิต โดยทั่วไปที่เราใช้งานกันในปัจจุบัน เพียงแต่นาโนคอมโพสิตจะมีขนาดเล็กมากในระดับนาโนซึ่งนาโนบางอย่างถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการเตรียม วัสดุนาโนคอมโพสิต โดยทำให้อัตราส่วนของนาโนคอมโพสิต ที่ได้ใหม่นั้นมีสมบัติดีขึ้น หรือเพิ่มสมบัติพิเศษเข้าไป เช่น นาโนเคลย์นาโนคอมโพสิต (Nanoclay composites) เพื่อเพิ่มสมบัติในการยับยั้ง การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ที่แผ่นฟิล์มพลาสติก เป็นต้น



รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์แบบ Top-down และ Bottom-up [17]

2.4. บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active packaging)

บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active Packaging) จะเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ทำหน้าที่ในการปกป้องผลิตภัณฑ์ และในขณะเดียวกันจะช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้นานขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ส่งไปยังผู้บริโภคยังมีความปลอดภัยและอีกทั้งยังรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ด้วยไม่ว่าจะเป็นในด้านเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ โดยบรรจุภัณฑ์แอคทีฟจะทำการควบคุมองค์ประกอบของบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ด้วยการใช้สารประกอบทางเคมีที่มีสมบัติพิเศษใน การดูดหรือคาย ก๊าซ ดูดหรือปล่อยกลิ่น และรวมทั้งสารเคมีหรือสารสกัดจากธรรมชาติที่ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งสาร เหล่านี้อาจจะบรรจุในซองเล็ก (Sachet) หรือใส่ในฟิล์มที่ทำบรรจุภัณฑ์โดยตรง [18]

ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์แอคทีฟจะมีหลายหลายประเภทจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.6 ดังนี้

บรรจุภัณฑ์แอคทีฟประเภทดูดซับออกซิเจน

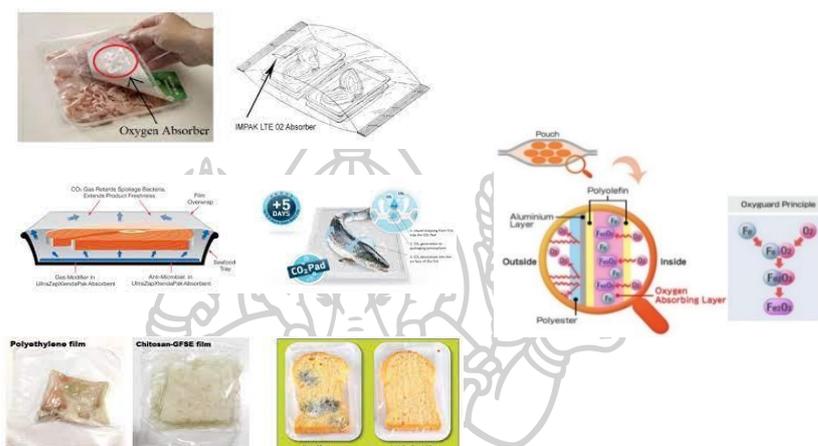
บรรจุภัณฑ์แอคทีฟประเภทดูดซับออกซิเจนนิยมใช้กับผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์เพื่อลดปริมาณ ออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์ ช่วยป้องกันการเสื่อมคุณภาพ เกิดสี และกลิ่นรสที่ไม่พึงประสงค์ โดยใช้ สารดูดซับออกซิเจน (Oxygen absorber) หรือผง Iron oxide บรรจุในซองเล็ก (Sachet) ใส่ไว้ ภายในบรรจุภัณฑ์ชั้นใน หรือเติมในพอลิเมอร์ที่ใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ เช่น ขวดพลาสติก ถุงแพช (Pouch)

บรรจุภัณฑ์แอคทีฟประเภทดูดหรือปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์

บรรจุภัณฑ์แอคทีฟประเภทดูดหรือปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ภายในบรรจุภัณฑ์ โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากผลิตภัณฑ์เพื่อป้องกันการ พองหรือแตกของบรรจุภัณฑ์หรือปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มเติมเพื่อรักษาความเข้มข้นที่ เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์บางประเภท เช่น เนื้อสัตว์ เนยแข็ง อาหารพร้อมบริโภคแช่เย็น วัสดุที่ใช้ ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่นิยมใช้คือ ปูนขาว (calcium hydroxide) ซิลิกาเจล (silica gel) ส่วน วัสดุที่ใช้ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่นิยมใช้คือ ซองบรรจุสารเคมีที่สามารถปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์เมื่อสัมผัสกับน้ำ เช่น โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate) กรดซิตริก (citric acid) บรรจุภัณฑ์แอคทีฟประเภทยับยั้งจุลินทรีย์

บรรจุภัณฑ์แอคทีฟสำหรับยับยั้งจุลินทรีย์ เป็นรูปแบบที่นิยมสำหรับใช้ในการบรรจุเนื้อสัตว์ เนื่องจากช่วยลดการเจริญของจุลินทรีย์ และยืดอายุการเก็บรักษา ซึ่งมีหลายรูปแบบ เช่น บรรจุภัณฑ์

ที่ผลิตจากแผ่นฟิล์มที่มี โดยสารต้านจุลินทรีย์ที่อยู่ในแผ่นฟิล์มจะค่อย ๆ ปลดปล่อยออกจากแผ่นฟิล์ม เข้าไปยังภายในบรรจุภัณฑ์เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ หรือการเคลื่อนสารต้านจุลินทรีย์ลงบน ผิวของผลิตภัณฑ์ เช่น การใช้แว็กซ์เคลือบอาหาร ซึ่งสารต้านจุลินทรีย์จะปลดปล่อยออกมาสัมผัสกับ ผลิตภัณฑ์ได้โดยตรง โดยสารเคลือบที่นิยมใช้จะเป็นสารประเภทไขมันจากธรรมชาติ นิยมนำมา เคลือบผลไม้เพื่อคงความสด เนื่องจากสารเคลือบผิวช่วยลดอัตราการคายน้ำออกจากผิวของผลไม้ และเพิ่มความมันเงาให้กับผิวผลไม้ [19]



รูปที่ 2.6 บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active packaging) [19]

2.5. อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)

2.5.1. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)

ในปัจจุบันโลหะออกไซด์ (Metal oxides) ได้รับความสนใจอย่างมากเป็นสารที่นำมาช่วยพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากโลหะออกไซด์มีสมบัติที่หลากหลาย ซึ่งซิงค์ออกไซด์เป็นโลหะออกไซด์ ชนิดหนึ่งจะมีสมบัติในการยับยั้งแบคทีเรีย (Anti-Bacteria) ไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย นอกจากสมบัติในการยับยั้งแบคทีเรียแล้วซิงค์ออกไซด์ยังสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วง UV-A และ UV-B ทำให้สามารถป้องกันรังสี UV-A และ UV-B รวมถึงการระงับกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ได้อีกด้วยซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ทั่วไปที่มีการใช้งานจำนวนมากไม่ละลายในน้ำและใช้ผสมในผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น ยาง พลาสติก เซรามิก แก้ว น้ำมันเครื่อง สีทา สารยึดเกาะอาหาร แบตเตอรี่ เป็นต้น ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) มีโครงสร้างหลัก 3 รูปแบบ และแสดงให้เห็นจากรูปที่ 2.7 ดังนี้

1. โครงสร้างเฮกซะโกนอล (Wurtzite)

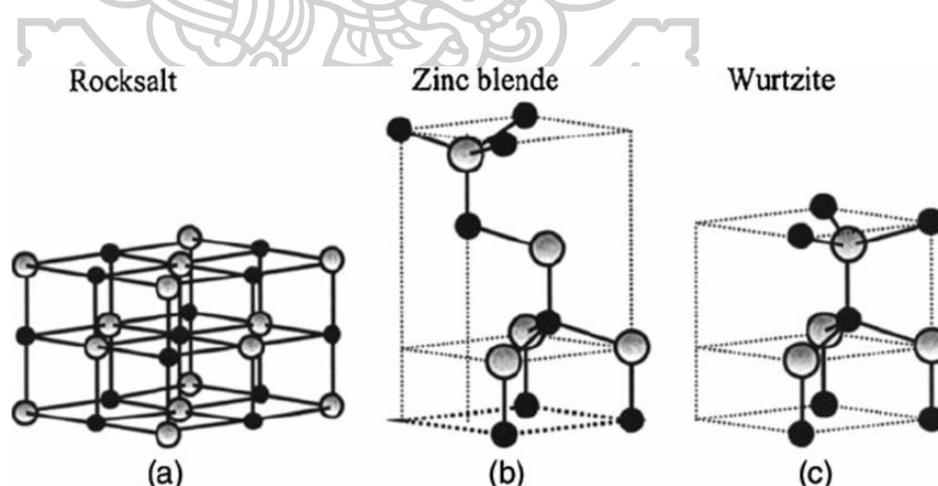
เป็นโครงสร้างที่พบได้ทั่วไปมากที่สุดจะประกอบด้วยอะตอมซิงค์ (Zn) ล้อมรอบด้วยอะตอมออกซิเจน (O) 4 อะตอม เรียงเป็นรูปจัตุรัส โครงสร้างนี้จะมีความเสถียรสูง มีจุดหลอมเหลวสูง ถึง 1800°C และมีความหนาแน่นสูงถึง 5.607 g/cm^3 นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์หลายประเภท เช่น ครีมกันแดด ยารักษาสิว สีทาสี เป็นต้น

2. โครงสร้างร็อคเกลิต (Rocksalt)

โครงสร้างนี้คล้ายคลึงกับเกลือแกง (NaCl) ประกอบด้วยอะตอมซิงค์ (Zn) และอะตอมออกซิเจน (O) เรียงสลับกันเป็นตาข่ายลูกบาศก์ โครงสร้างนี้พบได้น้อยกว่าโครงสร้างเฮกซะโกนอล มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า 1577°C และมีความหนาแน่นต่ำกว่า 4.95 g/cm^3 นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์บางประเภท เช่น เซ็นเซอร์ก๊าซ วัสดุเรืองแสง เป็นต้น

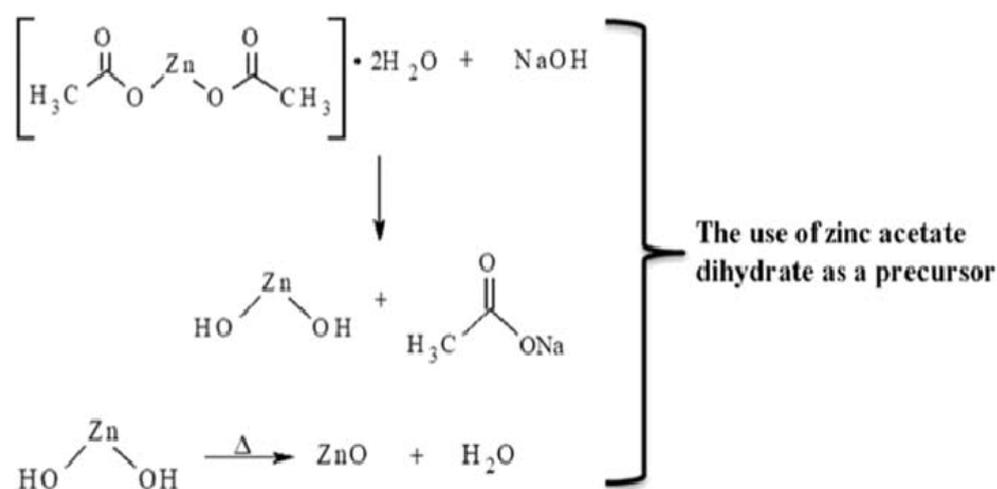
3. โครงสร้างคิวิก (Zinc blende)

โครงสร้างนี้คล้ายคลึงกับแรซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) ประกอบด้วยอะตอมซิงค์ (Zn) และอะตอมออกซิเจน (O) เรียงสลับกันเป็นรูปจัตุรัส โครงสร้างนี้พบได้น้อยที่สุด มีจุดหลอมเหลวต่ำที่สุด ที่ 1390°C และมีความหนาแน่นต่ำที่สุดที่ 4.45 g/cm^3 นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์บางประเภท เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น



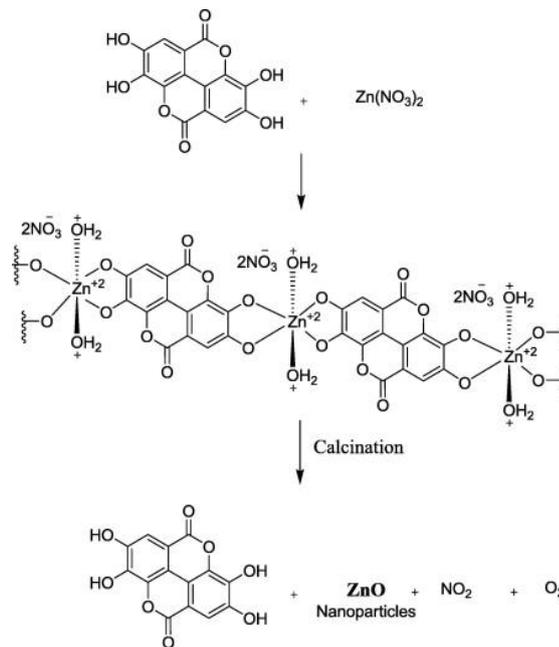
รูปที่ 2.7 โครงสร้างซิงค์ออกไซด์ [20]

จึงมีความคิดที่จะทำการปรับปรุงโดยการเติม NaOH ลงใน Zinc acetate dihydrate จากรูปที่ 2.9 เมื่อละลาย NaOH ลงในซิงค์อะซิเตตไฮเดรต ไอออนโซเดียม (Na^+) จะทำหน้าที่ดึงไอออนอะซิเตต (CH_3COO^-) ออกจากซิงค์ (Zn^{2+}) ซึ่งจะได้ $\text{Zn}(\text{OH})_2$ และนำไปให้ความร้อนจะได้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ทำให้กระบวนการนี้ไม่ต้องใช้ความร้อนที่สูง และปริมาณอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ที่ได้จะมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น แต่พบว่าขนาดของอนุภาคที่ได้จะมีขนาดที่ไม่เท่ากันทำให้ส่งผลต่อสมบัติของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ที่จะนำไปใช้งาน



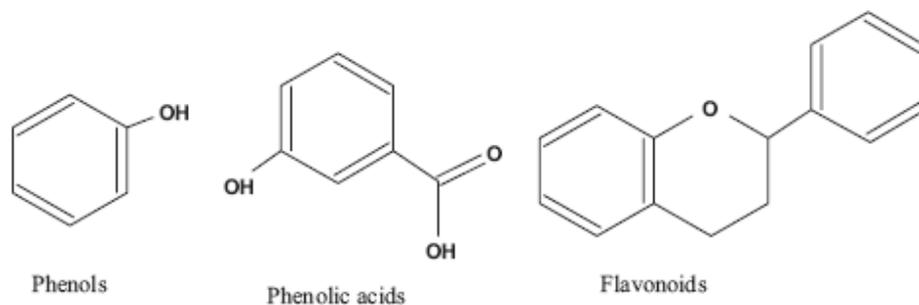
รูปที่ 2.9 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จาก Zinc dihydrate และ NaOH [23]

จึงทำการควบคุมขนาดอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จากรูปที่ 2.10 โดยการใช้สารประกอบพินอลจากวัสดุชีวภาพ เช่น กรดพีนอลิก อัลคาลอยด์ ฟลาโวนอยด์ และเทอร์พีนอยด์ สารประกอบเหล่านี้มีความสามารถในการสร้างอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ผ่านกระบวนการรีดอกซ์ซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งตัวรีดิวซ์และช่วยในการรักษาเสถียรภาพของการก่อตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ได้จากการจับตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของซิงค์ (Zinc complex) หลังจากนั้นนำไปทำการ Calcination จะทำให้ได้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ทำให้ได้ปริมาณที่เพิ่มขึ้นและขนาดของอนุภาคที่ได้จะมีขนาดที่เท่ากันจึงเหมาะต่อการนำไปใช้งานด้านต่าง ๆ



รูปที่ 2.10 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากสารประกอบฟีนอล [24]

สารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) หรือสารประกอบฟีนอลจะเป็นสารที่พบได้ในตามธรรมชาติจากพืชหลายชนิด เช่น ผัก ผลไม้ เปลือกไม้ เมล็ดธัญพืช เป็นต้น ซึ่งจะเป็นสารที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นประโยชน์ในการเจริญเติบโต โดยสารประกอบฟีนอลจะมีสรรพคุณที่ดีต่อสุขภาพ ในการใช้เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) ซึ่งสามารถละลายได้ในน้ำ จากโครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลจากรูปที่ 2.11 ซึ่งจะแสดงสูตรสร้างเคมีเป็นวงแหวนที่เป็นอนุพันธ์ของวงแหวนเบนซิน โดยจะมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) อย่างน้อยหนึ่งหมู่มาต่ออยู่กับวงแหวนเบนซิน



Structures of common phenolic compounds.

รูปที่ 2.11 โครงสร้างสารประกอบฟีนอล [25]

สารประกอบฟีนอลในธรรมชาติจะมีมากมายหลายชนิด ซึ่งจะมีความแตกต่างกันตามลักษณะ สูตรโครงสร้างทางเคมี จะมีตั้งแต่โครงสร้างที่ซับซ้อนจนถึงโครงสร้างอย่างง่าย เช่น กรดฟีนอลิก (Phenolic acids) ไปจนถึงกลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ เช่น ลิกนิน (Lignin) ส่วนใหญ่กลุ่มใหญ่ที่พบจะเป็นสารประกอบพลาฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) ซึ่งจะพบในตระกูลของพืชเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะรวมอยู่ในโมเลกุลของน้ำตาลในรูปแบบของสารประกอบไกลโคไซด์ (Glycoside) ซึ่งน้ำตาลที่พบในโมเลกุลของสารประกอบฟีนอล คือ น้ำตาลกลูโคส (Glucose) และพบว่าอาจมีการรวมตัวกันระหว่าง สารประกอบฟีนอลด้วยกันเอง หรือสารประกอบฟีนอลกับสารประกอบอื่น ๆ เช่น กรดอินทรีย์ (Organic acid) ซึ่งจะรวมอยู่ในโมเลกุลของ โปรตีน แอลคาลอยด์ (Alkaloid) และเทอร์พีนอยด์ (Terpenoid) เป็นต้น [25]

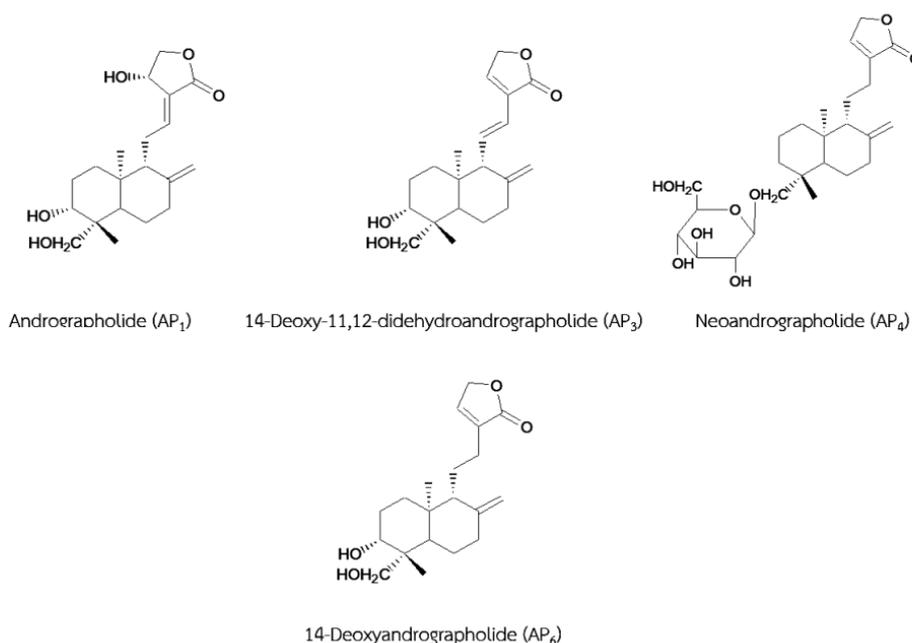
2.5.3. พืชที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

2.5.3.1. ใบฟ้าทะลายโจร

ฟ้าทะลายโจร มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Andrographis paniculata* (Burm.f.) เป็นพืชล้มลุกฤดูเดียวในตระกูล *Acanthaceae* มีถิ่นกำเนิดในอินเดียและศรีลังกา ลำต้นเป็นสี่เหลี่ยม แตกกิ่งได้ ใบรียาว ปลายใบแหลม ดอกขนาดเล็กสีขาว และเมื่อดูดน้ำตาลอ่อนจะเห็นได้จากรูปที่ 2.12 ซึ่งในใบฟ้าทะลายโจร มีสารประกอบแลคโตน (Lactone) ซึ่งสมุนไพรฟ้าทะลายโจรจะมีสารสำคัญที่ออกฤทธิ์ทางยาสมุนไพรอยู่ 3 สารด้วยกัน โดยเป็นสารในกลุ่ม Lactone ซึ่งก็คือ สารแอนโดรกราโฟไลด์ (Andrographolide), สารนีโอแอนโดรกราโฟไลด์ (NeoAndrographolide) และสาร 14-ดีออกซีแอนโดรกราโฟไลด์ (14-deoxy-andrographolide) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.13 [26]



รูปที่ 2.12 ใบฟ้าทะลายโจร [26]



รูปที่ 2.13 สูตรโครงสร้างของสารที่พบในสมุนไพรรพ้าทะเลลายโจร [27]

2.5.3.2. เปลือกมังคุด

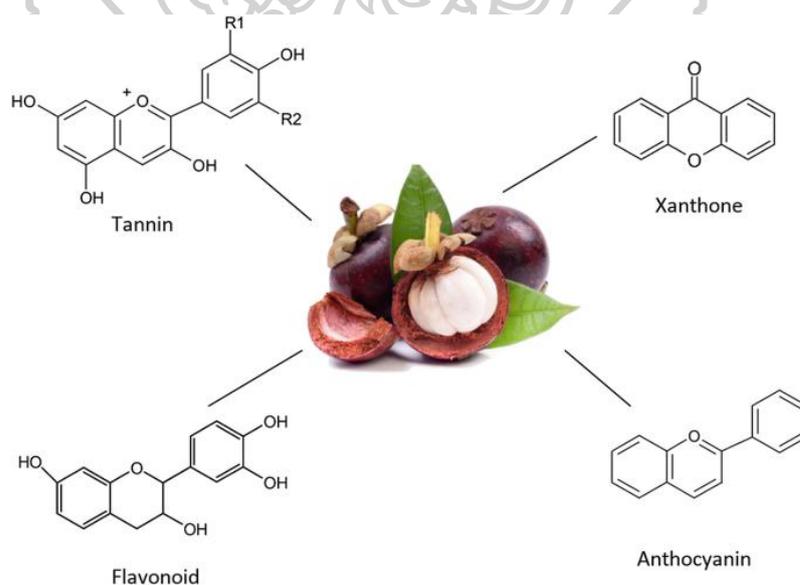
มังคุดมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ *Garcinia mangostana* มังคุดเป็นผลไม้จากเอเชียที่ได้รับความนิยมมาก เพราะรสชาติที่อร่อย จากรูปที่ 2.14 ซึ่งแสดงลักษณะภายนอกของผลที่มีกลีบเลี้ยงติด ส่วนเนื้อในก็มีสีขาวสะอาด มีรสชาติที่แสนหวานอร่อยอย่างมากที่จะหาผลไม้อื่นมาเทียบ ได้มีการนำมังคุดมาประกอบอาหารบ้างทั้งอาหารคาวและหวาน ในขณะที่ส่วนใหญ่จะนิยมรับประทานมังคุดสุกเป็นผลไม้ ซึ่งมีประโยชน์ในการต่อต้านอนุมูลอิสระ ช่วยเสริมสร้างภูมิคุ้มกันให้กับร่างกายได้เป็นอย่างดี อีกทั้งมีส่วนช่วยในการชะลอวัยและการเกิดริ้วรอย และยังมีส่วนช่วยบำรุงผิวพรรณให้เปล่งปลั่งสดใสอีกด้วย เนื้อมังคุดมีคุณค่าทางอาหารสูงโดยเฉพาะโพแทสเซียม โปรตีน สารเยื่อใย วิตามินซี ฟอสฟอรัส แคลเซียมและแมกนีเซียม จากการวิเคราะห์พบว่าในน้ำมังคุด 100 มิลลิลิตร ประกอบด้วยโพแทสเซียมปริมาณสูงถึง 87.14 มิลลิกรัม แคลเซียม 34.53 มิลลิกรัม และแมกนีเซียม 111.22 มิลลิกรัม

ในส่วนของยางมังคุด มีประโยชน์อย่างมากต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เนื่องจากยางมังคุดสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการสกัดสารกลุ่มแซนโทน ซึ่งแต่ละชนิดที่มีฤทธิ์ทางยาที่แตกต่างกัน รวมทั้งมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมพลาสติก นอกจากนี้ยางมังคุดยังเข้ามามีบทบาทในการใช้เป็นสารเจือปนในอาหาร เพราะมีฤทธิ์ในการยับยั้งเชื้อ *Staphylococcus Aureus* ซึ่งเป็นเชื้อที่ก่อให้เกิดอาการอาหารเป็นพิษ

และเปลือกของมังคุดมีสารให้รสฝาดคือ แทนนิน แซนโทน จากรูปที่ 2.15 แสดงสารที่พบในเปลือกมังคุดจำพวก แซนโทน แทนนิน ซึ่งแทนนินมีรสฝาด สมานให้แผลหายเร็ว เปลือกมังคุดช่วยลดอาการอักเสบและมีฤทธิ์ต้านเชื้อจุลชีพที่ดี ในทางยาสมุนไพร ใช้เปลือกมังคุดตากแห้งต้มกับน้ำหรือย่างไฟ ฝนกับน้ำปูนใส แก้ท้องเสีย เปลือกแห้งฝนกับน้ำปูนใส ใช้รักษาอาการน้ำกัดเท้า แผลเปื่อย เปลือกมังคุด มีสารป้องกันเชื้อเหมาะแก่การหมักบูย [28]



รูปที่ 2.14 ผลไม้มังคุด [29]



รูปที่ 2.15 สูตรโครงสร้างของสารที่พบในเปลือกมังคุด [30]

2.6. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Review of related literature)

2.6.1. ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระในพืช

จากงานวิจัยของ Gurupriya S และคณะ [31] งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การประเมินประสิทธิภาพของสารต้านอนุมูลอิสระและฤทธิ์ต้านจุลชีพของสารสกัดจากใบพืชสมุนไพรฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculate*) โดยการสกัดใบฟ้าทะลายโจรด้วยเมทานอล หลังจากนั้นแยกสารสกัดเมทานอลออกเป็นส่วน ๆ แล้วผสมตัวทำละลายที่มีขั้วต่างกัน เช่น เฮกเซน คลอโรฟอร์ม เอทิลอะซิเตท และน้ำ จากการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเพื่อประเมินฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดเมทานอลและส่วนผสมอื่น ๆ โดยใช้วิธีการ DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) ผลการทดลองตารางที่ 2.1 พบว่าการสกัดใบฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculate*) ด้วยเมทานอลและส่วนผสมอื่น ๆ จะมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และฟลาโวนอยด์ ที่แตกต่างกันหลังจากการสกัด ซึ่งการสกัดด้วยเมทานอลจะมีปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) สูงสุดที่ 41.79 $\mu\text{g QE/mg}$ และมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic) ที่ 24.96 $\mu\text{g QE/mg}$ แสดงถึงการมีอยู่ของสารประกอบฟีนอลิกในใบพืชสมุนไพรฟ้าทะลายโจรที่สกัดด้วยเมทานอลได้เป็นอย่างดี

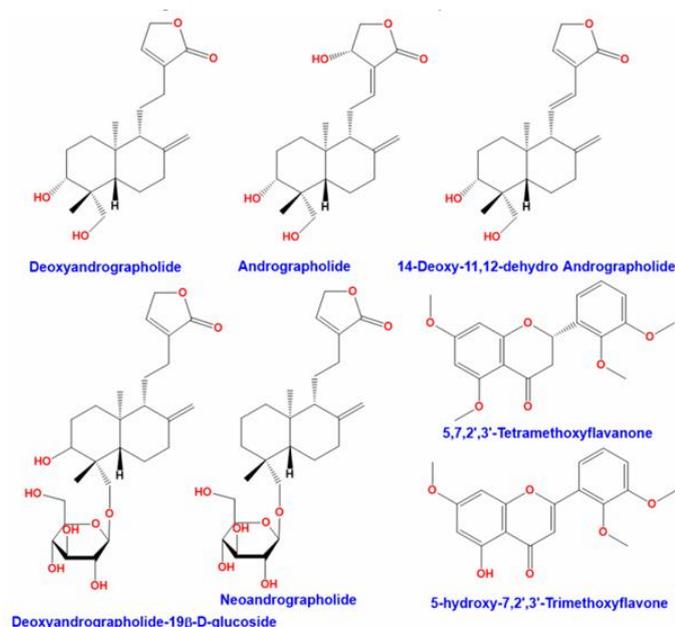
ตารางที่ 2.1 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ ที่สกัดด้วยเมทานอลที่แตกต่างกัน [31]

Extracts (1000 $\mu\text{g/ml}$)	Flavonoid ($\mu\text{g QE/mg}$)	Phenolic ($\mu\text{g GAE/mg}$)
Methanol extract	41.79 \pm 0.44	24.96 \pm 1.00
Hexane fraction	17.11 \pm 0.51	26.79 \pm 0.66
Ethyl acetate fraction	19.42 \pm 0.21	20.54 \pm 0.51
Chloroform fraction	11.66 \pm 0.12	16.17 \pm 0.61
Residual fraction	28.77 \pm 0.35	20.50 \pm 0.43

Data are expressed as mean \pm standard error of three replicates. MEE= Crude methanol extract, NHF= n-Hexane fraction, CHF= Chloroform fraction, EAF= Ethyl acetate fraction, WSF= Water soluble fraction

จากงานวิจัยของ Annabelle Cesaro และคณะ[32] เรื่องสารสำคัญในพืชสมุนไพรฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculate*) บทความวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาการต้านอนุมูลอิสระของพืชสมุนไพรฟ้าทะลายโจร กลไกการออกฤทธิ์ ผลกระทบต่อสุขภาพ และการนำไปใช้งานใบพืชสมุนไพร จากรูปที่ 2.16 พบว่าฟ้าทะลายโจรมีสารที่สำคัญอยู่ 7 ชนิดด้วยกัน โดยเป็นสารในกลุ่ม Lactone ซึ่งก็คือสารแอนโดรกราโฟไลด์ (Andrographolide), สารนีโอแอนโดรกราโฟไลด์ (NeoAndrographolide) และสาร 14-ดีออกซีแอนโดรกราโฟไลด์ (14-deoxy-andrographolide) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีสารดีออกซีอินโดโรกราโฟไลด์ (Deoxyandrographolide), สารเตตระเมทอก

ซีฟลาวโนน (Tetramethoxyflavanone), สารไฮดรอกซีไตรเมทอกซีฟลาวโนน (5-hydroxy-7,2',3'-Trimethoxyflavone) และสารดีอ็อกซีอันโดรโกราไฟด์-เบต้า-ดีกลูโคไซด์ (Deoxyandrographolide-glucoside) จะแสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของสารประกอบฟีนอลในใบพืชสมุนไพรฟ้าทะลายโจร



รูปที่ 2.16 สารประกอบฟีนอลในฟ้าทะลายโจร [32]

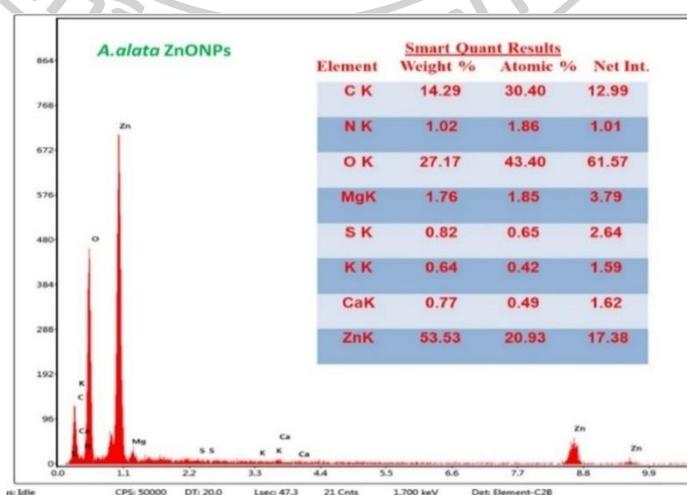
จากงานวิจัยของ S Melia และคณะ [33] เรื่อง สมบัติของสารสกัดจากเปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana*) ที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระธรรมชาติ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาสมบัติของสารสกัดจากเปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana*) ที่มีสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ จากตารางที่ 2.2 พบว่าการสกัดด้วยเอทานอลจะมีปริมาณฟีนอลที่ 90 μg QE/mg จะแสดงถึงการมีอยู่ของสารประกอบฟีนอลในเปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana*) ที่ถูกสกัดด้วยเอทานอลได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้เปลือกของมังคุดยังมีสารประกอบของแซนโทน (Xanthones) แทนนิน (Tannin) แอนโทไซยานิน (Anthocyanin) และ สารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds)

ตารางที่ 2.2 สารประกอบเปลือกมังคุดและปริมาณสารประกอบฟีนอล [33]

Compounds	Quantity	Unit
Alfa-mangostin (Xanthones)	37.5	mg/100g
Anthocyanin	1.85	mg/100g
Tannin	3.2	%
Anitioxidant activity (IC ₅₀)	210.45	µg/ml
Total Phenolic	90	mgGAE/g

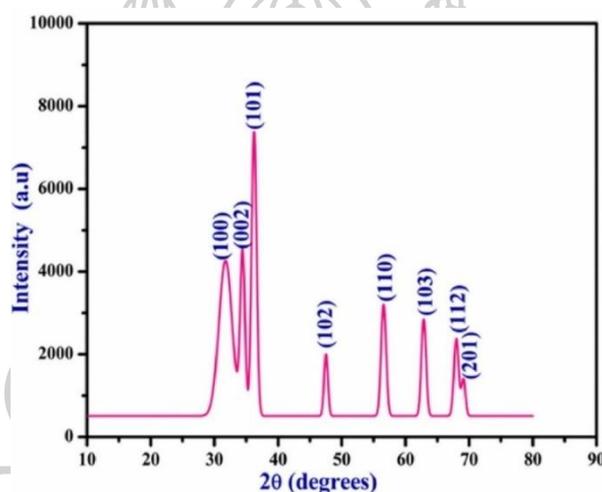
2.6.2. การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

จากงานวิจัยของ Sandhya Sri Dappula และคณะ[34] เรื่อง การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยใช้สารสกัดจากฟ้าทะลายโจรด้วยน้ำ บทความวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาและพัฒนาอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide nanoparticles) ที่สังเคราะห์จากวัสดุชีวภาพ (biosynthesis) โดยใช้สารสกัดจากพืชอย่างใบฟ้าทะลายโจร (*Andrographis alata*) จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDAX พบว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นมา จะแสดงปริมาณอัตราส่วนของโลหะและออกซิเจนที่มีอยู่ในพื้นที่ผิวของ NP ซึ่งสเปกตรัม EDX จะแสดงพีคที่เด่นชัดสำหรับ Zn และ O ด้วยอัตราส่วน 53:27 ดังที่แสดงใน รูปที่ 2.17 ผลการทดลองของ EDX จะแสดงให้เห็นว่าไอออนซิงค์ทั้งหมดถูกรีดิวซ์เป็น ZnO NPs เนื่องจากไม่มีไอออนของสังกะสีอยู่ที่เด่นชัด นอกจากนี้ EDAX ยังแสดงให้เห็นความบริสุทธิ์ของ ZnO NPs ที่สังเคราะห์ทางชีวภาพด้วยจากพีคที่ต่ำสำหรับธาตุ C, N, K, Mg และ Ca อาจเนื่องมาจากสารที่อยู่ในสารสกัดจากพืช



รูปที่ 2.17 สเปกตรัม EDAX ของ ZnO NPs ที่สังเคราะห์โดยใช้สารสกัดจาก *A.alata* [34]

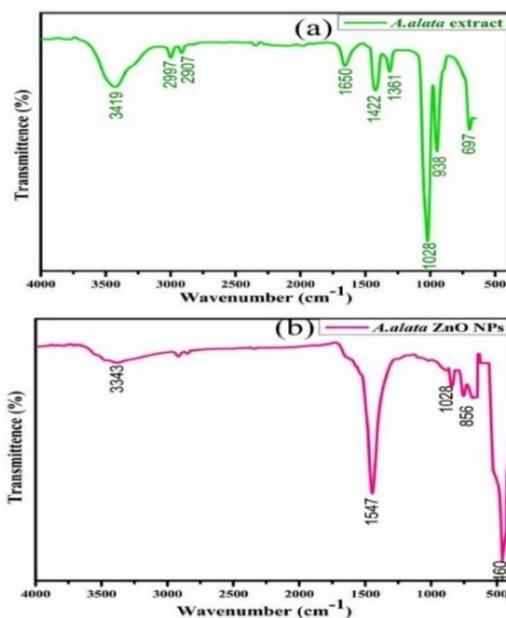
ในส่วนของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) โครงสร้างผลึกสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมี ของ ZnO NPs ได้รับการยืนยันโดยการวิเคราะห์ XRD ซึ่งรูปแบบ XRD ของ ZnO NPs ที่ถูกสังเคราะห์ถูกนำเสนอในรูปแบบที่ 2.18 จากสเปกตรัม XRD เปิดเผยพิกของการเลี้ยวเบนด้วยค่า 2θ ที่ 32.00° , 34.55° , 36.37° , 47.67° , 56.71° , 63.02° , 68.16° และ 69.32° ซึ่งมีระนาบ (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112) และ (201) ค่าพิกเหล่านี้เป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ JCPDS (มาตรฐานการเลี้ยวเบน) ที่มีหมายเลข: 36-1451 และด้วยเหตุนี้ จึงเป็นการยืนยันโครงสร้างผลึกหกเหลี่ยมของเวิร์ตไซต์ โดยที่ไอออนซิงค์ (Zn^{2+}) แต่ละตัวได้มีการจัดเรียงแบบ Tetragonal coordination ตลอดจนถึง Hexagonal ที่มีความสมมาตร



รูปที่ 2.18 รูปแบบ XRD ของ ZnO NPs ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยใช้สารสกัด *A.alata* [34]

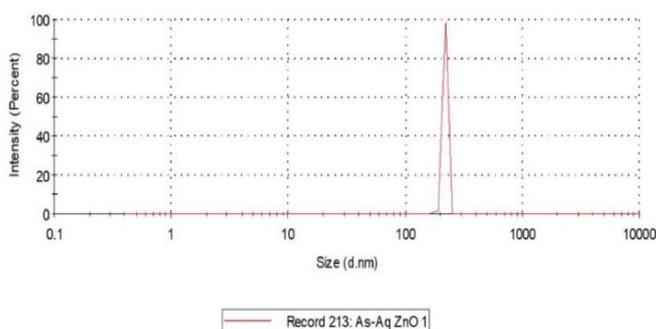
การศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วย FTIR จะใช้หลักการในการสั่นไหวของสายโซ่โมเลกุล ดังนั้น จะช่วยยืนยันกลุ่มฟังก์ชันซึ่งจะเป็นโมเลกุลของสารสกัดจากฟ้าทะลายโจร สเปกตรัม FTIR ของสารสกัดฟ้าทะลายโจรและ ZnO NPs ที่สังเคราะห์ที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.19 สารสกัดฟ้าทะลายโจรมียอดพิกที่ $3,419$ และ $1,028\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงการมีอยู่ของ O-H stretching และ C-O stretching ตามลำดับ แถบดูดซับอื่นๆ ที่ 2997 , 2907 , 2341 , 1650 , 1422 และ 1361 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบยืดออกของ C-H stretching, C-N stretching, C=O stretching และ C=C stretching จากค่าเหล่านี้จะแสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของสารจากพืช เช่น ฟีนอล ฟลาโวนอยด์ โพรตีน และพอลิแซ็กคาไรด์ ในส่วนสเปกตรัม FT-IR ของ ZnO-NP ยังแสดงรูปแบบแถบการดูดซับที่คล้ายคลึงกัน เช่นเดียวกับสารสกัด แต่มีพิกที่ต่ำกว่าเล็กน้อยรวมถึงความเข้มของพิกที่ลดลง ซึ่งบ่งชี้ว่า ZnO NPs จะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของพืช จากการสังเคราะห์ทางชีวภาพ จากผลการทดลองเหล่านี้บ่งบอก

ได้ว่าโมเลกุลทางชีวภาพจะมีบทบาทสำคัญในการสร้าง NPs และการสร้าง ZnO NPs ที่เสถียรใน ตัวกลางที่เป็นน้ำได้ที่สำคัญจุดพีคที่ 460 cm^{-1} จะเป็นของ ZnO แสดงให้เห็นการก่อตัวของ ZnO NPs อย่างชัดเจน



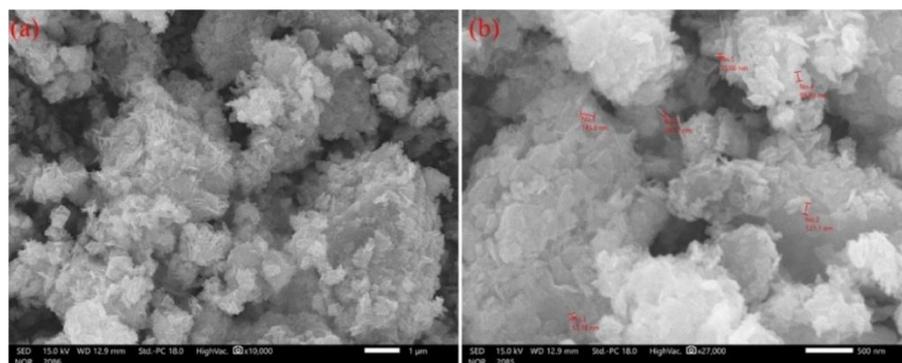
รูปที่ 2.19 สเปกตรัม FT-IR ของ (a) สารสกัด *A.alata* (b) ZnO NPs [34]

ในส่วนของการทดสอบการกระเจิงแสงแบบไดนามิก (DLS) เพื่อวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ZnO NPs ที่สังเคราะห์ขึ้น จะทำให้ทราบการกระจายขนาดอนุภาคจากสเปกตรัม DLS ที่แสดงดัชนีการกระจายตัว (PDI) และการกระจายขนาดอนุภาคของ ZnO NPs ดังในรูปที่ 2.20 บ่งบอกได้ว่าสารสกัดจาก *A.alata* สามารถสร้าง NPs ที่มีขนาดเล็ก และจากสเปกตรัม DLS ยังสามารถยืนยันได้ว่า NPs ที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดที่สม่ำเสมอและใกล้เคียงกัน จากค่าความแปรผันของขนาดอนุภาคนานกับการรวมตัวกันของ NPs จะมีค่าดัชนีการกระจายตัว (PDI) เท่ากับ 0.890 บ่งชี้ถึงการกระจายตัวที่ดี และความสม่ำเสมอของ NPs ในตัวกลาง



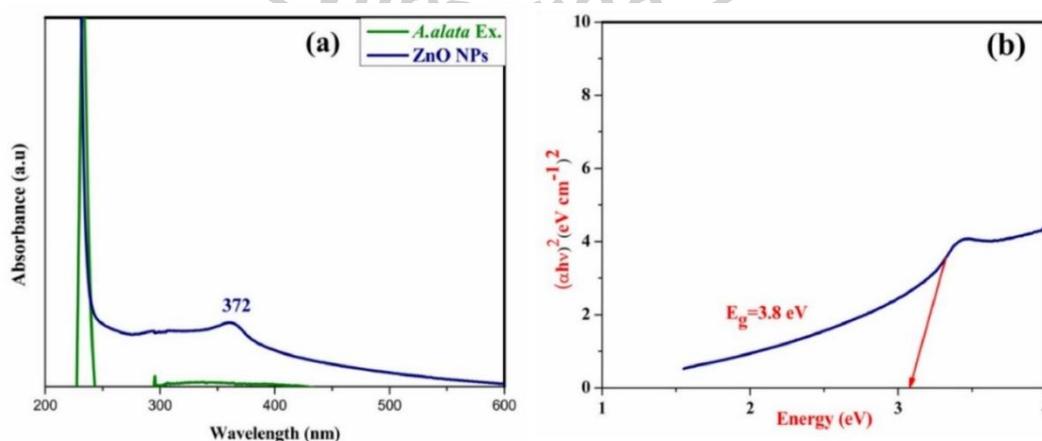
รูปที่ 2.20 การวิเคราะห์ DLS ของ ZnO NPs [34]

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาขนาด รูปร่าง และการแพร่กระจายของ ZnO NPs จะมีการวิเคราะห์ภาพ SEM พบว่าในช่วงการขยายที่แตกต่างกันที่ 1 μm - 500 nm แสดงในรูปที่ 2.21 ภาพ SEM แสดง ZnO NPs ที่สร้างขึ้นโดยสารสกัดของฟ้าทะลายโจร ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคตั้งแต่ 35.66 ถึง 53.18 นาโนเมตร ZnO NPs ซึ่งจะปรากฏอยู่ในรูปของอนุภาคที่เกาะกลุ่มกันและมีพื้นผิวเรียบ การรวมตัวกันนี้เกิดขึ้นจากพลังงานพื้นผิวสูงของ NPs และความหนาแน่นของอนุภาค



รูปที่ 2.21 ภาพ SEM ของ ZnO NPs ที่ได้จากของสารสกัด *A.alata* (a) 1 μm (b) 500 nm [34]

การทดสอบ UV – Vis ในช่วง 200-400 nm ดังรูปที่ 2.22 a) พบว่า ZnO NPs จะมีการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 372 nm ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน $E_g = 3.45148$ eV ดังรูปที่ 2.22 b) และเป็นผลมาจากสมบัติทางชีวภาพ เช่น สารต้านอนุมูลอิสระฤทธิ์ต้านเชื้อจุลชีพ



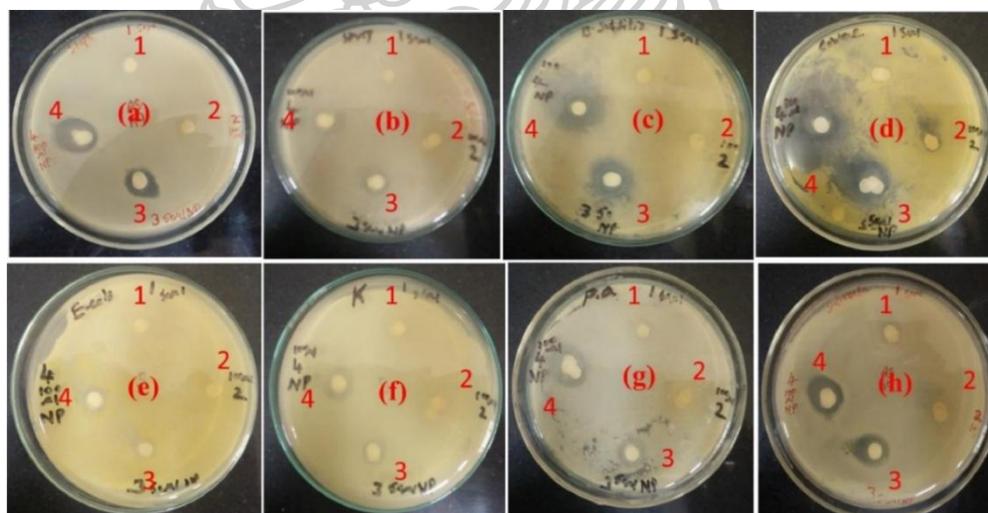
รูปที่ 2.22 สเปกตรัม UV – Vis ของ (a) สารสกัด *A.alata* และ ZnO NPs (b) Tauc plot [34]

การทดสอบสมบัติในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของสารสกัด *A.alata* และ ZnO NPs ที่สังเคราะห์ได้ โดยเทียบกับจุลินทรีย์แกรม (+) และแกรม (-) โดยใช้วิธีการเพาะเชื้อบนจาน (Disc diffusion method) ผลการทดสอบจะแสดงเป็นโซนการยับยั้งเป็นหน่วยมิลลิเมตรที่ 50 μ L และ 100 μ L ของสารสกัดจากพืช การทดสอบการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของ ZnO NPs กับแบคทีเรียทั้ง 8 สายพันธุ์ แสดงในตารางที่ 2.3 และรูปที่ 2.23 พบว่าสารสกัดจากพืชมีฤทธิ์ต้านเชื้อจุลินทรีย์ที่ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ แล้วพบว่าความสามารถในการต้านจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างมากด้วย ZnO NPs ที่เตรียมโดยใช้สารสกัด *A.alata* ได้เป็น ZnO NPs เมื่อเปรียบเทียบกับยาฆ่าเชื้อจะแสดงประสิทธิภาพในการต้านเชื้อจุลินทรีย์กับแบคทีเรียแกรม (+) และแกรม (-) จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า ZnO NPs

ตารางที่ 2.3 ระยะเวลาการยับยั้งของสารสกัด *A.alata* และ ZnO NPs ต่อแบคทีเรีย 8 สายพันธุ์ [34]

Samples	Concentrations (μ g/mL ⁻¹)	Zone of Inhibition (mm)							
		Gram (+)				Gram (-)			
		<i>S.a</i>	<i>S.p</i>	<i>B.s</i>	<i>C.d</i>	<i>E.c</i>	<i>K.p</i>	<i>Pa</i>	<i>S.t</i>
<i>A.alata</i> extract	50@100	06@07	06@06	07@08	06@09	06@06	06@06	07@08	07@08
<i>A.alata</i> ZnO NPs	50@100	10@14	07@08	13@22	14@29	07@08	07@09	09@14	11@14
Streptomycin	100	20	13	18	30	10	10	16	12

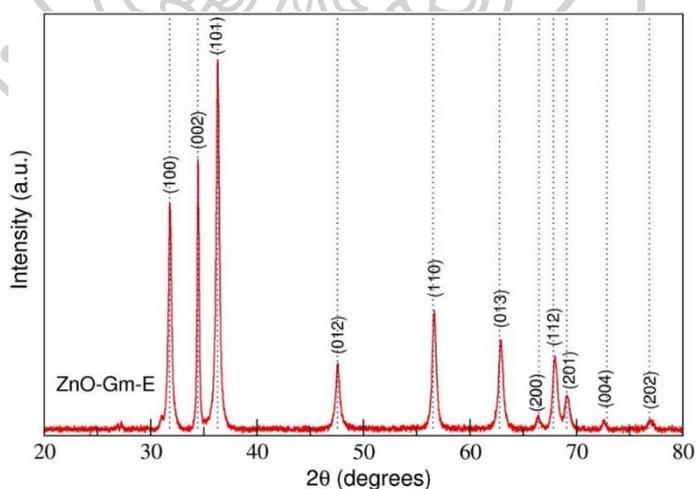
S.a-Staphylococcus aureus, *S.p*-Streptococcus pyogenes, *B.s*-Bacillus subtilis, *C.d*-Corynebacterium diphtheria, *E.c*-Escherichia coli, *K.p*-Klebsiella pneumonia, *Pa*-Pseudomonas aeruginosa, *S.t*-Salmonella typhi and streptomycin is used as a positive control.



รูปที่ 2.23 การแพร่กระจายของดิสก์เพื่อศึกษาฤทธิ์ต้านเชื้อจุลินทรีย์ของสารสกัดจากพืช *A.alata* และสังเคราะห์ ZnO NPs 1: สารสกัด *A.alata*-50 μ L, 2: สารสกัด *A.alata*-100 μ L, 3: ZnO NPs - 50 μ L และ 4: ZnO NPs - 100 μ L) [34]

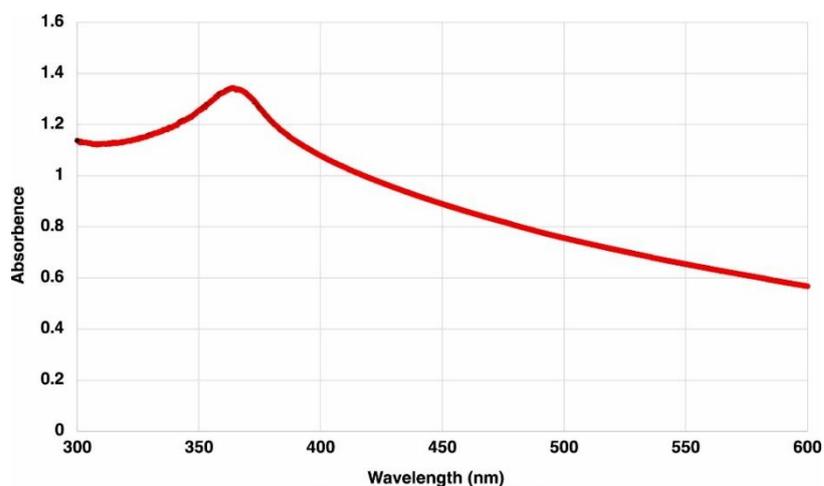
จากงานวิจัยของ Sandhya Sri Dappula และคณะ[35] เรื่อง การใช้ประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ทางชีวภาพจากสารสกัดเอทานอลเปลือกมังคุดเพื่อยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Xanthomonas oryzae* บทความวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาการนำอนุภาคนาโนสังเคราะห์ซึ่งได้สังเคราะห์ด้วยวัสดุชีวภาพที่ได้จากสารสกัดเปลือกมังคุดด้วยเอทานอล มาประยุกต์ใช้เพื่อยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Xanthomonas oryzae* ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคใบข้าวไหม้ จากรูปที่ 2.24 ผลของ XRD แสดงให้เห็นถึงโครงสร้าง Wurtzite ของ ZnO NPs

นอกจากนี้พืชที่ปรากฏจะมีความเด่นชัดสูงบ่งชี้ถึงความเป็นผลึกของอนุภาคที่สังเคราะห์ขึ้น ZnO NPs โดยสารสกัดจากมังคุด จะมีขนาดผลึกเฉลี่ยที่คำนวณได้คือ 387.122 Å ดังนั้นขนาดผลึกของ ZnO NPs มีขนาดใหญ่จากการใช้สารสกัดจากเปลือกมังคุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลของตัวทำละลายที่แตกต่างกันในการสังเคราะห์ ZnO NPs โดยการใช้การสังเคราะห์ทางเคมี ส่งผลให้ขนาดและสัญญาณวิทยาของอนุภาคแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญสารประกอบเปลือกมังคุดมีฤทธิ์ทางชีวภาพในตัวทำละลายที่มีขี้ ซึ่งเปลือกมังคุดจะทำหน้าที่เป็นสารรีดิวซ์โลหะ หรือสารทำให้คงตัว ด้วยเหตุนี้จึงไม่จำเป็นต้องทำการเผา เพื่อให้เกิดความเสถียรของ ZnO NPs ที่สังเคราะห์ทางชีวภาพได้ อย่างไรก็ตามในหลายกรณีของ ZnO NPs ที่สังเคราะห์ทางชีวภาพ มีการเผาเพื่อกำจัดสารตกค้างอินทรีย์หรือสิ่งเจือปนอื่นๆ ออกจากพื้นผิวของอนุภาคอย่างสมบูรณ์ ซึ่งพบว่าเวลาในการเผานานขึ้นจะเพิ่มขนาดผลึกของ ZnO NPs ที่สังเคราะห์ทางชีวภาพได้



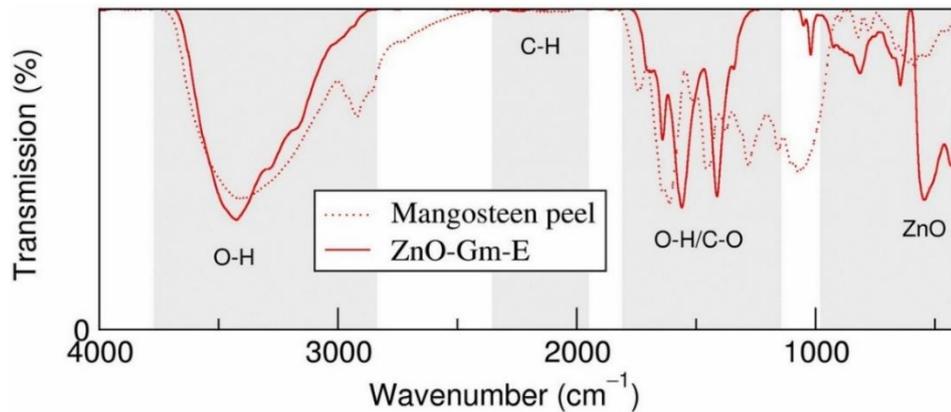
รูปที่ 2.24 รูปแบบ XRD ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกมังคุด (ZnO-Gm-E) จากเอทานอล [35]

จากการศึกษา UV-vis ของ ZnO NPs ในช่วง 300–600 นาโนเมตร พบว่าค่าความยาวคลื่นสูงสุดของ ZnO NPs ที่สังเคราะห์ด้วยสารสกัดจากเปลือกมังคุดมีค่า 364 นาโนเมตร ดังรูปที่ 2.25 นอกจากนี้ พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการเปลี่ยนชั้นพลังงานมีค่า 2.88 eV ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ ZnO NPs ดังนั้นจะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์



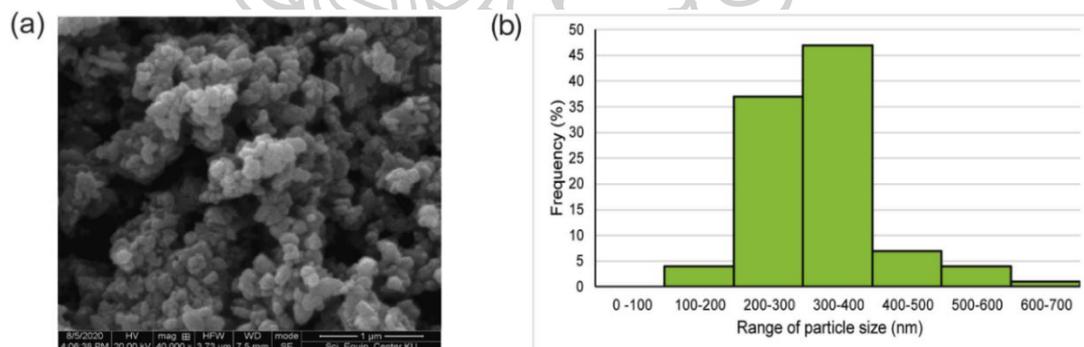
รูปที่ 2.25 สเปกตรัม UV-Vis ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกมังคุด (ZnO-Gm-E) [35]

การวิเคราะห์ FTIR ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกมังคุด (ZnO-Gm-E) จากรูปที่ 2.26 พีคของสเปกตรัมในช่วง $700\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ ของ ZnO-Gm-E แสดงให้เห็นถึงการก่อตัวของ ZnO NPs นอกจากนี้สเปกตรัม FTIR ของ ZnO-Gm-E จากเปลือกมังคุดจะแสดงจุดสูงสุดที่เกี่ยวข้องกับการสั่นของ -OH stretching ที่ประมาณ $3,500\text{ cm}^{-1}$ และการสั่นของคาร์บอนิล C=O stretching ที่ประมาณ $1,700\text{--}1,400\text{ cm}^{-1}$ ผลลัพธ์เหล่านี้จะแสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบจากพืชในสารสกัดมีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวแทนในการสังเคราะห์ทางชีวภาพของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้



รูปที่ 2.26 การวิเคราะห์ FTIR ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกมังคุด (ZnO-Gm-E) และสารสกัดเปลือกมังคุด [35]

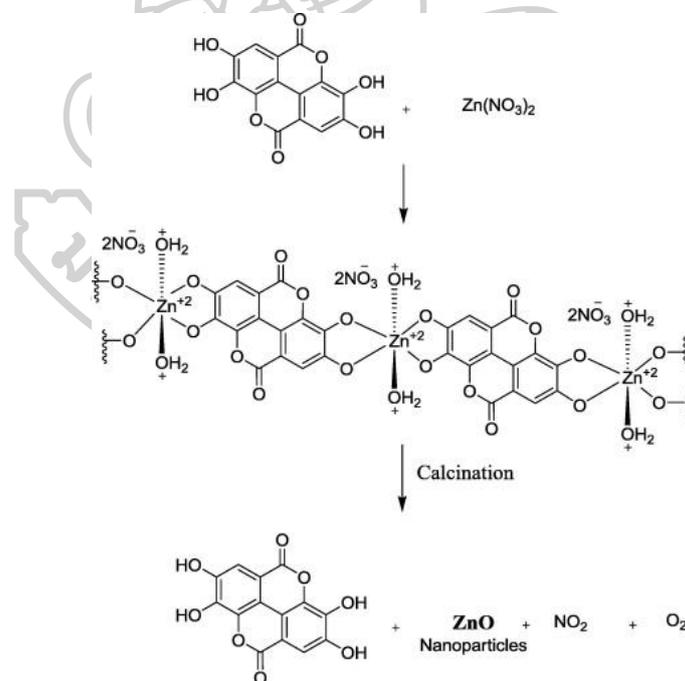
การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเปลือกมังคุด (ZnO-Gm-E) โดยใช้การวิเคราะห์ SEM พบว่าอนุภาค ZnO-Gm-E เกือบจะมีลักษณะเป็นทรงกลม จากรูปที่ 2.27 a โดยมีขนาดเฉลี่ย 321 ± 84 นาโนเมตร รูปที่ 2.27 b จะแสดงให้เห็นถึงขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน จะได้ ZnO NPs ที่มีรูปร่างคล้ายกันแต่มีขนาดไม่เท่ากัน ซึ่งการสังเคราะห์จะแสดงให้เห็นว่าส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของอนุภาคได้แก่ ความเข้มข้นของสารสกัดจากพืช เวลาในการทำปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารตั้งต้น และอุณหภูมิในการเผา



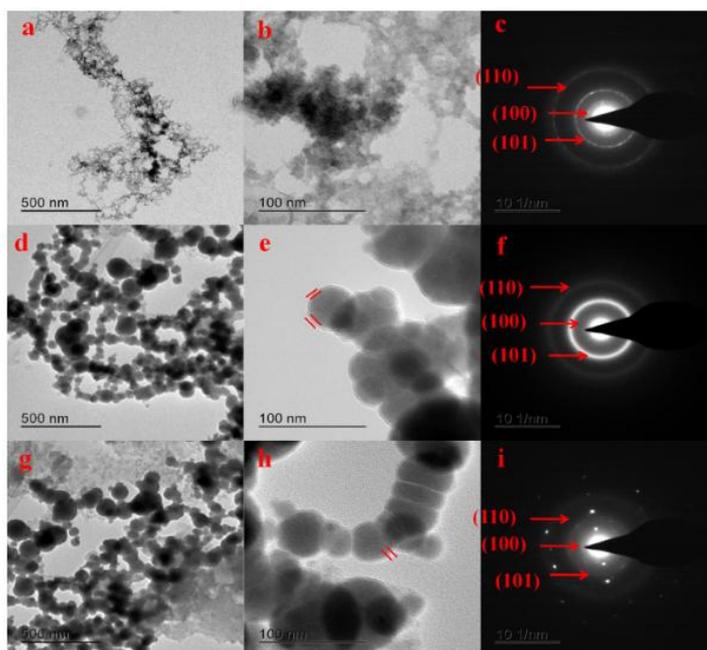
รูปที่ 2.27 ภาพ SEM สัณฐานวิทยาของ ZnO-Gm-E (a) สัณฐานวิทยา (b) ขนาดอนุภาค [35]

จากงานวิจัยของ R. Yuvakkumar และคณะ[24] เรื่องการสังเคราะห์นาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ด้วยวิธีการชีวภาพโดยใช้เปลือกเงาะ บทความวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาการพัฒนาวิธีการใหม่ในการสังเคราะห์นาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) โดยใช้เปลือกเงาะเป็นสารชีวภาพ โดยรูปแบบการสร้างโครงสร้าง ZnO NPs โดยมีสารสกัดจากเปลือกเงาะ ในรูปที่ 2.28 จะแสดงให้เห็นว่า กรดเอลลาจิก กรดแกลลิก และกรดแทนนิก ที่เป็นอนุพันธ์ของฟีนอล ซึ่งจะถูกนำมาใช้เพื่อสร้างสารเชิงซ้อนที่

เสถียรด้วยไอออนของโลหะซิงค์ และไอออนของโลหะอื่น ๆ โดยสารสกัดจากเปลือกเงาะที่ใช้ อาจมี เกิดปฏิกิริยากับซิงค์ไนเตรต เนื่องจากมีวงแหวนพอลิฟีนอลและอาจก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน ของซิงค์-เอลลาเกต และเมื่อนำไปเผาจะเกิดการสลายตัวโดยตรงที่ 450 °C ทำให้เกิดโครงสร้างนาโน ของซิงค์ออกไซด์ขึ้นมา จากภาพ TEM ที่ได้, พบว่า ZnO NPs มีรูปร่าง ทรงกลม และ ทกเหลี่ยม โดยมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 50 ถึง 100 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาคบางส่วนมีการรวมตัวกัน โดยเฉพาะเมื่อเวลา ที่ังไว้เป็นเวลานานขึ้น รูปที่ 2.29 ภาพ TEM ยังแสดงให้เห็นถึงการเกิดโครงสร้าง แบบโซ่หลายมิติ หลังการปล่อยไว้ 4 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการพัฒนาทางรูปร่างของนาโนอนุภาค ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ สามารถยืนยันว่าสารสกัดจากเปลือกเงาะ มีบทบาทสำคัญในการ สร้าง ZnO NPs ซึ่งเห็นได้จาก การยึดเกาะของสารสกัดกับผิวของนาโนอนุภาครูปแบบการกระเจิง ของอิเล็กตรอนจากบริเวณที่เลือก (SAED) แสดงให้เห็นถึงความเป็นผลึกที่สูงของ ZnO NPs โดยมีวง กระเจิงที่ชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับระนาบผลึก (100), (101) และ (110) ของโครงสร้างผลึก ZnO ดังนั้น TEM ช่วยยืนยันขนาด รูปร่าง และลักษณะผลึกของ ZnO NPs รวมทั้งการมีส่วนร่วมของ สาร สกัดจากเปลือกเงาะ ในการสร้างนาโนอนุภาคเหล่านี้



รูปที่ 2.28 กลไกการเกิดอนุภาคนาโน ZnO [24]



รูปที่ 2.29 ภาพ TEM (a–c) 1 วัน, (d–f) 4 วัน, (g–i) 7 วันของ ZnO NPs ของสารสกัดจากเปลือกเงาะ [24]

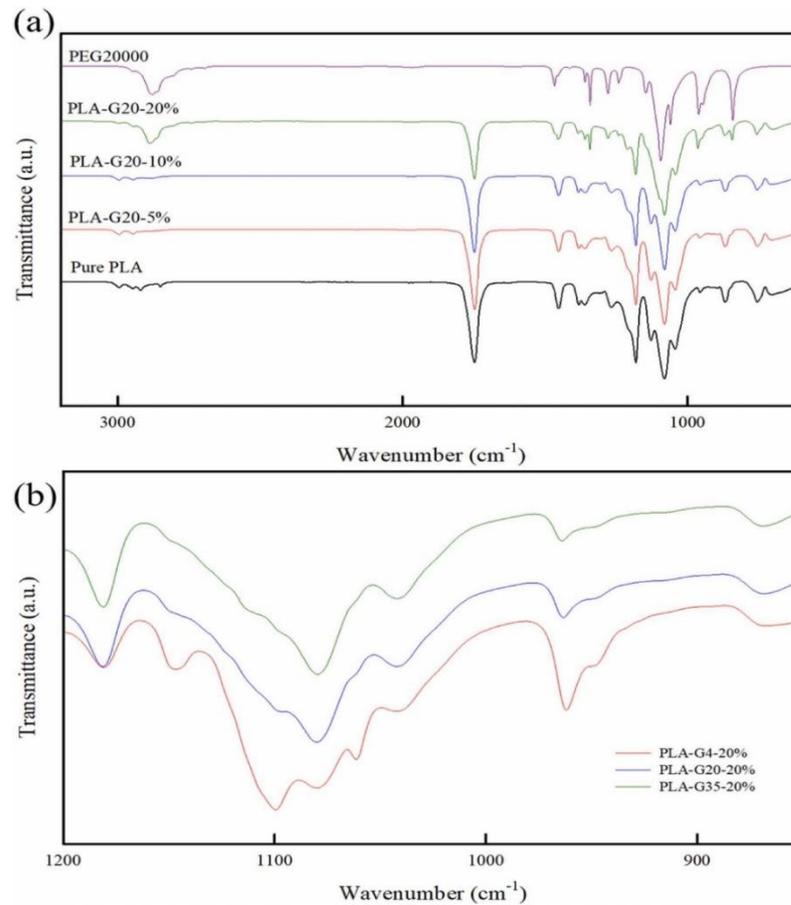
2.6.3. พอลิเมอร์คอมโพสิต

จากงานวิจัยของ Hojun Shin และคณะ[36] การเตรียมและการกำหนดลักษณะเฉพาะของฟิล์มผสม PLA/PEG สำหรับการใช้งานบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมบทความวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยฟิล์มผสม PLA/PEG ผลิตโดยใช้เทคนิคการหลอมผสมแบบไม่ใช้ตัวทำละลายและศึกษาสมบัติของฟิล์มผสมเพื่อประเมินศักยภาพในการใช้งานจริง PLA/PEG จะถูกเตรียมโดยใช้เครื่องอัดรีดสกรูคู่ จากตารางที่ 2.4 จะแสดงให้เห็นถึงการเตรียม PEG จะมีน้ำหนักโมเลกุลที่ 4,000 20,000 และ 35,000 g/mol ซึ่งจะถูกผสมตามร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%) ของ PLA/PEG ที่ 95/5, 90/10 และ 80/20 อุณหภูมิการอัดขึ้นรูปถูกกำหนดไว้ที่ 80 °C สำหรับโซนป้อน, 155 °C สำหรับโซน 1–6 และ 150 °C สำหรับส่วนหัวขึ้นรูปความเร็วของสกรูคือ 120 รอบต่อนาที แรงบิด 5–10 นิวตันเมตร อุณหภูมิของหัวตายชนิดตัว T ถูกตั้งไว้ที่ 150 °C

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของฟิล์มผสม PLA/PEG ที่ MW ต่าง ๆ [36]

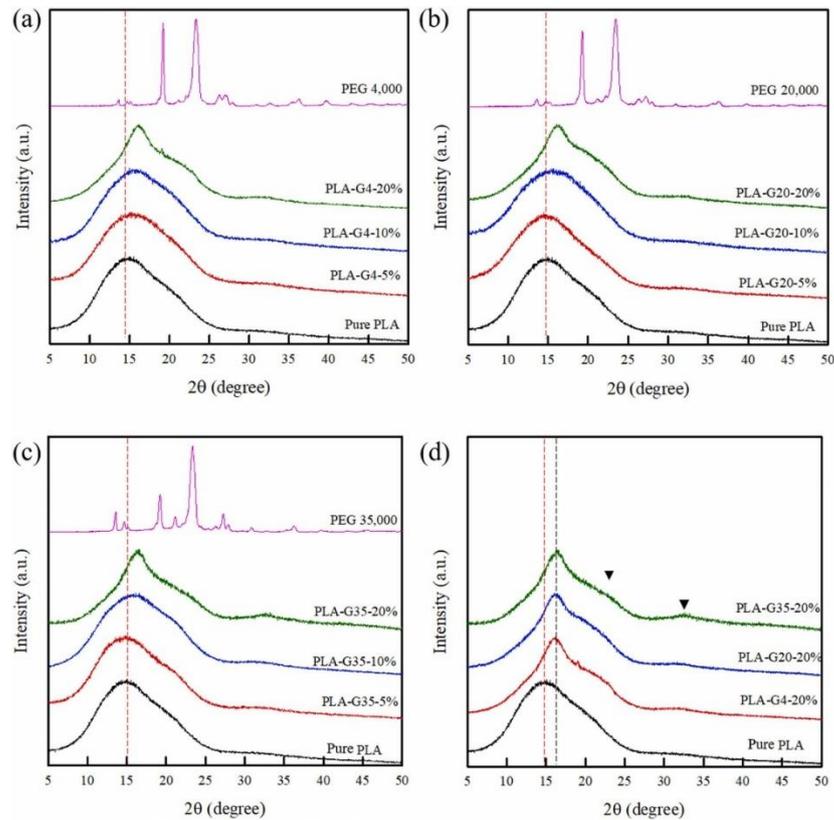
Sample Code	Average MW (M_n) (g/mol)	Composition (wt%)		
		PLA	PEG	Total
Pure PLA	–	100	0	100
PLA-G4-5%	4000	95	5	100
PLA-G4-10 %		90	10	100
PLA-G4-20 %		80	20	100
PLA-G20-5 %	20,000	95	5	100
PLA-G20-10 %		90	10	100
PLA-G20-20 %		80	20	100
PLA-G35-5 %	35,000	95	5	100
PLA-G35-10 %		90	10	100
PLA-G35-20 %		80	20	100

จากผลการทดสอบโครงสร้างทางเคมีและปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของ PLA และ PEG ในฟิล์มผสม PLA/PEG ได้รับการศึกษาผ่านสเปกโทรสโกปี ATR – FTIR ผลของความเข้มข้น PEG และ MW ต่อคุณสมบัติโครงสร้างของฟิล์มผสม PLA/PEG แสดงในรูปที่ 2.30 (a) และ 2.30 (b) ตามลำดับ ยอดพิคของ PLA-G-5 % และ PLA-G-10 % มีพิคที่มีลักษณะเฉพาะคล้ายกับ PLA บริสุทธิ์ รูปที่ 2.30 (a) อย่างไรก็ตาม PLA-G-20 % แสดงจุดสูงสุดที่ $2804 - 2944 \text{ cm}^{-1}$ (–C–H stretching) และ 841 cm^{-1} (–CH₂– rocking) นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงบางอย่างของ PLA-G-20% ที่ $1145-1150 \text{ cm}^{-1}$ (–C–O– stretching), $1,093-1,099 \text{ cm}^{-1}$ (–C–O– stretching), $960-964 \text{ cm}^{-1}$ (–CH₂ rocking), $946-950 \text{ cm}^{-1}$ (C–C rocking) และ $1748-1746 \text{ cm}^{-1}$ (=CO stretching ของ PLA) สิ่งนี้บ่งบอกถึงปฏิกิริยาทางเคมีที่ระหว่าง PLA และ PEG ที่ความเข้มข้น PEG สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงของพันธะคู่ที่จุดสูงสุดของการยืด CO ของ PLA นั้นมีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาระหว่างพันธะคู่กลุ่ม CO ใน PLA และกลุ่ม –OH ใน PEG ผ่านพันธะไฮโดรเจน



รูปที่ 2.30 สเปกตรัม ATR-FT-IR ของ PEG 20000, फिल्म PLA บริสุทธิ์ และฟิล์มผสม PLA/PEG [36]

ทำการวิเคราะห์ XRD เพื่อศึกษาผลของ MW และความเข้มข้นของ PEG ต่อความเป็นผลึกและความหนาแน่นของการอัดตัวของฟิล์มผสม PLA/PEG ในรูปที่ 2.31 ฟิล์ม PLA บริสุทธิ์มีพีคของการเลี้ยวเบนที่กว้าง โดยมีความเข้มสูงสุดที่ $2\theta = 14.9^\circ$ และมีพีคของความเป็นผลึกน้อยกว่า ซึ่งบ่งชี้ถึงโครงสร้างอสัณฐาน ในส่วน PEG ทั้งหมดแสดงที่ 2 พีค ได้แก่ $2\theta = 19.2^\circ$ และ 23.4° และยอดพีคที่เล็กน้อยที่ 2 พีค ได้แก่ $2\theta = 13.6^\circ$ และ $2\theta = 27.3^\circ$ อย่างไรก็ตาม รูปที่ 2.31 (d) แสดงผลของ MW ของ PEG ต่อฟิล์มผสม PLA-G-20 % แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในความเข้มของที่ $2\theta = 14.9^\circ$, $2\theta = 23.4^\circ$ และ 32.7° อาจเป็นผลมาจากการลดลงของ MW ของ PEG ซึ่งขัดขวางการจัดเรียงโซ่โมเลกุล PLA ใหม่เพื่อสร้างเฟสผลึกผ่านพันธะไฮโดรเจน อย่างไรก็ตาม ผลของ PEG MW ต่อโครงสร้างผลึกและสัณฐานวิทยาอาจไม่มีนัยสำคัญในฟิล์มผสม จะเห็นได้ว่าการเติม PEG ลงใน PLA บริสุทธิ์จะเพิ่มส่วนของผลึกในฟิล์มผสม PLA/PEG ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณสมบัติกัน ความร้อน และเชิงกล

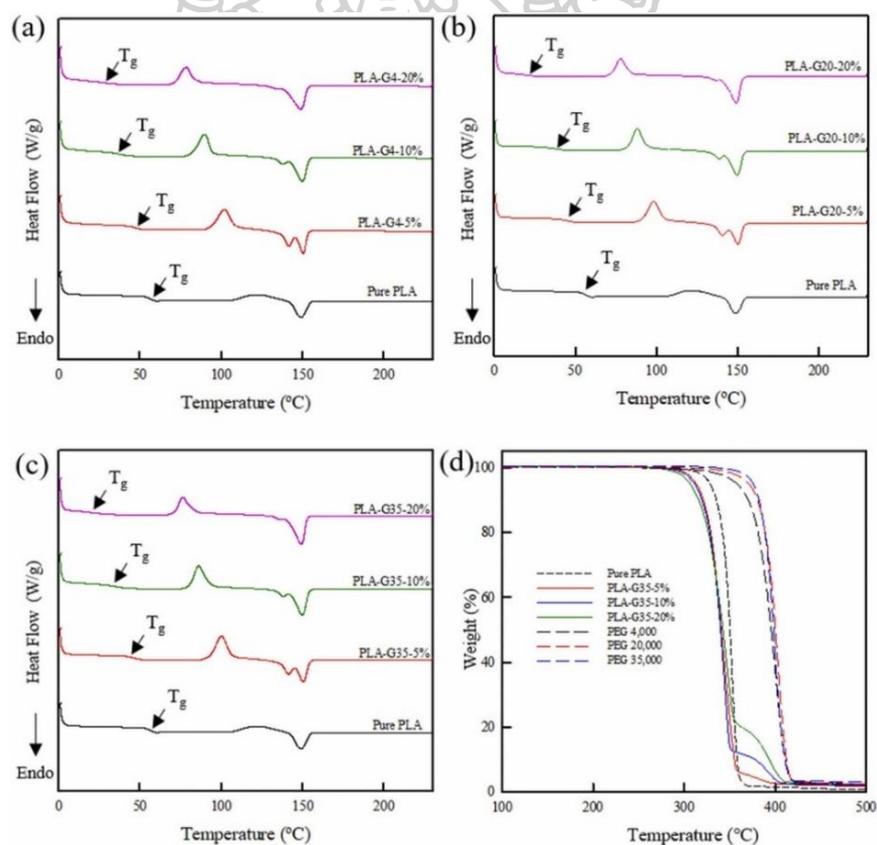


รูปที่ 2.31 รูปแบบ XRD ของ PLA, PEG บริสุทธิ์ที่มี MW ต่างกัน และฟิล์มผสม PLA/PEG [36]

ในส่วนสมบัติทางความร้อนมีการศึกษาผลของ PEG MW และความเข้มข้นต่อสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PLA/PEG ผ่านทาง DSC โดยทั่วไปสมบัติความร้อนของส่วนผสมพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและปฏิกิริยาทางเคมี จากรูปที่ 2.32 (a)–(c) แสดง DSC Thermogram ของฟิล์มผสม PLA/PEG ที่มี PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน และรูปที่ 2.32 (d) แสดง Thermogram ของ PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันและ PLA ทั้งสามที่เป็นฟิล์มผสม PEG ที่มี MW 35,000 กรัม/โมล ซึ่งสมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PLA/PEG แสดงอยู่ในตารางที่ 2.5 ค่า T_g , T_{cc} และ ΔH_{cc} ทั้งหมดของฟิล์มผสม PEG ลดลงเมื่อความเข้มข้นของ PEG เพิ่มขึ้น การลดลงของ T_g มีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่ของสายโซ่ที่เพิ่มขึ้น PLA และ PEG จะแสดงการสลายด้วยความร้อน ในขั้นตอนเดียว ในขณะที่ฟิล์มผสม PLA/PEG ทั้งหมดแสดงรูปแบบการสลายด้วยความร้อนในสองขั้น จากรูปที่ 2.32 (d) ขั้นตอนการย่อยสลายที่ครั้งที่หนึ่งและสองของฟิล์มผสมจะสอดคล้องกับการสลายตัวของ PLA และ PEG ตามลำดับ เมื่อความเข้มข้นและ MW ของ PEG เพิ่มขึ้น อุณหภูมิสำหรับการสลายตัว 10 % โดยน้ำหนัก ($T_{d,10}$) ของ PEG จะมากกว่า PLA

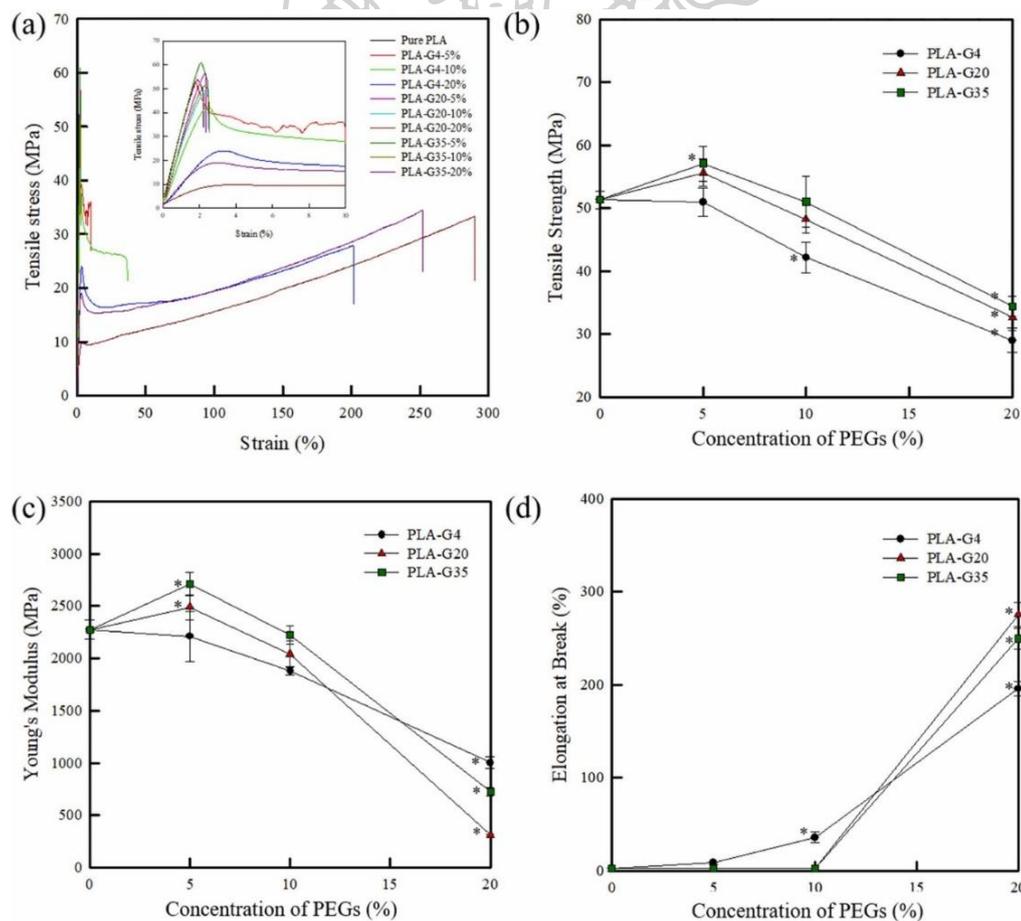
ตารางที่ 2.5 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มผสม PEG, PLA และ PLA/PEG [36]

Sample code	Glass transition temperature (T_g) (°C)	Cold crystalline temperature (T_{cc}) (°C)	Enthalpy of cold crystallization (ΔH_{cc}) (J/g)	Melting temperature (T_m) (°C)	Enthalpy of fusion (ΔH_m) (J/g)	Crystallinity (X_c) (%)	Temperature of 10 % weight loss (T_{d10}) (°C)	Residue at 700 °C (%)
PEG 4000	N.D.	N.D.	N.D.	57.0 ± 0.2	155.2 ± 1.3	–	370.3	1.1
PEG 20,000	N.D.	N.D.	N.D.	63.5 ± 0.6	157.2 ± 3.7	–	380.6	1.0
PEG 35,000	N.D.	N.D.	N.D.	65.6 ± 0.1	156.0 ± 0.1	–	382.1	1.9
Pure PLA	56.9 ± 0.6^a	123.2 ± 0.5^a	14.8 ± 0.3^a	$148.8 \pm 0.2^{a,b,c}$	15.4 ± 0.1^a	0.6	328.9	1.1
PLA-G4-5 %	$47.2 \pm 0.5^{b,c}$	101.5 ± 0.6^b	27.7 ± 0.9^b	$150.1 \pm 0.1^{d,e}$	27.8 ± 0.5^b	0.1	317.6	1.1
PLA-G4-10 %	36.5 ± 0.9^d	88.8 ± 1.4^c	$25.5 \pm 0.4^{b,c}$	$149.5 \pm 0.3^{c,d}$	27.4 ± 1.3^b	2.0	308.0	1.1
PLA-G4-20 %	24.7 ± 1.7^e	77.7 ± 0.9^d	21.7 ± 0.4^d	$148.5 \pm 0.3^{a,b}$	$29.3 \pm 2.6^{b,c}$	8.1	295.3	0.9
PLA-G20-5 %	45.3 ± 1.1^c	99.0 ± 0.9^b	26.4 ± 0.6^b	150.1 ± 0.1^e	$27.6 \pm 0.2^{b,c}$	1.3	321.2	1.6
PLA-G20-10 %	36.2 ± 0.5^f	88.2 ± 0.1^c	27.6 ± 2.4^b	$149.7 \pm 0.1^{b,c,d}$	$28.7 \pm 1.6^{b,c}$	1.2	313.8	1.1
PLA-G20-20 %	18.5 ± 2.5^g	76.6 ± 1.6^d	$23.3 \pm 0.3^{c,d}$	$148.9 \pm 0.3^{b,c}$	27.2 ± 5.0^c	4.2	311.2	1.4
PLA-G35-5 %	46.4 ± 1.0^b	101.1 ± 1.5^f	$28.0 \pm 1.1^{c,d}$	$150.4 \pm 0.2^{c,d}$	$28.9 \pm 0.4^{b,c}$	1.0	320.9	1.4
PLA-G35-10 %	34.2 ± 0.5^f	83.6 ± 0.4^e	27.8 ± 0.1^b	$149.2 \pm 0.5^{b,c,d}$	$29.4 \pm 0.4^{b,c}$	1.7	319.5	1.6
PLA-G35-20 %	19.6 ± 0.3^g	76.2 ± 0.1^d	20.4 ± 1.7^d	148.0 ± 1.4^a	30.6 ± 0.3^c	10.9	315.9	1.5



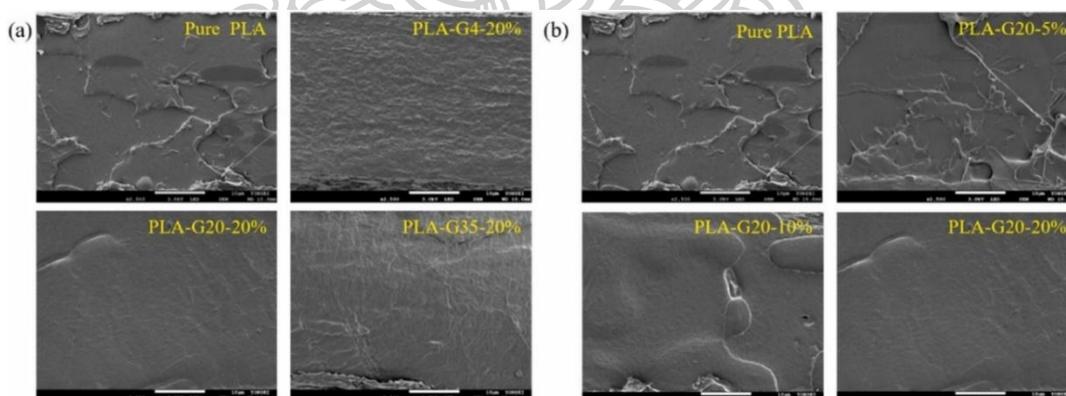
รูปที่ 2.32 (a)–(c) ผลลัพธ์ DSC และ (d) TGA ของฟิล์มผสม PLA/PEG และ PLA บริสุทธิ์ [36]

จากการศึกษาสมบัติทางกลโดยทั่วไปสมบัติแรงดึงของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับแรงระหว่างโมเลกุล และความเป็นขั้ว พบว่าสมบัติแรงดึงของฟิล์มผสม PLA/PEG ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและ MW ของ PEG อย่างมาก จากรูปที่ 2.33 ฟิล์มผสม PLA บริสุทธิ์และ PLA/PEG ที่มี PEG 5 และ 10 % โดยน้ำหนักมีการขาดแบบเปราะ ในขณะที่ฟิล์มผสมที่มี PEG 20 % โดยน้ำหนักมีขาดแบบเหนียวโดยมีค่าการยืดออกที่สูง นอกจากนี้เมื่อผสม PLA เข้ากับ PEG ความเหนียวของฟิล์ม PLA จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้น PEG ที่สูงขึ้นด้วย โดยไม่คำนึงถึง MW ความต้านทานแรงดึงและโมดูลัสยั้งค์ของ PLA บริสุทธิ์ยังคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติม PEG จากนั้นจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของ PEG เพิ่มขึ้น นอกจากนี้รูปที่ 2.33 (d) แสดงให้เห็นว่าฟิล์มผสม PLA/PEG ที่มี PEG 20 % มีการยืดตัวสูงที่สุด สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสม PLA/PEG จะเกี่ยวข้องกับความเป็นผลึกและการมีอยู่ของแรงระหว่างโมเลกุลระหว่าง PLA - PLA, PLA - PEG และ PEG - PEG อย่างไรก็ตามจากความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของ PEG ทำให้แรงระหว่างโมเลกุลระหว่างสายโซ่ PLA อ่อนลง ด้วยเหตุนี้ ฟิล์มผสม PLA/PEG ที่มีความเข้มข้น PEG สูงจึงยืดหยุ่นขึ้น



รูปที่ 2.33 (a) Stress-strain curves, (b) stress in the yield point, (c) Young's modulus, and (d) elongation at break ของฟิล์มผสม PLA และ PLA/PEG [36]

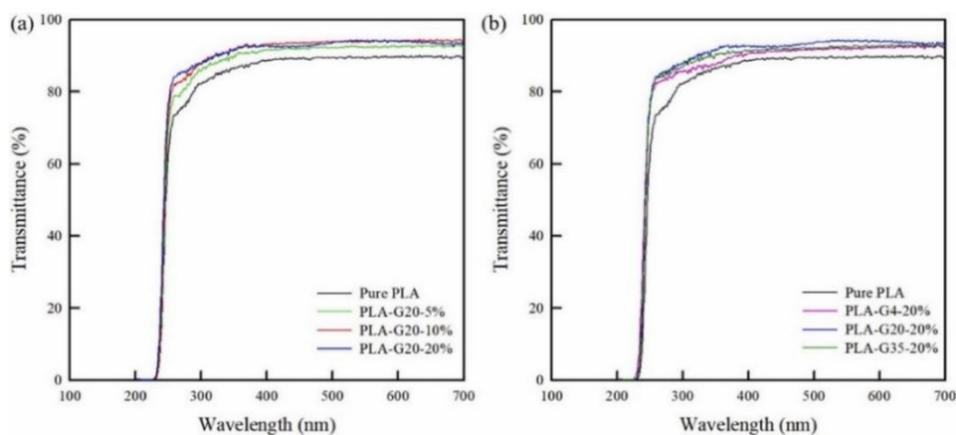
จากการศึกษาสัณฐานวิทยาโดยพื้นผิวที่ขาดจากแรงดึงได้ถูกศึกษาผ่าน Scanning electron microscope เพื่อวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและการขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ ในรูปที่ 2.34 แสดงภาพ SEM ของพื้นผิวแตกหักจากแรงดึงจะบ่งบอกถึงการผสมที่เข้ากันและความไม่เข้ากัน โดยผลของน้ำหนักโมเลกุล PEG และความเข้มข้นต่อฟิล์มผสม PLA/PEG แสดงในรูปที่ 2.34 (a) และ 2.34 (b) ตามลำดับ PLA บริสุทธิ์จะแสดงพื้นผิวเรียบและการเสีรูปของพลาสติกในลักษณะเปราะ ในขณะที่ PLA-G-20 % แสดงพื้นผิวที่หยาบและการเสีรูปของพลาสติกในลักษณะที่มีความเหนียว ในรูปที่ 2.34 (a) ไม่พบความแตกต่างทางสัณฐานวิทยาที่มีนัยสำคัญ ระหว่าง PLA-G20-20 % และ PLA-G35-20 % อย่างไรก็ตาม PLA-G4-20 % แสดงพื้นผิวแตกหักที่หยาบกว่า ซึ่งอาจเนื่องมาจากการขาดของสายโซ่ระหว่างการทดสอบแรงดึงซึ่งเกิดจากผลของความเป็นพลาสติกที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2.34 (b) เมื่อความเข้มข้นของ PEG เพิ่มขึ้น พื้นผิวที่แตกหักของ PLA-G20 ก็มี ความหยาบมากขึ้น นอกจากนี้ PLA-G20-20 % ยังมีลักษณะเหนียวในพื้นที่แตกหักมากกว่า PLA-G20-10 % ซึ่งสอดคล้องกับการยึดตัวที่จุดขาด ดังนั้น PLA-G-20 % จึงแสดงเมทริกซ์ที่สม่ำเสมอ ไม่มีการแยกเฟสที่มองเห็นได้ เช่น รูหรือรอยแตกเนื่องจากการเติม PEG เข้ามาทำให้เกิดการเข้ากันได้ที่เป็นเนื้อเดียวกันของ PLA และ PEG



รูปที่ 2.34 ภาพ SEM ของฟิล์มผสม PLA/PEG ที่มี PEG (a) MWs และ (b) ความเข้มข้นต่างกัน [36]

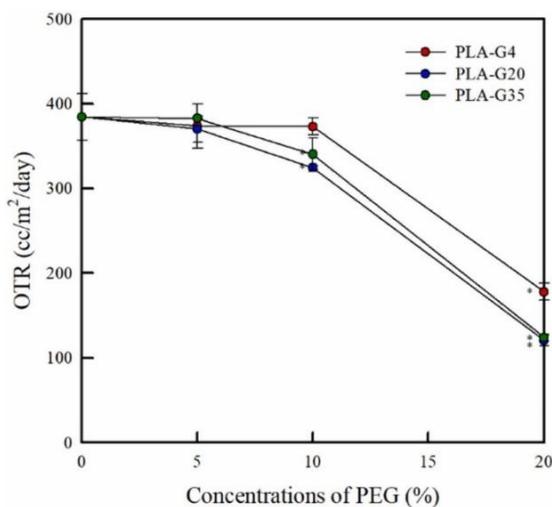
จากการศึกษาสมบัติทางแสง ความโปร่งใสเป็นสิ่งที่ต้องการสำหรับบรรจุภัณฑ์หลักความโปร่งใสของการผสมพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับระดับความเข้ากันได้ของส่วนประกอบทั้งสองและขนาดของผลึก ซึ่งจะแสดงให้เห็น จากการทดสอบสัณฐานวิทยาและปฏิกิริยาทางเคมี จากการศึกษาค่าความโปร่งใสของฟิล์มผสม PLA/PEG ผ่าน UV-vis ในรูปที่ 2.35 แสดงสเปกตรัม UV-Vis ของฟิล์ม PLA และ PLA/PEG เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและความเข้มข้นของ PEG เพิ่มขึ้น ความโปร่งใสก็เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.35 (a) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความโปร่งใสเพิ่มขึ้นจากฟิล์ม PLA บริสุทธิ์ เมื่อเทียบกับ PLA-G20-20 % ที่ 400 นาโนเมตร ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการลดขนาด spherulite ของ PLA จากการเติมเข้ามา PEG ขัดขวางการเติบโตของผลึกในระหว่างการเกิดผลึกของฟิล์มผสม PLA/PEG ทำให้สเฟียรูไรต์ขนาดเล็กช่วยให้แสงผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ได้แม้จะมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น แต่ความโปร่งใสของฟิล์มผสม PLA/PEG ทั้งหมดสูงกว่าฟิล์ม PLA บริสุทธิ์



รูปที่ 2.35 สเปกตรัมยูวีของฟิล์มผสม PLA/PEG ที่มีความเข้มข้น PEG (a) และ (b) MW ต่างกัน[36]

และการศึกษาสมบัติกันออกซิเจนเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้น PEG และ MW ต่อสมบัติกันออกซิเจน จึงมีการศึกษา Oxygen transmission rate ของฟิล์มผสม PLA/PEG โดยทั่วไปสมบัติการซึมผ่านของฟิล์มพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับสัณฐานวิทยา เช่น ความเป็นผลึก ความหนาแน่นของโครงสร้างทางเคมี เป็นต้น นอกจากนี้การซึมผ่านของออกซิเจนเป็นผลมาจากการดูดซับโมเลกุลออกซิเจนลงบนพื้นผิวของฟิล์ม และการแพร่กระจายผ่านเมทริกซ์ของฟิล์ม โดยค่า OTR ของฟิล์มผสมทั้งหมดจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของ PEG เพิ่มขึ้น ซึ่งการลดลงของค่า OTR นั้นมากที่สุดที่ความเข้มข้น PEG สูงสุด (20 wt %) ในรูปที่ 2.36 สาเหตุนี้มาจากการเกิดผลึกของฟิล์มผสม PLA/PEG ตามหลักฐานจากผล XRD โดยการเพิ่ม PEG ที่ยึดหยุ่นและหมู่ไฮดรอกซิลที่ชอบน้ำสองกลุ่มลงใน PLA จะเพิ่มความเป็นผลึกและลดระยะห่างระหว่างโมเลกุลซึ่งบ่งชี้ถึงความหนาแน่นของการจัดตัวที่สูงขึ้นในฟิล์มผสม



รูปที่ 2.36 OTR ของฟิล์มผสม PLA และ PLA/PEG [34]

จากงานวิจัยของ Li Yana และคณะ[37] เรื่องการศึกษาสมบัติทางความร้อนของอนุภาคนาโน ZnO และ Ag-Cu ใน PLA/PEG และบทความวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มนาโนคอมโพสิตพอลิแลกติกแอซิด (PLA composite) เสริมแรงด้วยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และอนุภาคนาโนเงิน-ทองแดง (Ag-Cu) งานวิจัยนี้ได้มีการเตรียมแบบสารละลายโดยจะมีอัตราส่วนของการเตรียมในตารางที่ 2.6 ดังนี้

ตารางที่ 2.6 การเตรียมอัตราส่วนของการเตรียมนาโนคอมโพสิตฟิล์ม [37]

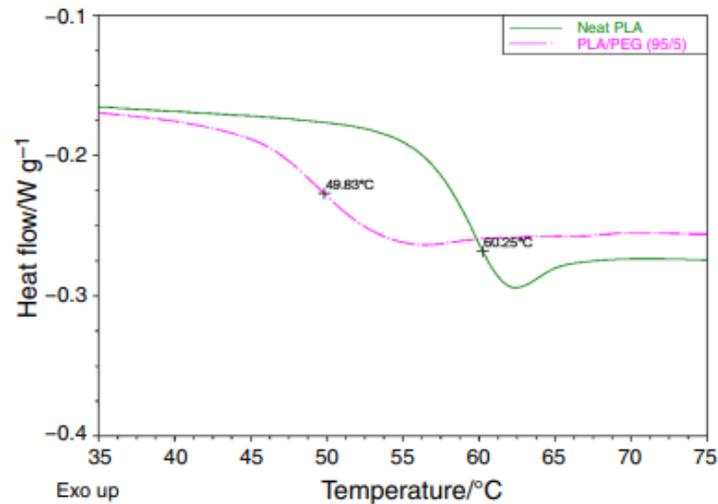
Compositions	Composition
(A) Neat PLA	
PLA	100/0
(B) PLA/PEG blends	
PLA/PEG	95/5
PLA/PEG	90/10
PLA/PEG	85/15
PLA/PEG	80/20
(C) PLA/PEG/ZnO (<50 nm) composite films	
PLA/PEG/ZnO	79.5/20/0.5
PLA/PEG/ZnO	79/20/1
PLA/PEG/ZnO	78/20/2
PLA/PEG/ZnO	76/20/4
(D) PLA/PEG/ZnO (<100 nm) composite films	
PLA/PEG/ZnO	79.5/20/0.5
PLA/PEG/ZnO	79/20/1
PLA/PEG/ZnO	78/20/2
PLA/PEG/ZnO	76/20/4
(E) PLA/PEG/Ag-Cu alloy (<100 nm) composite films	
PLA/PEG/Ag-Cu alloy	79.5/20/0.5
PLA/PEG/Ag-Cu alloy	79/20/1
PLA/PEG/Ag-Cu alloy	78/20/2
PLA/PEG/Ag-Cu alloy	76/20/4

ฟิล์มที่ขึ้นรูปได้ถูกนำไปทดสอบ ความหนาของฟิล์ม สมบัติทางความร้อน และการส่องผ่านแสงของฟิล์มนาโนคอมโพสิต จากผลการทดลองในส่วนของความหนาพบว่าเมื่อทำการเติม PEG ลงไปที่อัตราส่วน 80/20 จะทำให้ฟิล์มมีความหนาที่เพิ่มขึ้นเป็น 0.52 mm หลังจากนั้นทำการใส่ ZnO (50 นาโนเมตร), ZnO (100 นาโนเมตร) และโลหะผสม Ag-Cu (100 นาโนเมตร) ตามลำดับ ความหนาจะเพิ่มเป็น 0.63, 0.69 และ 0.71 ซึ่งความหนาเพิ่มขึ้นนี้อาจจะเกี่ยวข้องกับอนุภาคนาโนที่อาจเกาะติดกับพื้นผิวฟิล์มนาโนคอมโพสิต ในส่วนถัดมาจะเป็นการวิเคราะห์ผลของพลาสติกไซเซออร์และสารตัวเติมต่อความร้อนสมบัติของฟิล์มนาโนคอมโพสิตจากการวิเคราะห์เชิงความร้อน พารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g), อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m), เอนทัลปีการหลอมเหลว (H_m), อุณหภูมิการตกผลึก (T_c), เอนทัลปีของการตกผลึก (H_c) และระดับความเป็นผลึก (% X_c) ที่เกี่ยวข้อง จะแสดงไว้ในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ผลของ ZnO (50 nm และ 100 nm) และ Ag-Cu (100 nm) ต่อสมบัติทางความร้อนของนาโนคอมโพสิตฟิล์ม [37]

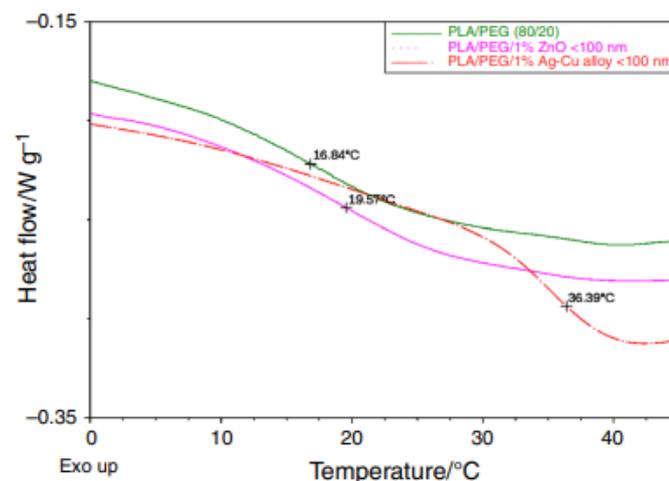
Sample	$T_g/^\circ\text{C}$	$T_m/^\circ\text{C}$	$H_m/\text{J g}^{-1}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$H_c/\text{J g}^{-1}$	$T_m/^\circ\text{C}$	$H_m/\text{J g}^{-1}$	$X_c/\%$, $X_m/\%$
Neat PLA	60.3 ± 0.32	149.1 ± 0.1	9.4 ± 0.3	-	-	-	-	-
PLA:PEG (95:5)	49.8 ± 0.15	147.6 ± 0.06	23.5 ± 0.3	111.1 ± 0.2	22.9 ± 0.14	-	-	0.6 ± 0.04, -
PLA:PEG (90:10)	39.8 ± 0.12	147.2 ± 0.19	25.3 ± 0.06	99.6 ± 0.46	22.5 ± 0.15	-	-	3.0 ± 0.14, -
PLA:PEG (85:15)	30.8 ± 0.45	147.2 ± 0.2	20.7 ± 0.15	89.5 ± 0.31	18.2 ± 0.08	77.8 ± 0.03	2.9 ± 0.21	2.7 ± 0.08, 19.2 ± 1.1
PLA:PEG (80:20)	16.8 ± 0.33	147.5 ± 0.21	22.0 ± 0.22	69.2 ± 0.67	13.0 ± 0.42	75.2 ± 0.32	3.9 ± 0.12	9.6 ± 0.54, 19.5 ± 0.48
PLA (79.5 %) + PEG (20 %) + 0.5 % ZnO (<50 nm)	18.2 ± 0.11	150.0 ± 0.07	30.1 ± 0.24	78.7 ± 0.24	14.7 ± 0.26	79.7 ± 0.45	11.6 ± 0.04	16.5 ± 0.28, 19.9 ± 0.34
PLA (79 %) + PEG (20 %) + 1 % ZnO (<50 nm)	19.8 ± 0.57	150.2 ± 0.1	28.3 ± 0.15	83.4 ± 1.06	14.3 ± 0.4	78.6 ± 0.7	8.4 ± 0.22	15.1 ± 0.05, 21.4 ± 0.22
PLA (78 %) + PEG (20 %) + 2 % ZnO (<50 nm)	17.5 ± 0.28	149.3 ± 0.3	29.2 ± 0.17	77.8 ± 0.44	15.3 ± 0.14	77.1 ± 0.07	8.7 ± 0.23	14.9 ± 0.1, 22.1 ± 0.36
PLA (76 %) + PEG (20 %) + 4 % ZnO (<50 nm)	17.4 ± 0.23	149.9 ± 0.04	30.2 ± 0.23	79.5 ± 0.33	14.8 ± 0.24	79.9 ± 0.75	13.3 ± 0.24	16.6 ± 0.88, 18.1 ± 0.74
PLA (79.5 %) + PEG (20 %) + 0.5 % ZnO (<100 nm)	16.7 ± 0.09	150.1 ± 0.42	28.0 ± 0.15	83.4 ± 0.4	24.2 ± 0.4	75.5 ± 0.16	7.9 ± 0.23	4.1 ± 0.32, 21.6 ± 0.61
PLA (79 %) + PEG (20 %) + 1 % ZnO (<100 nm)	19.6 ± 0.1	150.7 ± 0.18	29.7 ± 0.06	85.1 ± 0.09	13.4 ± 0.52	78.7 ± 0.7	11.8 ± 0.09	17.5 ± 0.81, 19.3 ± 0.14
PLA (78 %) + PEG (20 %) + 2 % ZnO (<100 nm)	19.1 ± 0.26	150.1 ± 0.11	25.8 ± 0.37	84.9 ± 0.35	14.2 ± 0.25	76.9 ± 0.29	9.6 ± 0.09	12.5 ± 1.21, 17.4 ± 0.96
PLA (76 %) + PEG (20 %) + 4 % ZnO (<100 nm)	18.9 ± 0.17	149.6 ± 0.06	28.9 ± 0.2	82.3 ± 0.42	9.3 ± 0.42	80.3 ± 0.23	7.7 ± 0.11	21.1 ± 0.62, 22.8 ± 0.31
PLA (79.5 %) + PEG (20 %) + 0.5 % Ag-Cu alloy (<100 nm)	17.7 ± 0.24	149.2 ± 1.17	26.1 ± 0.19	84.3 ± 0.74	21.8 ± 0.61	75.1 ± 0.16	7.1 ± 0.16	4.6 ± 0.11, 20.4 ± 0.84
PLA (79 %) + PEG (20 %) + 1 % Ag-Cu alloy (<100 nm)	36.4 ± 0.26	149.1 ± 0.15	24.6 ± 0.11	82.4 ± 0.24	16.4 ± 0.05	77.2 ± 0.29	5.7 ± 0.21	8.8 ± 0.18, 20.4 ± 0.94
PLA (78 %) + PEG (20 %) + 2 % Ag-Cu alloy (<100 nm)	35.5 ± 0.31	148.8 ± 0.66	24.2 ± 0.09	79.6 ± 0.17	9.3 ± 0.08	75.9 ± 0.41	8.7 ± 0.1	16.0 ± 0.21, 16.6 ± 0.42
PLA (76 %) + PEG (20 %) + 4 % Ag-Cu alloy (<100 nm)	34.9 ± 0.37	148.7 ± 0.05	24.8 ± 0.14	82.2 ± 0.23	15.7 ± 0.21	76.3 ± 0.23	9.9 ± 0.2	9.8 ± 0.32, 16.1 ± 0.33

โดยผลของ PEG ต่อฟิล์ม PLA จากตารางที่ 2.7 ค่า T_g ของ PLA จะประมาณ 60.3°C หลังจากการเติม PEG จะลดลงเหลือประมาณ 49.8 , 39.8 , 30.8 และ 16.8 °C ตามลำดับการเติม PEG จาก 5-20 %wt โดยค่า T_g ในการผสมผสาน PLA/PEG ลดลงด้วยการเพิ่มขึ้นของปริมาณพลาสติกไซเซออร์ เนื่องจากสายโซ่จะมีความคล่องตัวมากขึ้นทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นส่งผลให้ T_g มีค่าลดลงจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.37



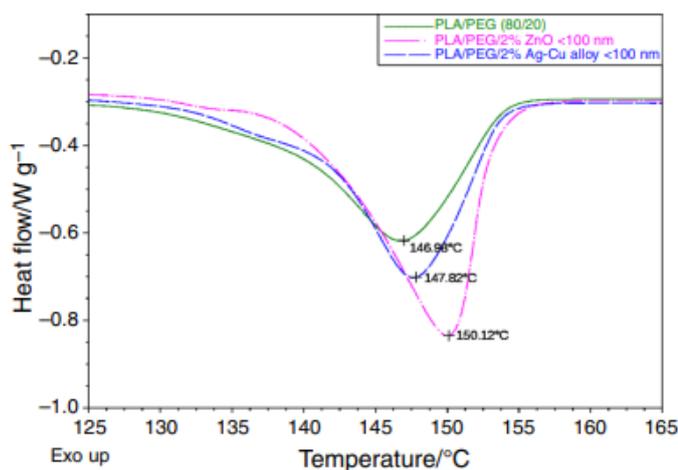
รูปที่ 2.37 ผลของการเติม PEG 5 %wt ต่อค่า T_g ของนาโนคอมโพสิตฟิล์ม [37]

ในส่วนถัดมาจะเป็นผลของอนุภาคนาโนต่อฟิล์มนาโนคอมโพสิตจากการเติมอนุภาคนาโนเข้าไปในฟิล์ม PLA/PEG จากตารางที่ 2.7 และรูปที่ 2.38 จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า T_g ของ PLA/PEG ที่ 80/20 หลังจากทำการเติมอนุภาคนาโนเข้าไปจะทำให้ค่า T_g มีค่าที่เพิ่มขึ้นจากการเติมอนุภาคนาโน ZnO 50 nm และ Ag-Cu ขนาด 100 nm ที่ 1 % wt จะพบว่าค่า T_g จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยค่า T_g ของ Ag-Cu ขนาด 100 นาโนเมตร โดยมีค่าสูงสุดที่ 36.39 เมื่อเปรียบเทียบกับ ZnO 50 nm และ PLA/PEG ที่ 80/20 ตามลำดับ เนื่องจากขนาดของอนุภาคอาจจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ทำให้ค่า T_g จะมีค่าที่เพิ่มขึ้น



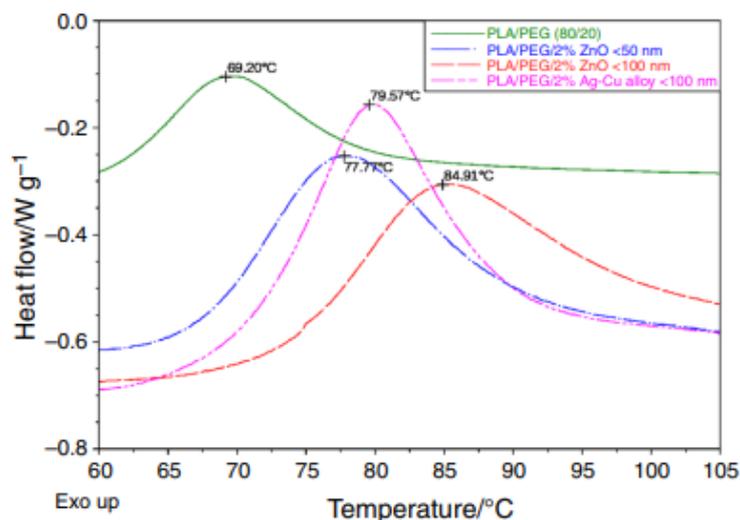
รูปที่ 2.38 ผลของการเติม ZnO (100 nm) และ Ag-Cu (100 nm) ที่ 1 % wt ของอนุภาคนาโนต่อค่า T_g ของนาโนคอมโพสิตฟิล์ม [37]

จากรูปที่ 2.39 อนุภาคต่อ T_m ของ ZnO และ Ag-Cu ที่ขนาด 100 นาโนเมตร ที่ 2 % wt จะแสดงให้เห็นว่าฟิล์มนาโนคอมโพสิตมี T_m ของ Ag-Cu ที่ขนาดอนุภาค 100 nm ซึ่งสูงกว่าเมื่อเทียบกับ ZnO ที่ขนาดอนุภาค 100 nm จะแสดงให้เห็นค่า T_m ที่มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการเติมอนุภาคนาโนเข้าไป แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกันจะพบว่าการเติมอนุภาคนาโนเข้าไปจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง T_m อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 2.39 ผลของการเติม ZnO (100 nm) และ Ag-Cu (100 nm) ที่ 2 % wt ของอนุภาคนาโนต่อค่า T_m ของนาโนคอมโพสิตฟิล์ม [37]

การเติมอนุภาคนาโนลงในส่วนผสมของ PLA/PEG ทำให้เกิดการตกผลึกจากการรวมตัวกันของ ZnO และอนุภาคนาโน Ag-Cu จึงเป็นการปรับปรุง PLA ที่มีความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้น จากตารางที่ 2.7 และรูปที่ 2.40 แสดงให้เห็นถึงค่า T_{cc} ที่เพิ่มขึ้นหลังจากการใส่อนุภาคนาโนลงไป โดยใช้ ZnO อนุภาค 50 และ 100 nm และ Ag-Cu อนุภาค 100 nm ซึ่ง ZnO อนุภาค 100 nm ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสได้ดีกว่า Ag-Cu อนุภาค 100 nm นอกจากนี้ ZnO ขนาดอนุภาค 100 nm จะทำให้คุณสมบัติการตกผลึกของพอลิเมอร์สูงกว่าการเติม ZnO ขนาดอนุภาค 50 nm แล้วการเติมอนุภาค ZnO ขนาด 100 nm สามารถทำหน้าที่ได้ดีขึ้นในการสร้างนิวเคลียสและตกผลึกในฟิล์มนาโนคอมโพสิตที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 nm

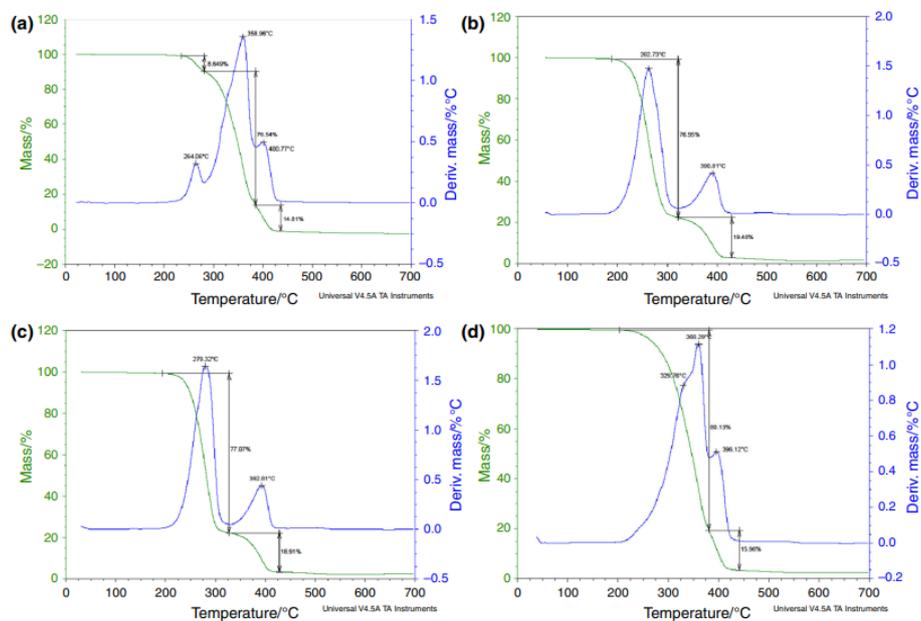


รูปที่ 2.40 ผลของการเติม ZnO (50 และ 100 nm) และ Ag-Cu (100 nm) ที่ 2 % wt ของอนุภาคนาโนต่อค่า T_{cc} ของนาโนคอมโพสิตฟิล์ม [37]

ในส่วนถัดมาจะเป็นในส่วนของการทดสอบ TGA จากรูป 2.41 a) พบว่า PLA/PEG มีการสลายตัวทางความร้อนสามขั้นตอน ในขณะที่ฟิล์มนาโนคอมโพสิต ZnO แสดงสองขั้นตอนการสลายตัวทางความร้อนเท่านั้น นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า PLA/PEG แสดงการสลายตัวทางความร้อนที่สำคัญที่อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน ประมาณ 359 °C จากรูปที่ 2.41 b) และ c) ฟิล์มนาโนคอมโพสิต PLA/PEG/ZnO ที่การเติม ZnO ที่ 2 %wt ขนาดอนุภาค 50 nm และ 100 nm มีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 262 °C และ 272 °C ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมอนุภาค ZnO ที่ 2 %wt ขนาดอนุภาค 50 nm และ 100 nm จะทำให้ความเสถียรทางความร้อนของฟิล์มมีค่าที่ลดลง แต่ในส่วนของฟิล์มนาโนคอมโพสิต PLA/PEG/Ag-Cu ที่การเติม Ag-Cu ที่ 2 % wt ขนาดอนุภาค 100 เพิ่มขึ้นมีความเสถียรทางความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม PLA/PEG และฟิล์มนาโนคอมโพสิต ZnO เนื่องจากอาจเกี่ยวข้องกับความคงตัวทางความร้อนของอนุภาคนาโนและปฏิกิริยาระหว่าง PLA/PEG กับ Ag-Cu และซ้ำแล้วหลังจากการสลายตัวจะเกิดที่อุณหภูมิ 600 °C

ตารางที่ 2.8 การส่องผ่านของ UV ของนาโนคอมโพสิตฟิล์ม [37]

Film sample	$T_{280nm}/\%$	$T_{660nm}/\%$
PLA	60.2 ± 2.2	74.3 ± 0.7
PLA/PEG (95:5)	61.3 ± 2.1	72.5 ± 1.1
PLA/PEG (90:10)	59.2 ± 1.6	71.9 ± 0.4
PLA/PEG (85:15)	53.7 ± 1.4	70.3 ± 1.1
PLA/PEG (80:20)	49.2 ± 0.1	68.5 ± 1.0
PLA/PEG/0.5 % ZnO-50 nm	34.0 ± 1.1	56.9 ± 1.3
PLA/PEG/1 % ZnO-50 nm	24.1 ± 0.1	47.6 ± 0.1
PLA/PEG/2 % ZnO-50 nm	23.2 ± 0.1	43.0 ± 1.6
PLA/PEG/4 % ZnO-50 nm	3.8 ± 0.1	32.3 ± 1.9
PLA/PEG/0.5 % ZnO-100 nm	14.1 ± 1.0	41.2 ± 2.1
PLA/PEG/1 % ZnO-100 nm	8.7 ± 0.1	33.9 ± 3.5
PLA/PEG/2 % ZnO-100 nm	5.7 ± 1.2	28.5 ± 1.2
PLA/PEG/4 % ZnO-100 nm	2.1 ± 0.1	22.4 ± 0.7
PLA/PEG/0.5 % Ag-Cu alloy	27.5 ± 3.2	29.0 ± 1.3
PLA/PEG/1 % Ag-Cu alloy	20.4 ± 2.2	17.1 ± 0.1
PLA/PEG/2 % Ag-Cu alloy	15.8 ± 1.4	12.4 ± 0.1
PLA/PEG/4 % Ag-Cu alloy	7.2 ± 1.2	7.5 ± 1.2



รูปที่ 2.41 ค่าการสลายตัวของ PLA/PEG (a), PLA/PEG/ZnO 2% ขนาด 50 nm (b), PLA/PEG/ZnO 2% ขนาด 100 nm (c) และ PLA/PEG/Ag-Cu alloy 2 % ขนาด 100 nm นาโนคอมโพสิตฟิล์ม (d) [37]

ในส่วนสุดท้ายเป็นการทดสอบการส่องผ่านของแสง UV โดยใช้ความยาวคลื่นในช่วง 280 นาโนเมตร (T_{280}) และ 660 นาโนเมตร (T_{660}) ในการทดสอบฟิล์มผสม จากตารางที่ 2.8 ฟิล์ม PLA มีค่าการส่องผ่านสูงที่ 660 และ 280 นาโนเมตร ถึง 60.2 % และ 74.3 % แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการป้องกันรังสี UV ของฟิล์ม PLA นั้นต่ำ เมื่อทำการผสม PEG จะแสดงให้เห็นถึงการลดลงของการส่องผ่านที่ 660 และ 280 นาโนเมตร และเมื่อทำการเพิ่มอนุภาคนาโนพบว่า ZnO จะช่วยลดการส่องผ่านของความยาวคลื่นที่ 280 นาโนเมตร ได้ดีที่สุด จากการใช้ ZnO ทั้งขนาด 50 และ 100 นาโนเมตร จะพบว่าอนุภาคขนาด 100 นาโนเมตร จะดูดกลืนแสงได้ดีกว่า ขนาด 50 นาโนเมตร เนื่องจากสมบัติของอนุภาค ZnO ที่สามารถดูดกลืนแสงได้เป็นอย่างดี และ Ag-CU จะช่วยลดการส่องผ่านของความยาวคลื่นที่ 660 นาโนเมตร ได้ดีที่สุด ดังนั้นการเติมอนุภาคนาโนจะทำให้ฟิล์มนาโนคอมโพสิตระหว่าง PLA และ PEG ได้รับการปรับปรุงสมบัติในการป้องกันแสง UV อย่างยิ่ง



บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1. กระดาษกรองสาร ความละเอียดเบอร์ 1
- 3.1.2. กระดาษวัด pH meter
- 3.1.3. กระดาษชำระ แบบหยาบ
- 3.1.4. ถุงซีล๊อค ขนาด 7x10 , 20x30 และ 30x35 cm
- 3.1.5. พาราฟิล์ม เอ็ม (Parafilm M) ขนาด 4 นิ้ว
- 3.1.6. สาร KBr lab grade สำหรับ FTIR
- 3.1.7. ถ้วยอะลูมิเนียม (Aluminum Pan) สำหรับทดสอบ TGA และ DSC
- 3.1.8. ถ้วยเผา (Crucible Pan) สำหรับทดสอบ TGA และ DSC
- 3.1.9. อะลูมิเนียมฟอยล์

3.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.2.1. กรรไกร
- 3.2.2. กระจกบอทวง (Cylinder glass) ขนาด 50 และ 100 มิลลิลิตร
- 3.2.3. ขวดกรองสาร (Suction flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 3.2.4. เครื่องกวน (Stirrer/Hot plate stirrer)
- 3.2.5. เครื่องชั่งสารแบบดิจิตอล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3.2.6. ซ้อนตักสาร แบบอลูมิเนียม
- 3.2.7. ชุดบดอัด KBr สำหรับ FTIR
- 3.2.8. ตู้อบสูญญากาศ (Vacuum oven)
- 3.2.9. ถาดสแตนเลส
- 3.2.10. ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50, 100, 250, 500 และ 1000 มิลลิลิตร
- 3.2.11. ปิปेट (Pipette) ขนาด 1, 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร
- 3.2.12. แปรงทองเหลือง
- 3.2.13. แม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar) ขนาด 7x20 และ 8 x 50 มิลลิเมตร
- 3.2.14. ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) แบบดิจิตอล
- 3.2.15. เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) แบบดิจิตอล

3.2.16. หลอดปั่นเหวี่ยง (Centrifuge tube) ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.2.17. อ่างให้ความร้อน (Water bath)

3.3. วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1. ใบฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculate* leaves) จากจังหวัดอุทัยธานี ประเทศไทย

3.3.2. เปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana* peels) จากจังหวัดจันทบุรี ประเทศไทย

3.3.3. Polylactic acid (PLA)

ชื่อทางการค้า : Ingeo™ Biopolymer

ผู้ผลิต : NatureWork® LLC

เกรด : 4043D

Density : 1.24 g/cm³

MFI : 6 g/10 min (ณ อุณหภูมิ 190 °C load cell 2.16 kg)

Melting point : 145-160 °C

3.3.4. Polyethylene glycol 6000 (PEG 6000)

ชื่อทางการค้า : Polyethylene Glycol 6000 Lab KA-5720

ผู้ผลิต : KemAus Chemicals

เกรด : Lab grade

Density : 1.20 g/cm³

M.W. : 5000-7000 g/mol

Melting point : 58-65 °C

ลักษณะ : เกล็ดผงสีขาว

3.3.5. Zinc acetate dihydrate

ชื่อทางการค้า : Zinc Acetate Dihydrate, AR Grade (500 g)

ผู้ผลิต : QReC™

เกรด : Analytical/AR grade

Purity : ≥ 98.0%

Density : 1.753g/cm³

M.W. : 219.49 g/mol

ลักษณะ : ผงสีขาว

3.3.6. Gallic Acid

ชื่อทางการค้า : Gallic Acid ACS, ExiPlus, Multi-Compendial, 98%

ผู้ผลิต : SRL Chem

เกรด : ExiPlus, ACS, Multi-Compendial, 98%

Purity : $\geq 98.0\%$

Density : 1.69 g/cm^3

M.W. : 188.14 g/mol

ลักษณะ : ผงสีขาวครีม

3.3.7. Folin & Ciocalteu's Phenol Reagent

ชื่อทางการค้า : Folin & Ciocalteu's Phenol Reagent / FCP Reagent AR

ผู้ผลิต : SRL Chem

เกรด : AR (Analytical Reagent)

Density : $1.24\text{--}1.27 \text{ g/mL}$

3.3.8. 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl radical (DPPH)

ชื่อทางการค้า : DPPH free radical reagent D9132

ผู้ผลิต : Sigma-Aldrich

Purity : $\geq 90\text{--}95\%$

Density : $1.24\text{--}1.27 \text{ g/mL}$

M.W. : 394.32 g/mol

3.3.9. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)

ชื่อทางการค้า : Caustic soda

ผู้ผลิต : Fisher Scientific

เกรด : Pellet/Beads (Lab grade)

Purity : $\geq 98\%$

Density : 2.13 g/cm^3

M.W. : 219.49 g/mol

ลักษณะ : เม็ดสีขาว

3.4. เครื่องมือที่ใช้การวิเคราะห์

- 3.4.1. เครื่อง UV-VIS (Ultraviolet -visible spectrophotometer) ที่ 200–600 nm รุ่น UV-3600iPlus บริษัท Shimadzu จากประเทศญี่ปุ่น
- 3.4.2. เครื่อง FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy) ที่ 4000–400 cm^{-1} รุ่น VERTEX70 บริษัท Bruker จากประเทศเยอรมัน
- 3.4.3. เครื่อง Melt flow indexer (MFI) ที่อุณหภูมิ 190 °C รุ่น Gottfert บริษัท Werkstoff-Prüfmaschinen จำกัด ประเทศเยอรมัน
- 3.4.4. เครื่อง Differential Scanning calorimeter (DSC) ที่อุณหภูมิ -50–200 °C อัตราการให้ความร้อน 5 °C /min รุ่น DSC 1 Auto sample Robot ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.4.5. เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ที่อุณหภูมิ 30–800 °C อัตราการให้ความร้อน 5 °C /min รุ่น TGA/DSC 1 Auto sample Robot ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 3.4.6. เครื่อง X-ray diffraction (XRD) รุ่น XRD 6100 ผลิตบริษัท Shimadzu Corporation จากประเทศญี่ปุ่น
- 3.4.7. เครื่อง DLS (Dynamic light scattering) รุ่น Malvern/Zetasizer Nano ZS บริษัท Malvern Panalytical จากประเทศอังกฤษ
- 3.4.8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, FE-SEM/EDS ยี่ห้อ TESCAN รุ่น Mira3 บริษัท Ceitecnano research infrastructure จากประเทศสาธารณรัฐเช็ก
- 3.4.9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น Tabletop Microscope TM3030 บริษัท Hitachi-High-Technologies Corporation จากประเทศญี่ปุ่น
- 3.4.10. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม Shimadzu tensile testing film ที่ 5 kN อัตราเร็ว 5 mm/min รุ่น AGX-V,5 kn ผลิตบริษัท Shimadzu Corporation ประเทศญี่ปุ่น
- 3.4.11. กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลแบบ USB รุ่น Digimicro profi ผลิตโดยบริษัท DNT Technologies ประเทศเยอรมัน

3.5. เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูป

3.5.1. เครื่อง Twin-screw extruder รุ่น SHJ-25 บริษัทเอ็นแมชจำกัด จากประเทศจีน

3.5.2. เครื่อง Cast film extruder รุ่น LABCR-150 จากบริษัท Labtech Engineering

3.6. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งวิธีการดำเนินงานออกเป็น 2 ตอน คือ การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยใช้สารสกัดจากสมุนไพร และการศึกษาฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ดังนี้

3.6.1. การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยใช้สารสกัดจากสมุนไพร

งานวิจัยฉบับนี้ ในตอนที่ 1 ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การศึกษาการสกัดจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจรหรือเปลือกมังคุด เพื่อใช้เป็นสารรีดิวซ์ (Reducing agent) ในกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโน และ ส่วนที่ 2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) โดยใช้สารสกัดสมุนไพรที่ได้จากส่วนแรก ทั้งหมดแสดงในตารางที่ 3.1 และ รูปที่ 3.1–3.2 พร้อมรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 การสกัดสารสกัดจากสมุนไพรใบฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculata leaves*) หรือเปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana peels*) ที่อัตราส่วนสมุนไพร บดผง 5, 10 และ 15 กรัม น้ำหนักแห้งต่อสารละลายเอทานอลและน้ำ 100 มิลลิลิตร

Plants	Extract ratio	
	95 % Ethanol (%v/v)	H ₂ O (%v/v)
ใบฟ้าทะลายโจร (<i>Andrographis paniculata leaves</i>)	100.00	0.00
	75.00	25.00
	50.00	50.00
	25.00	75.00
	0.00	100.00
เปลือกมังคุด (<i>Garcinia mangostana peels</i>)	100.00	0.00
	75.00	25.00
	50.00	50.00
	25.00	75.00
	0.00	100.00

3.6.1.1. การศึกษาการสกัดจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจรหรือเปลือกมังคุด

แสดงดังตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การเตรียมสารสกัดจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculata* leaves) หรือ เปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana* peels)

- ล้างพืชสมุนไพรด้วยน้ำ เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและฝุ่น
- นำพืชที่ล้างแล้วมาอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จนแห้งสนิททำการบดเป็นผงให้ละเอียด เพื่อเตรียมนำไปใช้งานในการสังเคราะห์
- เตรียมผงพืชสมุนไพร 5, 10 และ 15 กรัม ลงในบีกเกอร์ เดิมตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตร
- ทำการกวนด้วยแม่เหล็กอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ 70 °C
- ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น และทำการกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1
- นำสารสกัดที่ได้เก็บไว้ในตู้เย็น เพื่อใช้ในการสังเคราะห์

2. การศึกษาเอกลักษณ์ของสารสกัดจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculata* leaves) หรือ เปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana* peels)

แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยมีรายละเอียดดังนี้

การศึกษาสมบัติทางเคมีของสารสกัดสมุนไพร

- การศึกษาวิเคราะห์การดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารสกัดจากสมุนไพรด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (UV-VIS) ที่ความยาวคลื่น 200–800 nm
- การศึกษาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของสารสกัดจากสมุนไพรด้วยเครื่อง Fourier-transform infrared spectrophotometer (FTIR) ที่ 4000–400 cm^{-1}

การศึกษาปริมาณฟีนอลลิค และการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดสมุนไพร

- การศึกษาวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลลิคของสารสกัดสมุนไพร Total phenolic contents (TPC) ด้วยเทคนิค Folin method ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (UV-VIS) ที่ความยาวคลื่น 760 nm
- การศึกษาวิเคราะห์การต้านอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลลิคด้วยเทคนิค DPPH test ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (UV-VIS) ที่ความยาวคลื่น 515 nm

3.6.1.2. การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสมุนไพรใบฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculata leaves*) หรือ เปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana peels*)

1. การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสมุนไพร

แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดดังนี้

- นำสารสกัดพืช 100 มิลลิลิตร ที่เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม ทำการผสมกับซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต 2 กรัม มาผสมกัน ในบีเกอร์และกวน อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- ทำการปรับ pH เป็น 12 โดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลาร์ แบบหยด 15 มิลลิลิตร และกวนอย่างต่อเนื่อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 70 °C
- จะได้ตะกอนสีขาวซีด ตะกอนจะถูกแยกออก โดยการปั่นเหวี่ยงที่ 5,000 รอบต่อนาที ที่ 25 °C เป็นเวลา 20 นาที
- หลังจากทิ้งสารละลายส่วนเหนือตะกอนแล้ว ตะกอนจะถูกล้างด้วยน้ำ 3 ครั้ง จากนั้นนำตะกอนไปอบลมร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 80 °C จะได้สารประกอบเชิงซ้อนของซิงค์ (Zinc-complex)
- นำไปเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงจะได้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

2. การศึกษาเอกลักษณ์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดสมุนไพรใบฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculata* leaves) หรือ เปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana* peels)

แสดงดังรูปที่ 3.3 โดยมีรายละเอียดดังนี้

การศึกษสมบัติทางเคมีของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดสมุนไพร

- การศึกษาการดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (UV-VIS) ที่ความยาวคลื่น 200 – 800 nm
- การศึกษาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วยเครื่อง Fourier-transform infrared spectrophotometer (FTIR) ที่ 4000 – 400 cm^{-1}

การศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดสมุนไพร

- การศึกษาขนาดอนุภาคและการกระจายตัวในสารของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วยเครื่อง Dynamic light scattering (DLS) จากโหมด Particle size ที่ใช้น้ำเป็นตัวกลาง
- การศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) วามีลักษณะของพีคที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์สอดคล้องกับโครงสร้างของนาโนซิงค์ออกไซด์ การทดสอบใช้ Copper radiation $K\alpha$ (ความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม) ใช้ 20-80 องศา อัตราเร็ว 5 mm/min
- การศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ที่พลังงาน 5 kV กำลังขยาย 20,00x และ 50,000x โหมด SE ซึ่งตัวอย่างจะถูกเคลือบด้วยธาตุ Au ก่อนนำไปทดสอบ
- การศึกษาองค์ประกอบธาตุของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วยเครื่อง Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) ใช้พลังงาน 0.260 keV

- การศึกษาสัณฐานวิทยาภายในของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ด้วยเครื่อง Transmission electron microscope (TEM) รุ่น JEM-2100 Plus บริษัท JEOL Corporation จากประเทศญี่ปุ่น

การศึกษาการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดสมุนไพร

- การศึกษาการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ด้วยวิธี Disc diffusion method จากแบคทีเรียแกรมบวก (G+) *Staphylococcus aureus* และแบคทีเรียแกรมลบ (G-) *Escherichia coli* ทดสอบ ณ อุณหภูมิห้อง เวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐานการทดสอบ NCCLS ใช้น้ำเป็นตัวกลาง ที่เพิ่มความกระจ่ายตัว และทำการวัดโซนต้านเชื้อ (Zone of Inhibition Test) ตามมาตรฐาน ASTM E2180 ทั้งหมด 3 รอบแล้วจดบันทึก

3.6.2. การศึกษาฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

ในงานวิจัยในตอนที่ 2 นี้จะเป็น การศึกษาฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ที่ส่งผลต่อดัชนีการไหล สมบัติทางเคมี สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สัณฐานวิทยา และการต้านเชื้อจุลินทรีย์แสดง ดังตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.4, 3.5 และ 3.6 มีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

Sample	PLA content (%wt)	PEG content (%wt)	ZnO NPs APL (%wt)	ZnO NPs GMP (%wt)
Neat PLA	100.00	-	-	-
PLA/PEG 96:4	96.00	4.00	-	-
PLA/PEG 92:8	92.00	8.00	-	-
PLA/PEG 90:10	90.00	10.00	-	-
PLA/PEG 88:12	88.00	12.00	-	-
PLA/PEG 84:16	84.00	16.00	-	-
PLA/PEG 80:20	80.00	20.00	-	-
*PLA/PEG/ZnO NPs APL (79:20:1)	79.00	20.00	1.00	-
*PLA/PEG/ZnO NPs APL (78:19:3)	78.00	19.00	3.00	-
*PLA/PEG/ZnO NPs APL (76:19:5)	76.00	19.00	5.00	-
*PLA/PEG/ZnO NPs GMP (79:20:1)	79.00	20.00	-	1.00
*PLA/PEG/ZnO NPs GMP (78:19:3)	78.00	19.00	-	3.00
*PLA/PEG/ZnO NPs GMP (76:19:5)	76.00	19.00	-	5.00

***หมายเหตุ: *Andrographis paniculata* leaves (APL) และ *Garcinia mangostana* peels (GMP) เป็นส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียม ZnO NPs ในสูตรการทดลองนี้ เครื่องหมาย “ * ” หมายถึงการใช้ Master Batch สำหรับการเตรียมตัวอย่างขั้นต้นถัดไป

1. การเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

- อบเม็ดพอลิเมอร์ PLA /PEG/ZnO NPs ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
- ทำการเตรียม PLA/PEG ที่ 100:0, 96:4, 92:8, 90:10, 88:12, 84:16 และ 80:20 %wt ตามลำดับ
- ทำการเตรียม PLA/PEG/ZnO NPs โดยการเติม ZnO NPs ที่ 1, 3 และ 5 %wt มีปริมาณ 79.20/19.8 /1, 77.60/19.4 /3 และ 76.00/19.00 /5 %wt ตามลำดับมาทำการผสมเข้าด้วยกันในถุงซิปล็อค
- จากการเตรียมเม็ดทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมทั้ง 13 สูตร (สูตรละ 1000 กรัม)
 - สูตรที่ 1 Neat PLA 100 %wt
 - สูตรที่ 2 PLA/PEG 96:4 %wt
 - สูตรที่ 3 PLA/PEG 92:8 %wt
 - สูตรที่ 4 PLA/PEG 90:10 %wt
 - สูตรที่ 5 PLA/PEG 88:12 %wt
 - สูตรที่ 6 PLA/PEG 84:16 %wt
 - สูตรที่ 7 PLA/PEG 80:20 %wt
 - สูตรที่ 8 PLA/PEG/ZnO NPs APL อัตราส่วนผสม 79.20/19.8/1 %wt
 - สูตรที่ 9 PLA/PEG/ZnO NPs APL อัตราส่วนผสม 77.60/19.4/3 %wt
 - สูตรที่ 10 PLA/PEG/ZnO NPs APL อัตราส่วนผสม 76.00/19.00/5 %wt
 - สูตรที่ 11 PLA/PEG/ZnO NPs GMP อัตราส่วนผสม 79.20/19.8/1 %wt
 - สูตรที่ 12 PLA/PEG/ZnO NPs GMP อัตราส่วนผสม 77.60/19.4/3 %wt
 - สูตรที่ 13 PLA/PEG/ZnO NPs GMP อัตราส่วนผสม 76.00/19.00/5 %wt

2. การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ด้วยเครื่อง Twin-screw extruder

แสดงดังตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.4 โดยมีรายละเอียดดังนี้

- นำตัวอย่างที่เตรียมไว้มาผสมกันด้วยเครื่อง Twin-screw extruder โดยใช้ Temperature profile ดังนี้ 140/140/150/150/150/155/155/160 °C และความเร็วรอบสกรู 50 rpm

- เส้นพลาสติก (Extrudate) ที่ได้จะทำให้เย็นด้วยน้ำในลูกกลิ้งแรก จากนั้นจะทำให้แห้งด้วยการเป่าลม แล้วตัดเป็นเม็ดพลาสติก (Pellet) ด้วยเครื่องตัดเม็ด (Pellet cutting machine)
- จากการขึ้นรูปจะทำให้ได้เม็ดพอลิเมอร์ผสมทั้ง 13 สูตร (สูตรละ 800 กรัม)
 - สูตรที่ 1 Neat PLA 100 %wt
 - สูตรที่ 2 PLA/PEG 96:4 %wt
 - สูตรที่ 3 PLA/PEG 92:8 %wt
 - สูตรที่ 4 PLA/PEG 90:10 %wt
 - สูตรที่ 5 PLA/PEG 88:12 %wt
 - สูตรที่ 6 PLA/PEG 84:16 %wt
 - สูตรที่ 7 PLA/PEG 80:20 %wt
 - สูตรที่ 8 PLA/PEG/ZnO NPs APL ใช้อัตราส่วนผสม 79.20/19.8/1 %wt
(นำไปใช้เป็น Master batch ในกระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม)
 - สูตรที่ 9 PLA/PEG/ZnO NPs APL อัตราส่วนผสม 77.60/19.4/3 %wt
(นำไปใช้เป็น Master batch ในกระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม)
 - สูตรที่ 10 PLA/PEG/ZnO NPs APL ใช้อัตราส่วนผสม 76.00/19.00/5 %wt
(นำไปใช้เป็น Master batch ในกระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม)
 - สูตรที่ 11 PLA/PEG/ZnO NPs GMP ใช้อัตราส่วนผสม 79.20/19.8/1 %wt
(นำไปใช้เป็น Master batch ในกระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม)
 - สูตรที่ 12 PLA/PEG/ZnO NPs GMP ใช้อัตราส่วนผสม 77.60/19.4/3 %wt
(นำไปใช้เป็น Master batch ในกระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม)
 - สูตรที่ 13 PLA/PEG/ZnO NPs GMP ใช้อัตราส่วนผสม 76.00/19.00/5 %wt
(นำไปใช้เป็น Master batch ในกระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม)

การศึกษาดัชนีการไหลของเม็ดพอลิเมอร์ผสม

- นำไปทำการทดสอบ Melt flow index ก่อนทำการขึ้นรูปเพื่อศึกษาดัชนีการไหลด้วยเครื่อง Melt flow indexer (MFI) ตามมาตรฐาน ASTM D1238 ใช้ load cell ขนาด 2.16 kg และอุณหภูมิในการทดสอบ 190 °C

3. การเตรียม Masterbatch สำหรับการขึ้นฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสม พอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ด้วยเครื่อง Cast film extruder แสดงดังตารางที่ 3.3 และรูปที่ 3.5 โดยมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนที่ทำการ Master batch สำหรับการขึ้นฟิล์มพอลิเมอร์พอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอลและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์

Sample	Neat PLA (%wt)	Master Batch (%wt)	PLA ที่มาจก Master Batch (%wt)	PEG ที่มาจก Master Batch (%wt)	PLA total (%wt)	น้ำหนัก PLA+PEG (%wt)	ZnO NPs (%wt)	น้ำหนัก รวม (%wt)
89.5/10/0.5	50.00	50.00	39.50	10.0	89.50	99.50	0.50	100.00
89/9.5/1.5	50.00	50.00	39.00	9.50	89.00	98.50	1.52	100.00
88/9.5/2.5	50.00	50.00	38.00	9.50	88.00	97.50	2.56	100.10

- นำเม็ด PLA/PEG/ZnO NPs ที่อัตราส่วน 79.2/19.8/1 , 77.6/19.4/3 และ 76/19/5 %wt ตามลำดับ มาทำเป็น Masterbatch โดยนำมาผสมกับ Neat PLA ที่อัตราส่วน 1:1 %wt ในถุงซิปล็อค จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วย Cast film extruder เพื่อให้ง่ายต่อการขึ้นรูปและเพิ่มการกระจายตัวของ ZnO NPs จากใบฟ้าทะลายโจรและเปลือกมังคุดมากขึ้น
- จากการเตรียมทำให้ได้พอลิเมอร์ผสม 6 สูตร (สูตรละ 1000 กรัม)
- สูตรที่ 1 PLA/PEG/ZnO NPs APL อัตราส่วนผสม 89.5/10/0.5 %wt
- สูตรที่ 2 PLA/PEG/ZnO NPs APL อัตราส่วนผสม 89/9.5/1.5 %wt
- สูตรที่ 3 PLA/PEG/ZnO NPs APL อัตราส่วนผสม 88/9.5/2.5 %wt
- สูตรที่ 4 PLA/PEG/ZnO NPs GMP อัตราส่วนผสม 89.5/10/0.5 %wt
- สูตรที่ 5 PLA/PEG/ZnO NPs GMP อัตราส่วนผสม 89/9.5/1.5 %wt
- สูตรที่ 6 PLA/PEG/ZnO NPs GMP อัตราส่วนผสม 88/9.5/2.5 %wt
- จากนั้นนำไปทำการขึ้นรูป ด้วยเครื่อง Cast film extruder

4. การขึ้นรูปฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีน ไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ด้วยเครื่อง Cast film extruder

โดยมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.6

- นำเม็ดพอลิเมอร์ PLA/PEG ที่อัตราส่วน 100:0, 96:4, 92:8, 90:10, 88:12, 84:16, 80:20 %wt และ PLA/PEG/ZnO NPs ที่อัตราส่วน 89.5/10/0.5, 89/9.5/1.5, 88/9.5/2.5 %wt ที่มีน้ำหนักรวม 500 กรัม ไปทำการขึ้นรูปโดยใช้เครื่อง Cast film extruder ตามลำดับ โดยใช้ Temperature profile ดังนี้ 140/160/170/180/170/170 °C ใช้ความดัน 40 psi และความเร็วรอบสกรู 60 rpm
- จะได้ฟิล์มผสมทั้งหมด 13 สูตร (สูตรละ 500 กรัม)
 - สูตรที่ 1 Neat PLA film 100 wt%
 - สูตรที่ 2 PLA/PEG film 96:4 %wt
 - สูตรที่ 3 PLA/PEG film 92:8 %wt
 - สูตรที่ 4 PLA/PEG film 90:10 %wt
 - สูตรที่ 5 PLA/PEG film 88:12 %wt
 - สูตรที่ 6 PLA/PEG film 84:16 %wt
 - สูตรที่ 7 PLA/PEG film 80:20 %wt
 - สูตรที่ 8 PLA/PEG/ZnO NPs APL film 89.5/10/0.5 %wt
 - สูตรที่ 9 PLA/PEG/ZnO NPs APL film 89/9.5/1.5 %wt
 - สูตรที่ 10 PLA/PEG/ZnO NPs APL film 88/9.5/2.5 %wt
 - สูตรที่ 11 PLA/PEG/ZnO NPs GMP film 89.5/10/0.5 %wt
 - สูตรที่ 12 PLA/PEG/ZnO NPs GMP film 89/9.5/1.5 %wt
 - สูตรที่ 13 PLA/PEG/ZnO NPs GMP film 88/9.5/2.5 %wt
- ทำการวัดความหนาของฟิล์มอย่างน้อย 3 ครั้ง โดยใช้เกจวัดความหนาและจดบันทึก

5. การศึกษาเอกลักษณ์ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

แสดงดังรูปที่ 3.7 โดยมีรายละเอียดดังนี้

การศึกษาดัชนีการไหลของฟิล์ม

- การศึกษาดัชนีการไหลของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ด้วยเครื่อง
Melt flow indexer (MFI) ตามมาตรฐาน ASTM D1238 ใช้ load cell ขนาด 2.16 kg
และอุณหภูมิในการทดสอบ 190°C

การศึกษาสมบัติทางเคมีของฟิล์ม

- การศึกษาการส่องผ่านแสงอัลตราไวโอเล็ตของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพ
อลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)
ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (UV-VIS) ที่ความยาวคลื่น 200–800 nm
- การศึกษาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแล
กติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)
ด้วยเครื่อง Fourier-transform infrared spectrophotometer (FTIR) ที่ 4000–400
cm⁻¹
- การศึกษาสมบัติการบวมตัว (Swelling test) ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์
ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์
(ZnO NPs) โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D570 ใช้น้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ณ
อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยทำการทดลองสุตรละ 3 ตัวอย่าง
- การศึกษาวิเคราะห์สมบัติการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบ
พอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซ
ิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM E96 ใช้น้ำกลั่น 500 ml โดยจะ
ได้ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ประมาณ 99 %RH ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 7 วัน โดยทำการ
ทดลองสุตรละ 3 ตัวอย่าง
- การทดสอบวิเคราะห์สมบัติความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ (Contact angle test) ของฟิล์ม
วัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG)

และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D7334 ใช้น้ำกลั่น 1 หยดประมาณ 50 ไมโครลิตร ณ อุณหภูมิห้อง ทำการจับเวลา 3 นาที โดยทำการทดลองสุตรละ 3 ตัวอย่าง

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม

- การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนและการสลายตัวทางความร้อนฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิ 30 - 800°C อัตราการให้ความร้อน 5°C /min
- การศึกษาสมบัติทางความร้อนและการหาปริมาณผลึกของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิ -50- 200°C อัตราการให้ความร้อน 3 °C /min โหมด Heat-Cool-Heat เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม

การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม

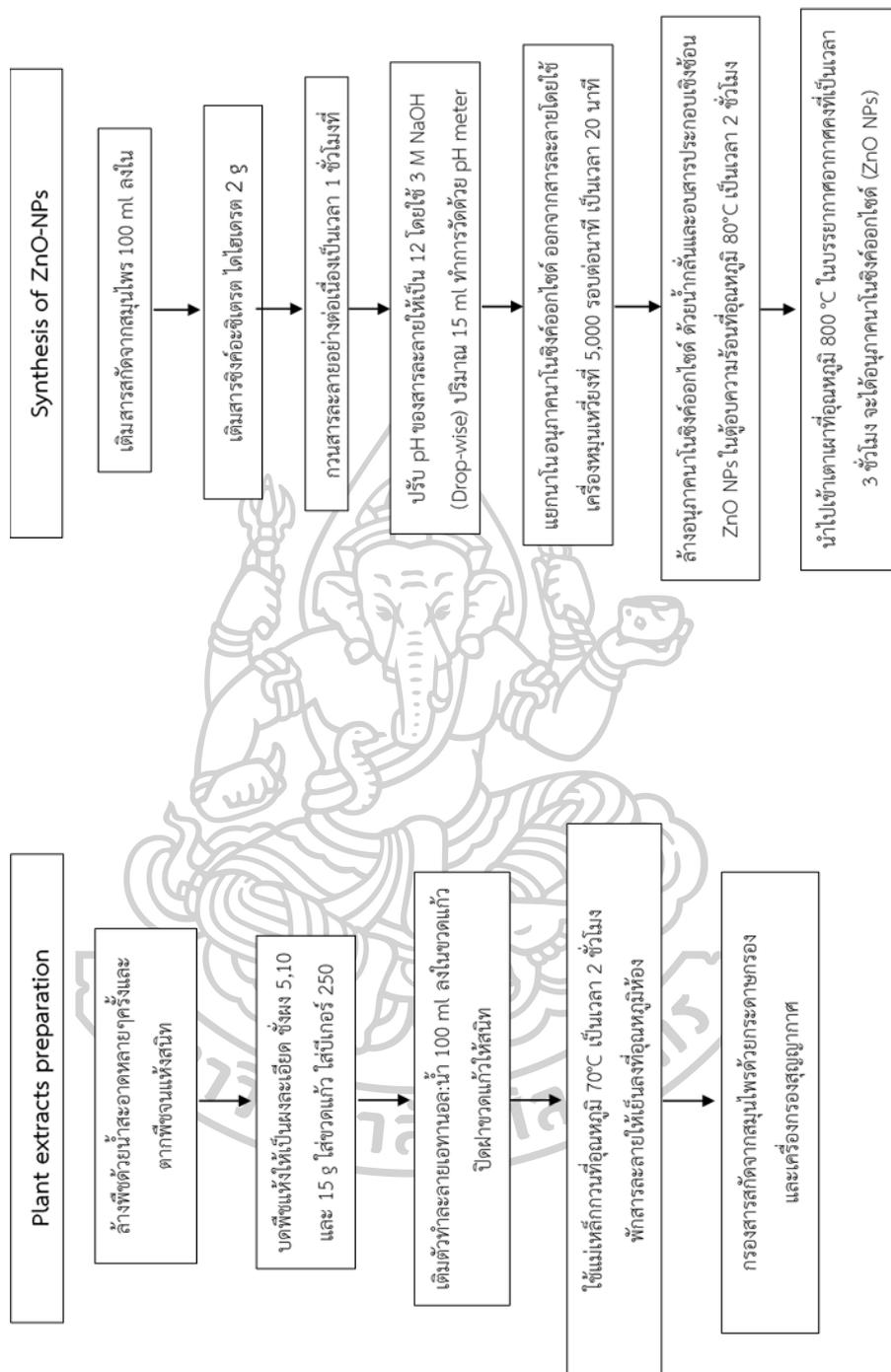
- การศึกษาการดัดงอของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ด้วยเครื่อง Shimadzu testing film ตามมาตรฐาน ASTM D882 ใช้load cell ขนาด 5 kN อัตราเร็วการดัดงอ 5 mm/min โดยทำการทดลองสุตรละ 10 ตัวอย่าง
- การศึกษาความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ด้วยเครื่อง Shimadzu testing film ตามมาตรฐาน ASTM D1938 อัตราเร็วการดัดงอ 100 mm/min ทดสอบทั้งแนว Machine Direction (MD) และ Transverse direction (TD) โดยทำการทดลองสุตรละ 10 ตัวอย่าง

การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม

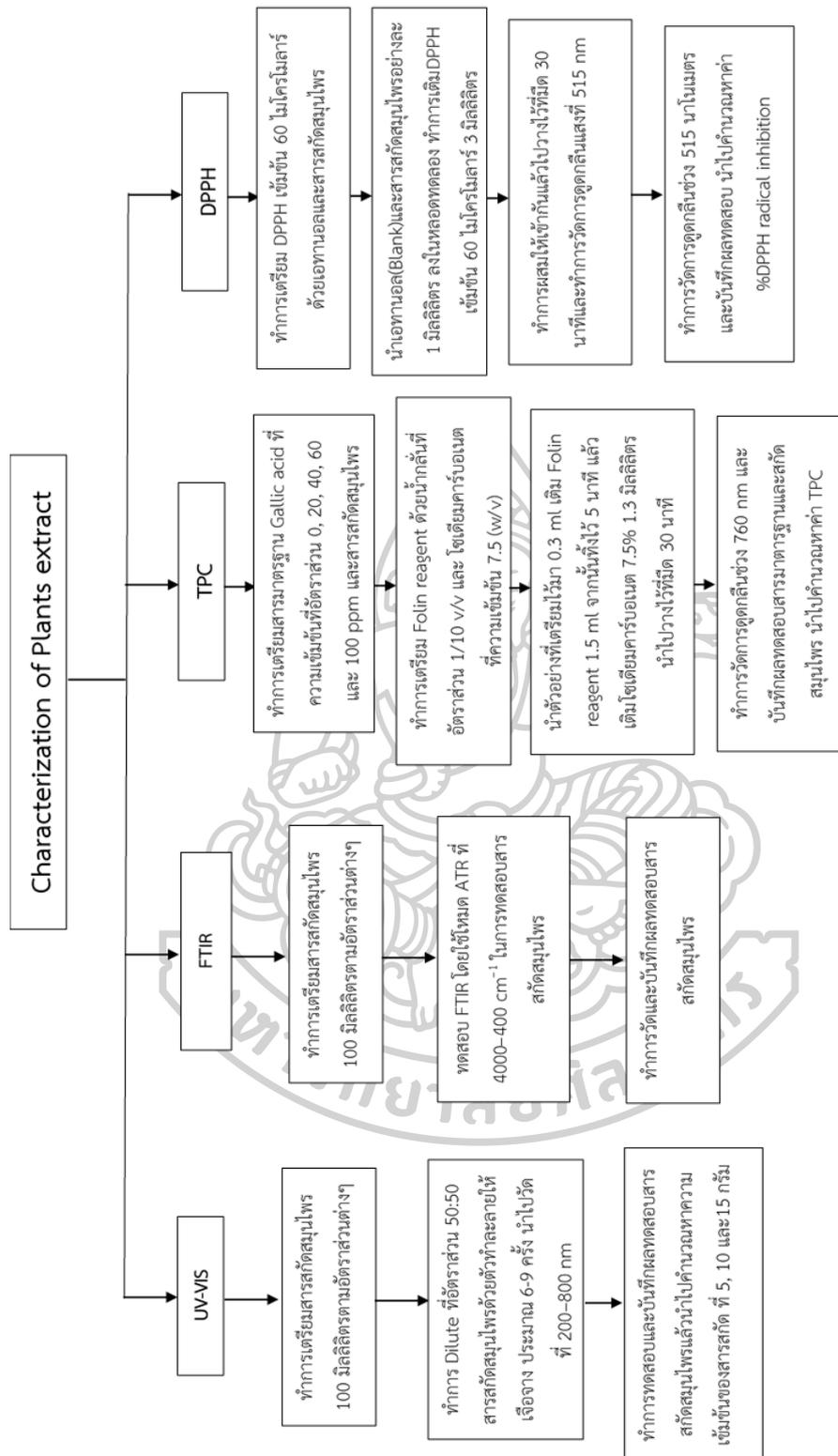
- การศึกษาสีและความแตกต่างของสีของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ด้วยเครื่อง Color meter
- การศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) โดยสภาวะในการทดสอบใช้ Copper radiation $K\alpha$ (ความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม) ใช้ 10-80 องศา อัตราเร็ว 5 mm/min
- การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) ที่มีพื้นผิวแตกหักของชิ้นงาน ที่ผ่านการทดสอบสมบัติการดึงยึด ใช้พลัง 15 kV กำลังขยาย 500X ,1000X และ 1500X

การทดสอบการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของฟิล์ม

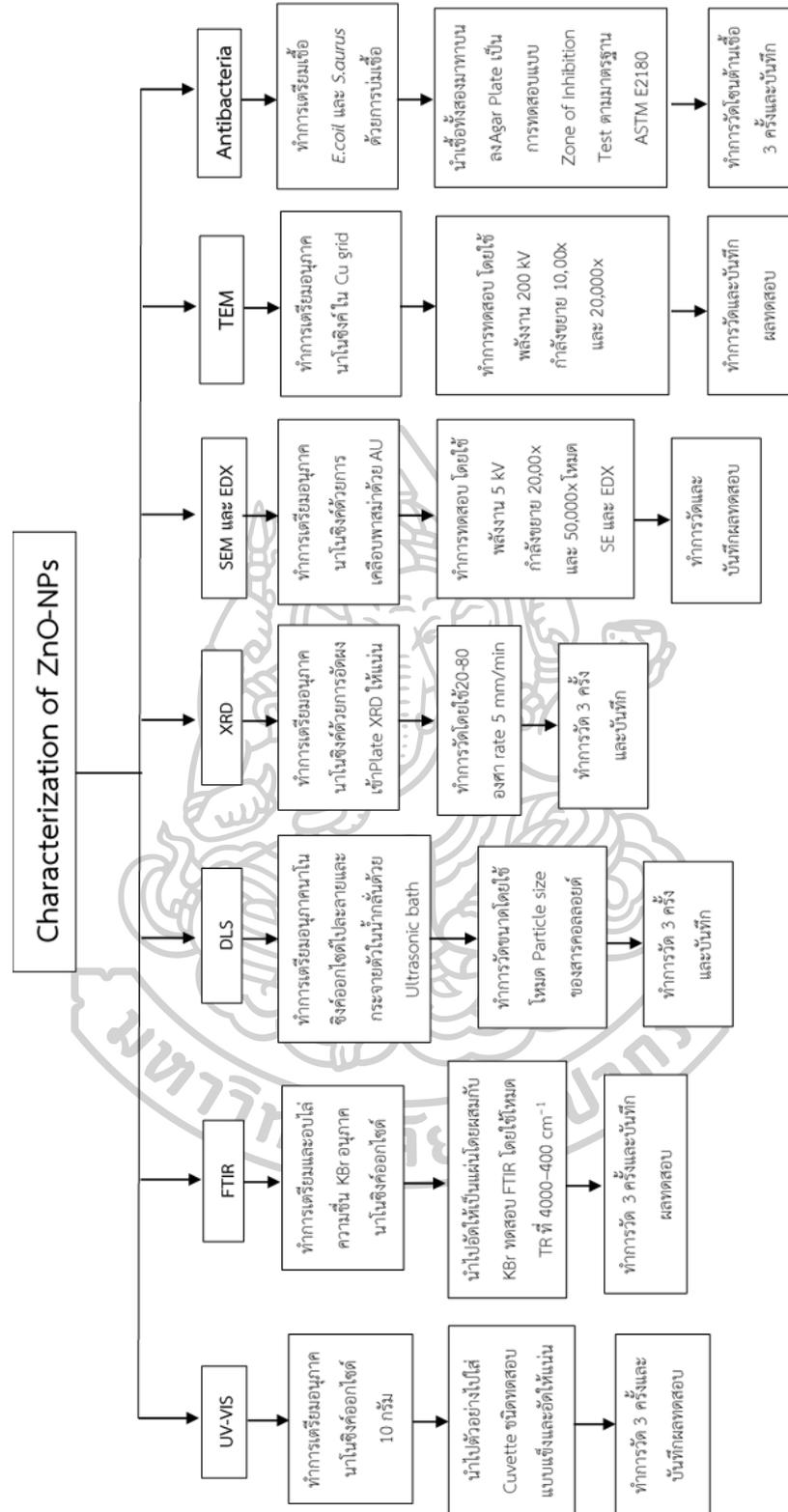
- การทดสอบการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ด้วยวิธี Disc diffusion method จากแบคทีเรียแกรมบวก (G+) *Staphylococcus aureus* และแบคทีเรียแกรมลบ (G-) *Escherichia coli* ทดสอบ ณ อุณหภูมิห้อง เวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐานการทดสอบ NCCLS ตัวอย่างขนาด 6 มิลลิเมตร การทดสอบแบบ Zone of Inhibition Test ตามมาตรฐาน ASTM E2180



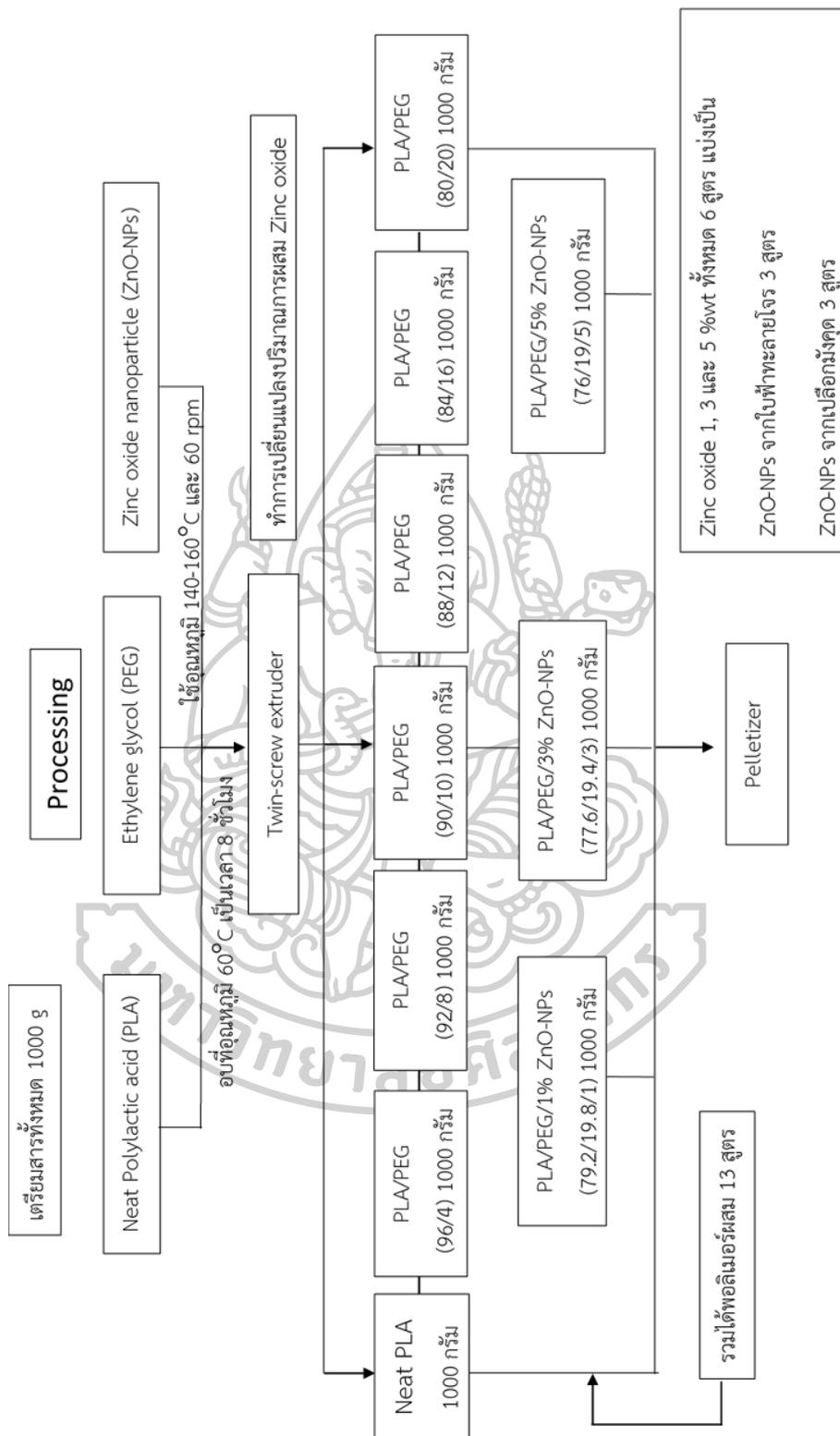
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการสกัดสมุนไพรมและสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยใช้สารสกัดจากสมุนไพรม



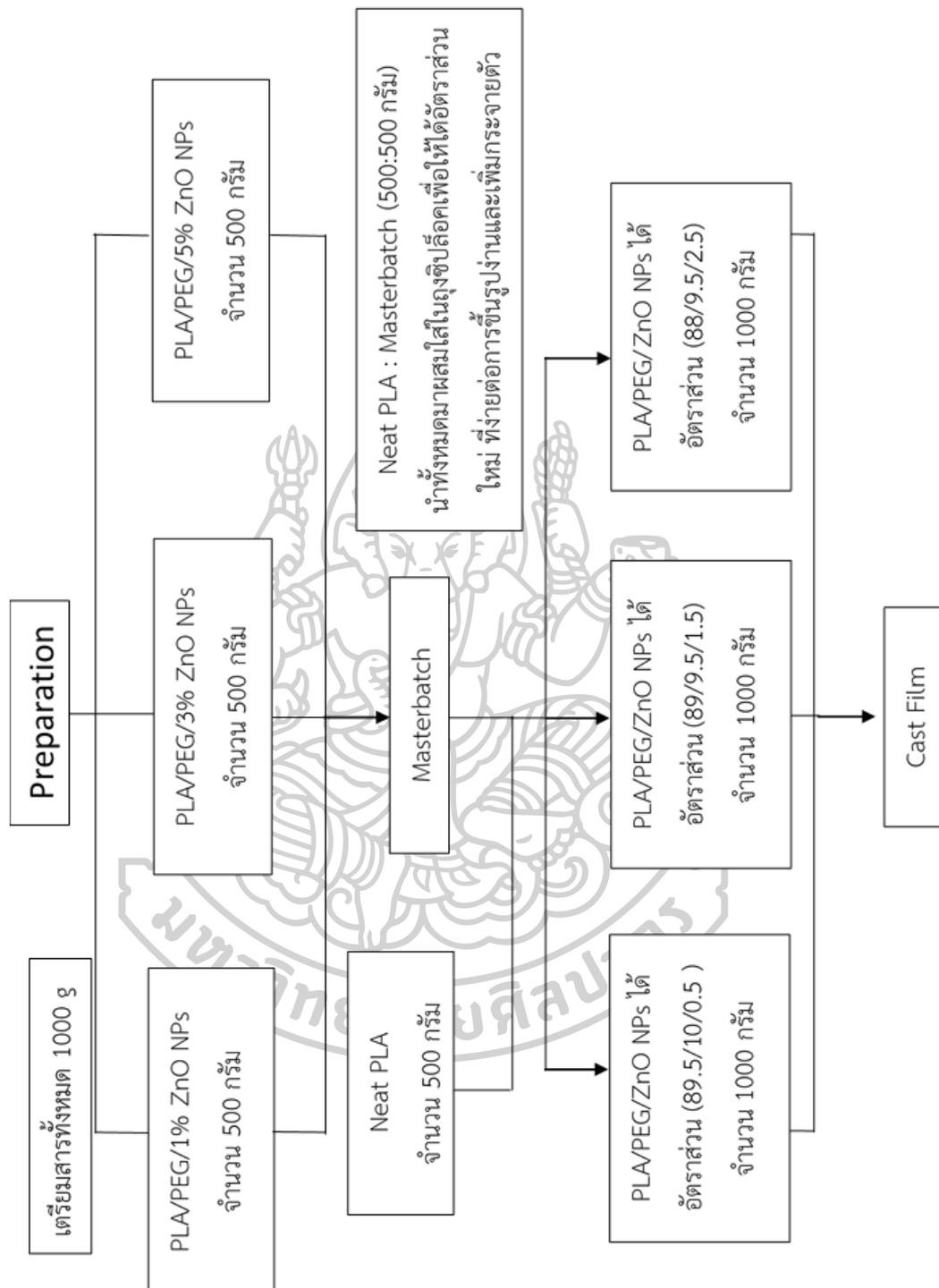
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษาเอกลักษณ์ของสารสกัดสมุนไพร



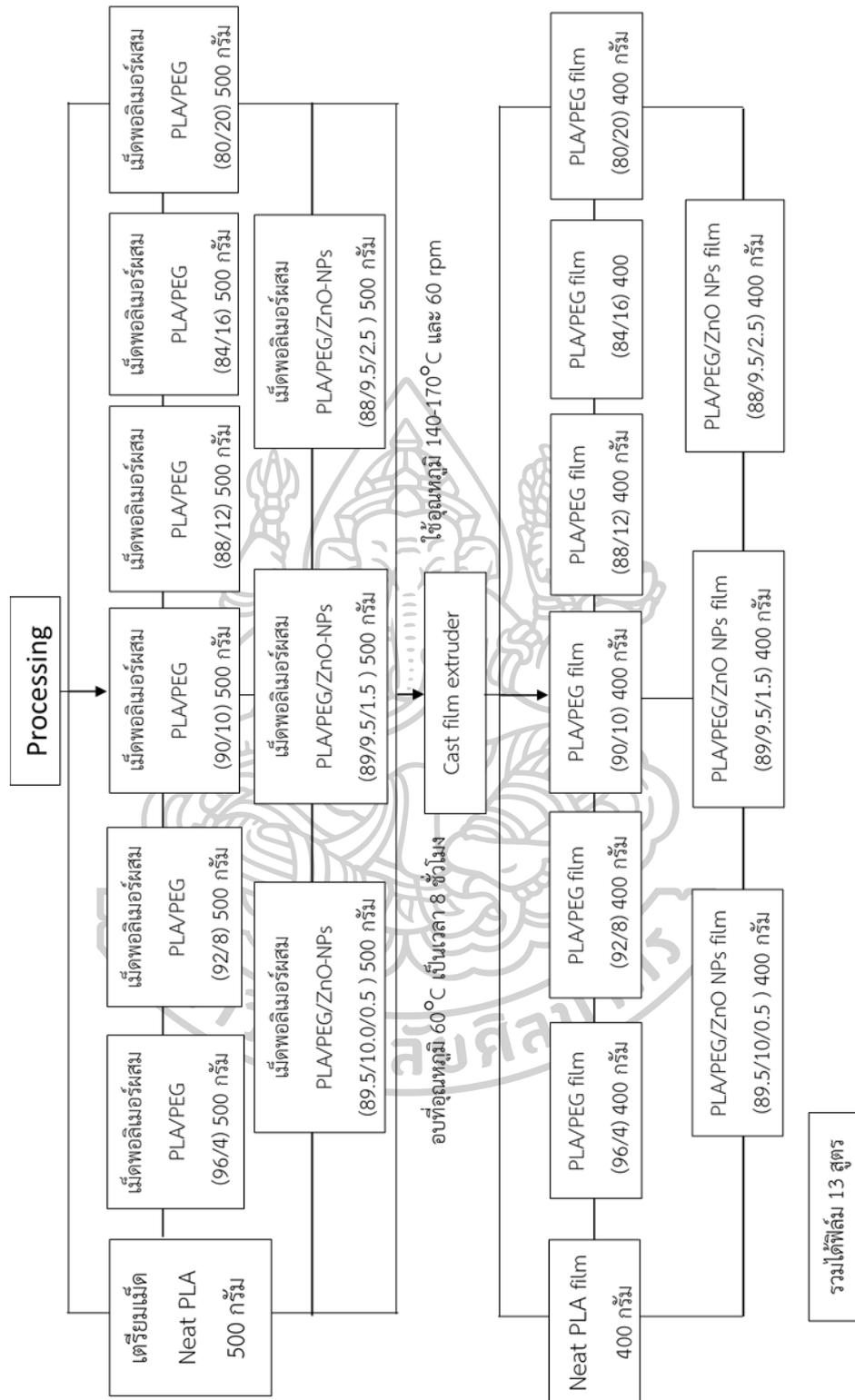
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการศึกษาเอกลักษณ์ของอนุภาคนาโนสังเคราะห์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร



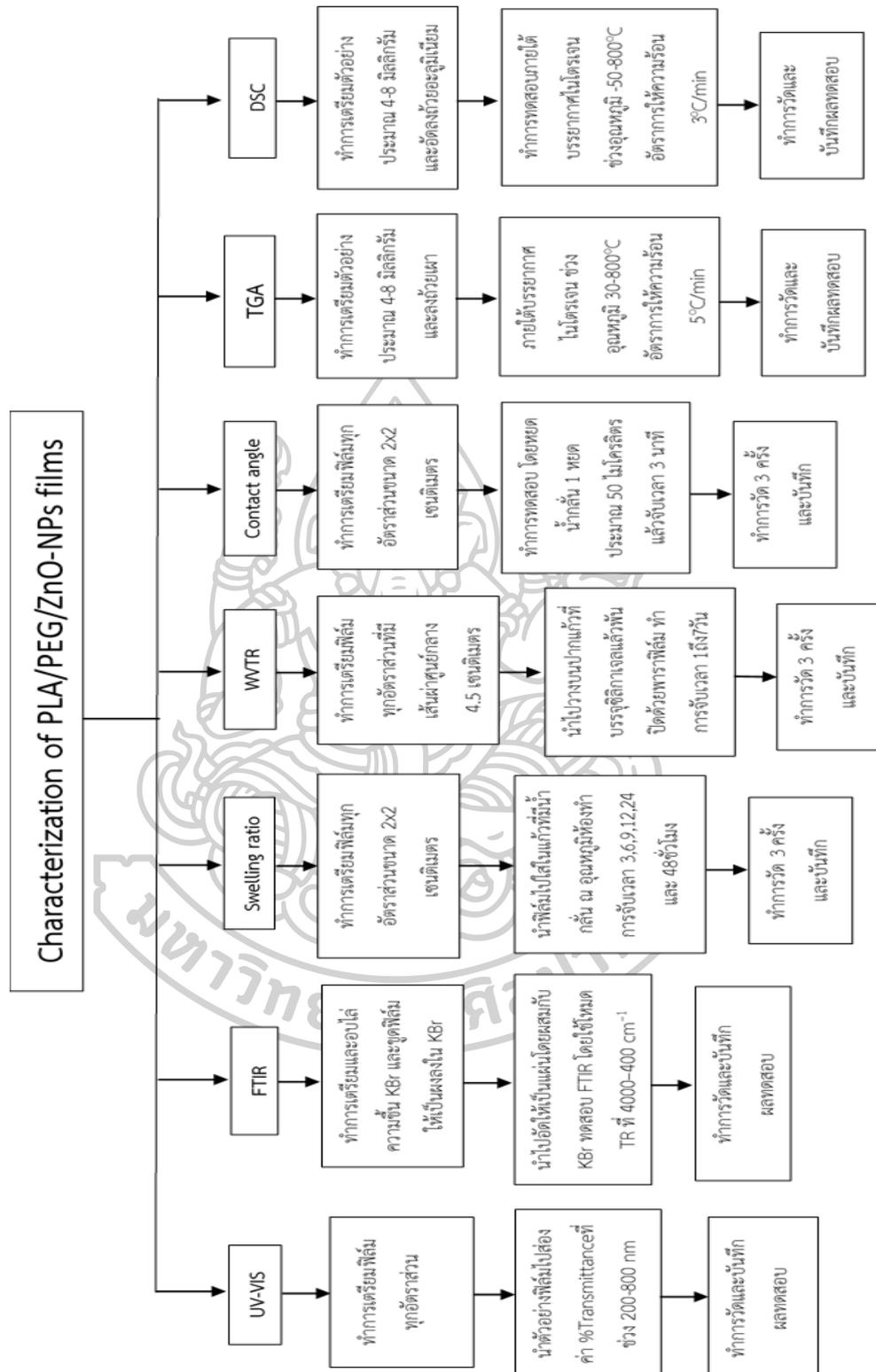
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล/อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล/อนุภาคนาโน
ซิงค์ออกไซด์สำหรับเตรียม Masterbatch

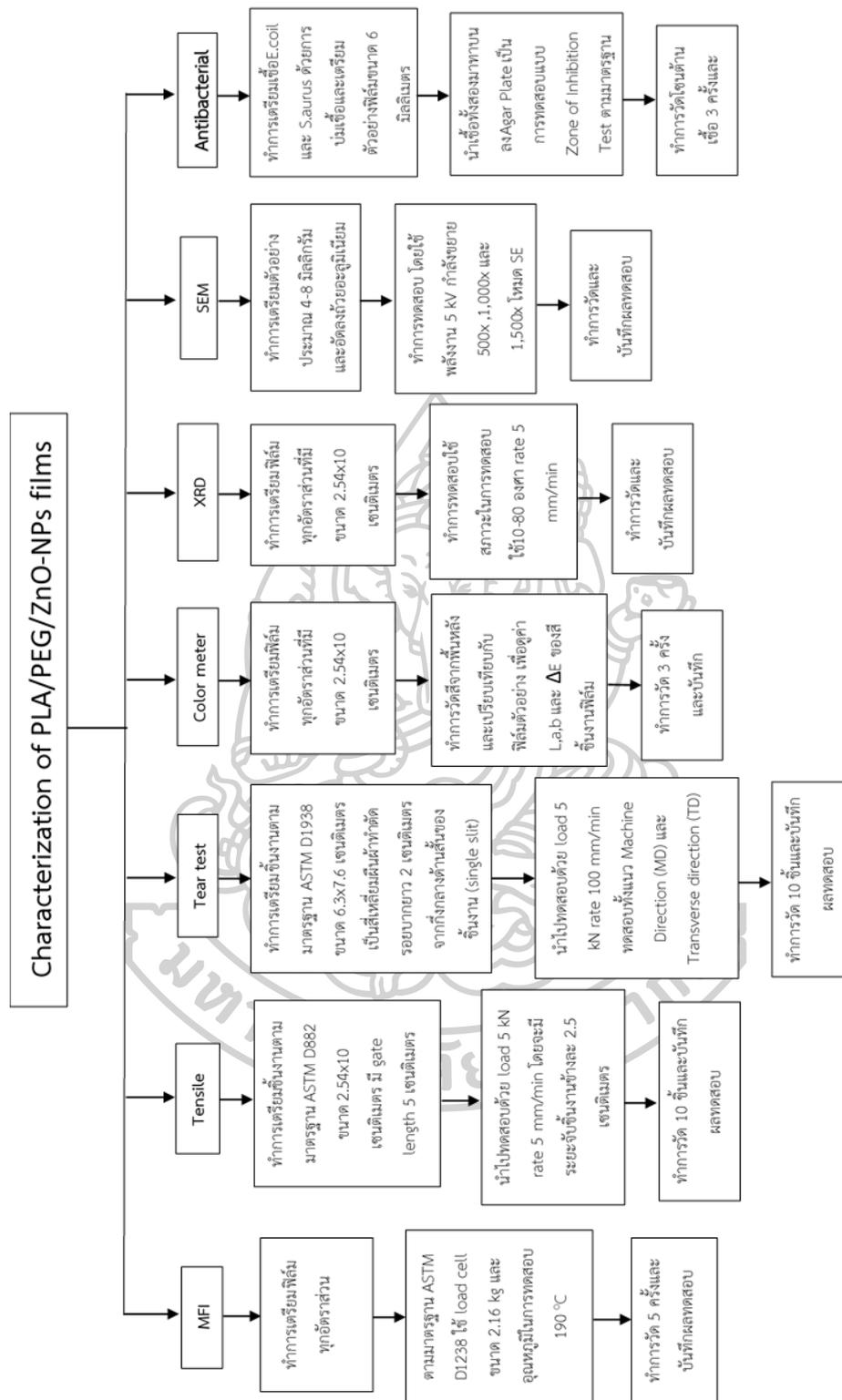


รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล/อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการศึกษาเอกลักษณ์ของฟิล์มผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล/อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 1

นาโนซิงค์ออกไซด์ 1



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการศึกษาเอกลักษณ์ของฟิล์มผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล/อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 2

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จากสารสกัดสมุนไพรที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ให้กับซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต (Zinc acetate dihydrate) ในตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ เพื่อเป็นการสังเคราะห์ทางชีวภาพ (Green synthesis) ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยสมุนไพรที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ใบฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculata* leaves) และ เปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana* peels) และศึกษาผลของการเตรียมฟิล์ม PLA/PEG/ZnO NPs โดยกระบวนการ Cast film extruder ที่มีองค์ประกอบของ PLA/PEG/ ZnO NPs ที่ 89.5/10/0.5, 89/9.5/1.5, 88/9.5/2.5 %wt กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มในงานวิจัยนี้เป็นการเตรียม 2 ขั้นตอนเพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในแผ่นฟิล์ม PLA/PEG ขั้นตอนแรกเตรียม Master batch ด้วยเครื่อง Twin-screw extruder จากนั้น Master batch ของ PLA/PEG/ZnO NPs ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 79.2/19.8/1, 77.6/19.4/3 และ 76.0/19.0/5 ตามลำดับ จะถูกผสมกับ Neat PLA ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:1 แล้วขึ้นรูปฟิล์มโดยเครื่อง Cast film extruder เพื่อให้ได้ของ PLA/PEG/ ZnO NPs ที่ 89.5/10/0.5, 89/9.5/1.5 และ 88/9.5/2.5 %wt ตามลำดับ แล้วศึกษาผลของการเติม ZnO NPs ที่กระจายตัวในฟิล์มและสมบัติต่าง ๆ เช่น สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางเคมี สันฐานวิทยาและสมบัติการต้านเชื้อจุลินทรีย์

4.1. การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยใช้สารสกัดจากสมุนไพร

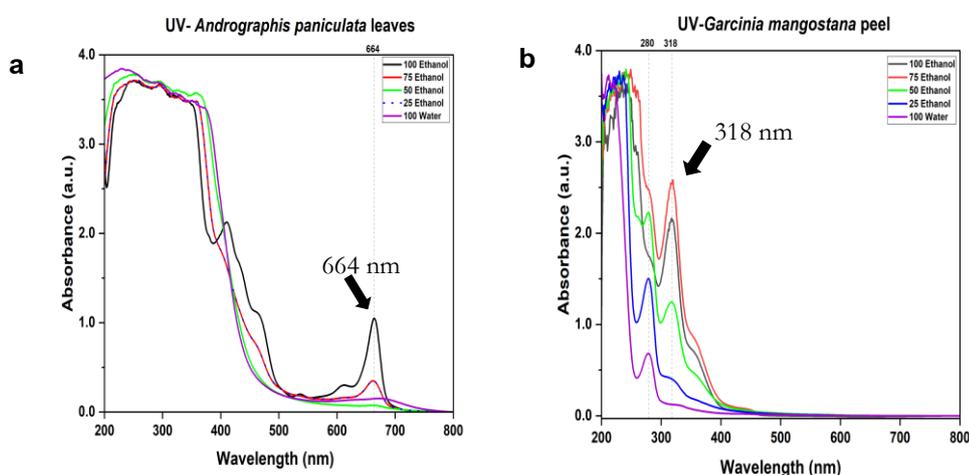
งานวิจัยนี้ในตอนที่ 1 ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 การสกัดสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์จากสารสกัดสมุนไพร 2 ชนิด และส่วนที่ 2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยใช้สารสกัดจากสมุนไพร

4.1.1. การศึกษาการสกัดจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจรหรือเปลือกมังคุด

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการสกัดจากสมุนไพรใบฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculata* leaves) และเปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana* peels) ที่เป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติโดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำกับเอทานอล เป็นตัวทำละลายที่อัตราส่วน 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 (%V/V) เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดเพื่อสกัดสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds)

แล้วทำการศึกษาปริมาณของสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ที่สกัดจากสมุนไพรทั้งสองชนิดในตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำที่อัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer โดยจะใช้ความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-800 nm เพื่อวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารที่สกัดได้ เพื่อนำมาคำนวณหาความเข้มข้นของสารสกัดที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ เพื่อเลือกอัตราส่วนตัวที่เหมาะสมในการสกัด

4.1.1.1. การศึกษาการดูดกลืนแสงของสารสกัดจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจรหรือเปลือกมังคุด



รูปที่ 4.1 UV-spectra ของสารสกัดจากสมุนไพร a) *Andrographis paniculata* leaves และ b) *Garcinia mangostana* peels ของตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ

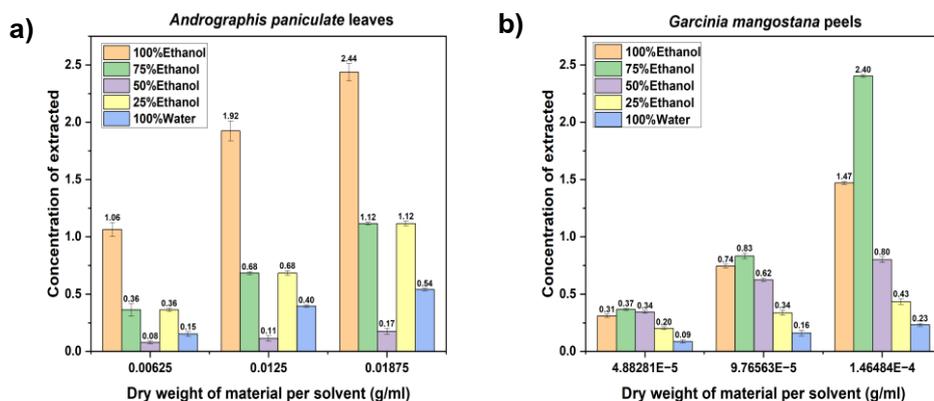
จากรูปที่ 4.1 ที่แสดงค่าการดูดกลืนแสง UV ของสารสกัดจาก *Andrographis paniculata* leaves และ *Garcinia mangostana* peels โดยใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างเอทานอลและน้ำในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้แก่ เอทานอล 100% (100:0), เอทานอล 75% (75:25), เอทานอล 50% (50:50), เอทานอล 25% (25:75) และ น้ำ 100% (0:100) ในการสกัด ซึ่งสามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่เป็นลักษณะเฉพาะของสารประกอบฟีนอลิกได้อย่างชัดเจน ทำให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสกัดจาก *Andrographis paniculata* leaves ของตัวทำละลายที่ใช้ในอัตราส่วนต่างๆ

ทั้งนี้พบว่าสารสกัดจากสมุนไพรทั้ง 2 ชนิดสามารถดูดกลืนแสงในช่วง UV-A UV-B และ UV-C ซึ่งอาจจะใช้เป็นสารป้องกันแสง UV ได้ แต่สารสกัดที่สนใจในการมาทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ใน

งานวิจัยนี้ดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่น 664 nm และ 318 nm ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Do Dat และคณะ [38] เป็นผลมาจากการดูดกลืนจากคลอโรฟิลล์หรือสารประกอบฟีนอลิกที่พบในสมุนไพร จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เอทานอล 100% (เส้นสีดำ) เป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการสกัดสารจาก *Andrographis paniculata* leaves โดยให้ค่าการดูดกลืนแสงในช่วง 664 nm สูงกว่าตัวทำละลายชนิดอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่เอทานอล 75 % (เส้นสีแดง) และเอทานอล 25 % (เส้นปะสีน้ำเงิน) แสดงการดูดกลืนแสงที่ลดลง สำหรับน้ำ 100% (เส้นสีม่วง) และเอทานอล 50% (เส้นสีเขียว) มีค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าตัวทำละลายที่มีความเข้มข้นของเอทานอลต่ำ จะไม่สามารถสกัดสารประกอบบางชนิดออกมาได้ โดยเฉพาะในช่วง 664 nm สรุปได้ว่า เอทานอล 100% เป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพสูงในการสกัดสารจาก *Andrographis paniculata* leaves ตามด้วย เอทานอล 75 % , เอทานอล 25 % , น้ำ 100% และเอทานอล 50% (เส้นสีเขียว) มีประสิทธิภาพการสกัดสารสมุนไพรลดลงตามลำดับ

ในส่วนของรูป b) กราฟ UV-spectra ของ *Garcinia mangostana* peels จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เอทานอล 75% (เส้นสีแดง) แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่สูงในช่วง 318 nm ซึ่งจะมีการดูดกลืนแสงที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kurniawan และคณะ [39] แสดงให้เห็นถึงการสกัดสารประกอบฟีนอลิกจาก *Garcinia mangostana* peels ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ เอทานอล 100% (เส้นสีดำ) , เอทานอล 50% (เส้นสีเขียว) , เอทานอล 25% (เส้นน้ำเงิน) และน้ำ 100% (เส้นสีม่วง) มีค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลง ตามลำดับ ซึ่งบ่งชี้ว่าเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลลดลงประสิทธิภาพในการสกัดสารจาก *Garcinia mangostana* peels ก็ลดลงตามไปด้วย

จากการศึกษาการสกัดจากสมุนไพรใบฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculata* leaves) และเปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana* peels) พบว่า เอทานอล 100% เป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพสูงในการสกัดสารสมุนไพร โดยพบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 nm จากสารสกัดใบฟ้าทะลายโจร ขณะที่ เอทานอล 75 % มีประสิทธิภาพสูงสุดในการสกัดโดยพบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 318 nm จากสารสกัดสมุนไพรเปลือกมังคุด ซึ่งสอดคล้องกับสารคลอโรฟิลล์ และสารประกอบฟีนอลิก โดยประสิทธิภาพการสกัดจะลดลงตามความเข้มข้นของเอทานอลที่ลดลงในสารสกัดแต่ละชนิด ทั้งนี้ความเข้มข้น ปริมาณ และลักษณะของสารสกัดสมุนไพรของตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ จะแสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของสารสกัดสมุนไพรจาก a) *Andrographis paniculata* leaves และ b) *Garcinia mangostana* peels ของตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ

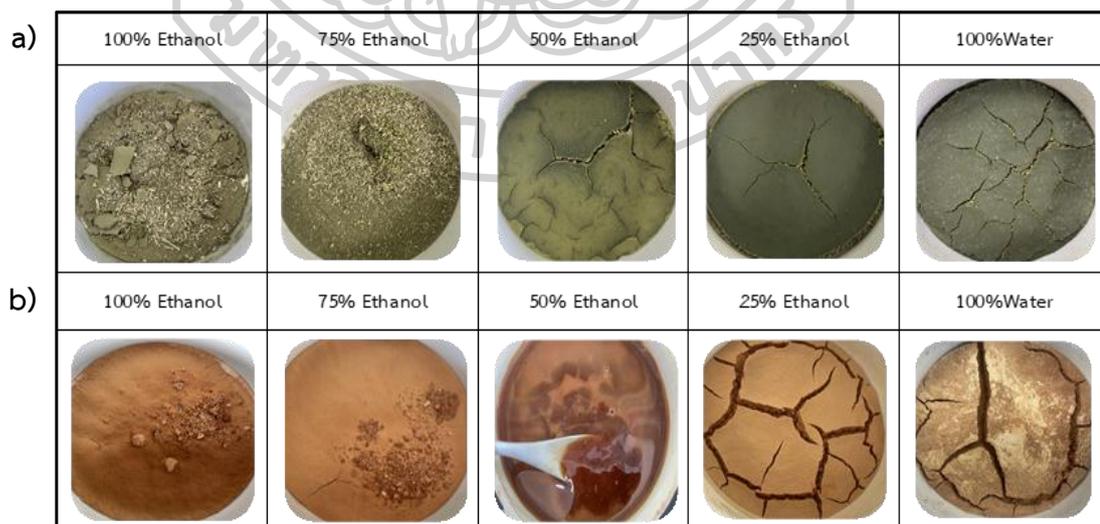
จากผลการทดลองรูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของสารสกัดสมุนไพรจาก *Andrographis paniculata* leaves และ *Garcinia mangostana* peels โดยการสกัดจะใช้พืชที่บดแห้ง ชนิดผง ปริมาณ 5, 10 และ 15 กรัม ที่ใช้ตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ที่อัตราส่วน เอทานอล 100% (100:0), เอทานอล 75% (75:25), เอทานอล 50% (50:50), เอทานอล 25% (25:75) และน้ำ 100% (0:100) เพื่อหาความเข้มข้นของสารที่สกัดสมุนไพรด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer ทำการปรับความเข้มข้นด้วยขวดปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตร *Andrographis paniculata* leaves จะทำการ Dilute 3 เท่าในอัตราส่วน 1:1 จะได้ความเข้มข้น 0.00625, 0.0125 และ 0.01875 กรัมต่อมิลลิลิตร และ *Garcinia mangostana* peels จะทำการ Dilute 10 เท่า ในอัตราส่วน 1:1 จะได้ความเข้มข้น 4.88E-05, 9.77E-05 และ 1.46E-04 กรัมต่อมิลลิลิตร

ในรูป a) *Andrographis paniculata* leaves จากการดูคลิ่นแสงพบว่าเอทานอล 100% (สีเส้นส้ม) มีความเข้มข้นของสารสกัดสมุนไพรที่ดีที่สุด โดยเฉพาะเมื่อใช้ในปริมาณสมุนไพรแห้ง 0.01875 กรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งให้ความเข้มข้นของสารสกัดสูงสุดเมื่อเทียบกับตัวทำละลายชนิดอื่นๆ สำหรับเอทานอล 75% (เส้นสีเขียว) และเอทานอล 25% (เส้นสีเหลือง) ก็ให้ความเข้มข้นของสารสกัดที่ดีเช่นกัน แต่ยังไม่สูงเท่ากับเอทานอล 100% ในส่วนของการใช้น้ำ 100% (เส้นสีฟ้า) และเอทานอล 50% (เส้นสีม่วง) พบว่าจะมีความเข้มข้นของสารสกัดสมุนไพรที่ลดลงตามลำดับ

ในส่วนของในรูป b) *Garcinia mangostana* peels ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า 75% เอทานอล (เส้นสีเขียว) ให้ผลการสกัดที่ดีที่สุด โดยเฉพาะเมื่อใช้ในปริมาณผงพืช 1.46E-4 กรัมต่อ มิลลิลิตร ซึ่งสูงกว่าตัวทำละลายชนิดอื่นๆ สำหรับเอทานอล 100% (เส้นสีส้ม), เอทานอล 50% (เส้นสีม่วง), เอทานอล 25% (เส้นสีเหลือง) และน้ำ 100% (เส้นสีฟ้า) พบว่าจะมีความเข้มข้นของ สารสกัดสมุนไพรที่ลดลงตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 สารสกัดจากสมุนไพรที่ได้จาก *Andrographis paniculata* leaves และ *Garcinia mangostana* peels โดยใช้ตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ ในปริมาณ 100 มิลลิลิตร

อัตราส่วนตัวทำละลาย	100% เอทานอล (100:0)	75% เอทานอล (75:25)	50% เอทานอล (50:50)	25% เอทานอล (25:75)	100% น้ำ (0:100)
ปริมาณสารสกัดที่ได้จาก <i>Andrographis paniculata</i> leaves (มิลลิลิตร)	74.40	82.00	62.40	65.80	68.00
±SD	3.29	2.55	1.82	1.30	2.00
ปริมาณสารสกัดที่ได้จาก <i>Garcinia mangostana</i> peels (มิลลิลิตร)	71.40	83.40	62.00	66.60	69.60
±SD	1.82	1.34	1.41	1.52	1.52



รูปที่ 4.3 สารสกัดจากสมุนไพรที่ได้จาก a) *Andrographis paniculata* leaves และ b) *Garcinia mangostana* peels ของตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ ในปริมาณ 100 มิลลิลิตร

จากตารางที่ 4.1 จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาปริมาณสารสกัดสมุนไพรจาก *Andrographis paniculata* leaves พบว่า เอทานอล 75% จะให้ปริมาณการสกัดที่ดีที่สุดมีปริมาณของสารสกัดเท่ากับ 82.00 ± 2.55 มิลลิลิตร เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวทำละลายเอทานอล 100%, น้ำ 100%, เอทานอล 25% และเอทานอล 50% มีปริมาณของสารสกัดเท่ากับ 74.40 ± 3.29 , 68.00 ± 2.00 , 65.80 ± 1.30 และ 62.40 ± 1.82 มิลลิลิตร ที่ให้ปริมาณสารสกัดสมุนไพรจากใบฟ้าทะลายโจรลดลง ตามลำดับ

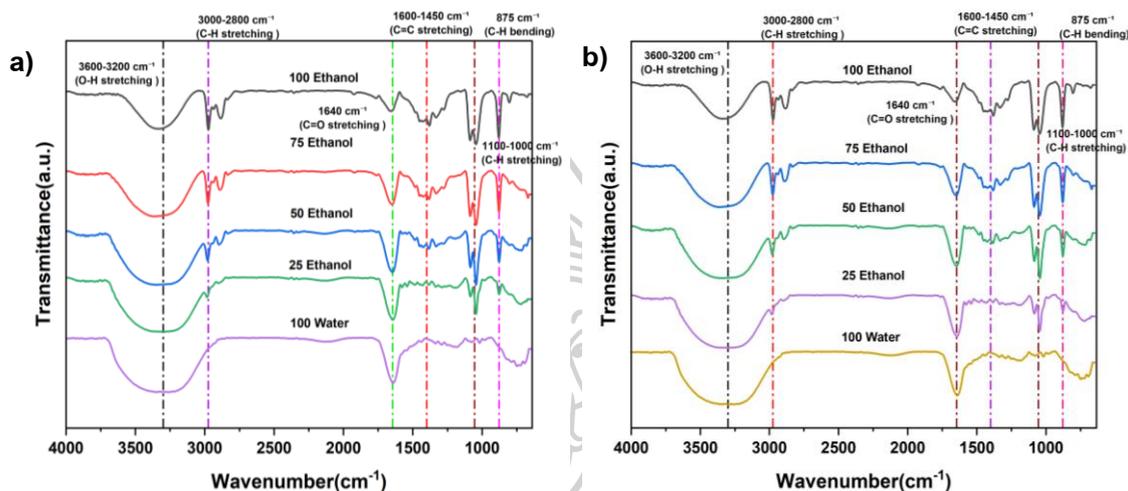
ในส่วนของ *Garcinia mangostana* peels พบว่า เอทานอล 75% จะให้ปริมาณการสกัดที่ดีที่สุดมีปริมาณของสารสกัดเท่ากับ 83.40 ± 1.34 มิลลิลิตร เช่นเดียวกับใบฟ้าทะลายโจร เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ เอทานอล 100%, น้ำ 100%, เอทานอล 25% และเอทานอล 50% มีปริมาณของสารสกัดเท่ากับ 71.40 ± 1.82 , 69.60 ± 1.52 , 66.60 ± 1.52 และ 62.00 ± 1.41 มิลลิลิตร ที่ให้ปริมาณสารสกัดสมุนไพรจากเปลือกมังคุดลดลง ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.3 สารสกัดจากสมุนไพรที่ได้จาก a) *Andrographis paniculata* leaves และ b) *Garcinia mangostana* peels พบว่าการใช้ เอทานอล 100% แม้จะสามารถสกัดสารที่ไม่มีขี้ได้ แต่กลับให้ปริมาณสารสกัดน้อย เนื่องจากเอทานอลบางส่วนจะระเหยออกระหว่างกระบวนการสกัด ส่งผลให้ปริมาณสารสกัดลดลง เมื่อใช้เอทานอล 75% จะได้สารสกัดสมุนไพรที่ได้ปริมาณมากที่สุด ส่วนการใช้เอทานอล 50% พบว่าปริมาณสารสกัดน้อยที่สุด เนื่องจากเกิดเจลของสารประกอบของพืช (Plant-derived gel formation) ทำให้ขัดขวางการแยกสารออกจากสมุนไพรสกัดออกจากงานวิจัยของ Tang, Z และคณะ[41] พบว่าการเกิดเจลนี้เกิดจากสารประกอบในพืชบางประเภท เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) และกากใยพืช (Fibers) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำ และก่อตัวเป็นเจลเมื่อผสมกับน้ำในอัตราสูง โดยเมื่อมีน้ำในตัวทำละลายมากเกินไป จะทำให้สารเหล่านี้ดูดซึมน้ำและเกิดการขยายตัวจนกลายเป็นเจลที่ทำให้การกรองสารสกัดทำได้ยากขึ้น สำหรับตัวทำละลายผสมที่มี อัตราส่วนเอทานอล 25% และน้ำ 100% แม้จะได้ปริมาณสารสกัดมากใกล้เคียงกัน แต่พบว่าทั้งสองอัตราส่วนนี้ต้องใช้เวลาในการสกัดนาน

4.1.1.2. การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารสกัดจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจรหรือเปลือก

มังคุด

การศึกษาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารสกัดจากสมุนไพรด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ช่วงความยาวคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ เพื่อดูหมู่ฟังก์ชันของสารสกัดแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 FTIR-spectra ของสารสกัดจากสมุนไพร a) *Andrographis paniculate* leaves และ b) *Garcinia mangostana* peels ของตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ

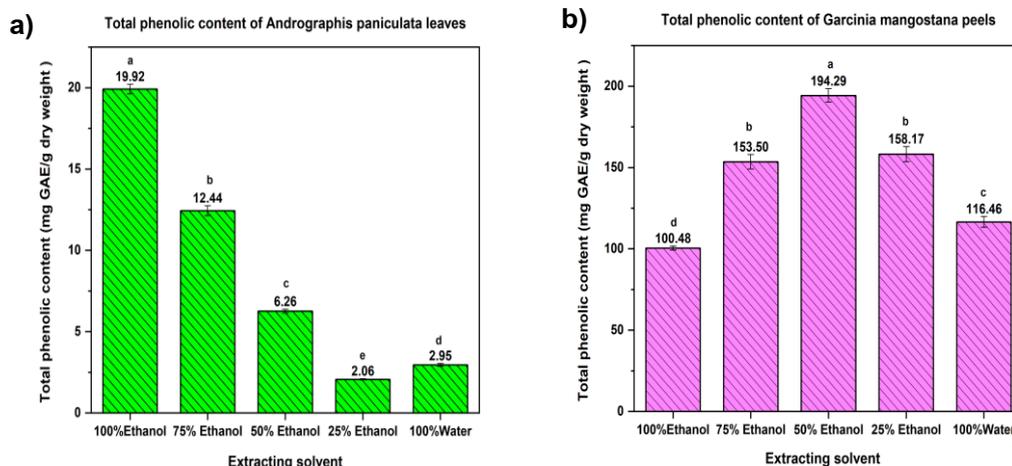
จาก FTIR spectra ของสารสกัดจาก a) *Andrographis paniculate* leaves และ b) *Garcinia mangostana* peels พบว่าทั้งสองตัวอย่างมีพีคที่คล้ายกันดังนี้ พีคที่บริเวณ $3200-3600\text{ cm}^{-1}$ (O-H stretching) พีคนี้บ่งบอกถึงการมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งพบได้ในน้ำ, เอทานอล และสารประกอบฟีนอลิกที่อยู่ในเปลือกมังคุดและใบฟ้าทะลายโจร พีคที่บริเวณ $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ (C-H stretching) พีคนี้แสดงถึงการสั่นของพันธะ C-H ในโมเลกุลของเอทานอลและสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ ที่พบในเปลือกมังคุดและฟ้าทะลายโจร พีคที่บริเวณ 1640 cm^{-1} (C=O stretching) พีคนี้อาจบ่งบอกถึงการมีหมู่คาร์บอนิล (C=O) ซึ่งพบได้ในสารประกอบฟีนอลิกบางชนิดที่อยู่ในเปลือกมังคุดและฟ้าทะลายโจร พีคที่บริเวณ $1450-1600\text{ cm}^{-1}$ (C=C stretching) พีคนี้บ่งบอกถึงการยืดของพันธะ C=C ในวงอะโรมาติก ซึ่งเป็นลักษณะของสารประกอบฟีนอลที่พบในเปลือกมังคุด และฟ้าทะลายโจร การปรากฏของพีคนี้แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางเคมีของสารที่มีโครงสร้างอะโรมาติกที่สำคัญในสารสกัดจากสมุนไพร พีคที่บริเวณ $1000-1100\text{ cm}^{-1}$ (C-O stretching) ซึ่งบ่งบอกถึงการสั่นของพันธะ C-O ในโมเลกุลของเอทานอลและสารประกอบฟีนอลที่พบในสารสกัดจากเปลือกมังคุดและใบฟ้าทะลายโจร พีคที่บริเวณ 875 cm^{-1} (C-H bending) บ่งบอกถึงการมีสารประกอบ

ฟีนอลในใบฟ้าทะลายโจร และเปลือกมังคุดที่มีวงอะโรมาติกของสารประกอบฟีนอลที่พบในสารสกัดจากสมุนไพรมีการสั่นไหวที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Dappula [34], Jaithon [35] และคณะ จากผล FTIR spectra ของสารสกัดจากสมุนไพรรวมสองชนิดนี้ การสั่นของหมู่ฟังก์ชันทางเคมีพันธะต่าง ๆ เช่น O-H, C-H, C=O, C=C และ C-O ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญในการระบุสารสกัดสมุนไพรรูปที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์จากสารประกอบฟีนอลิกในเปลือกมังคุดและฟ้าทะลายโจร รวมถึงการเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดเพื่อสกัด

จากผลการวิเคราะห์ FTIR spectra ของสารสกัดจากใบฟ้าทะลายโจรและเปลือกมังคุด พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญของพีคในช่วง C=O stretching และ C-H stretching เมื่อมีการลดปริมาณเอทานอลและเพิ่มน้ำในตัวทำละลาย โดยพีคที่ C=O stretching (ประมาณ 1640 cm^{-1}) มีค่า % Transmittance การลดความเข้มลงเมื่อปริมาณเอทานอลลดลงและน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ถึงการลดประสิทธิภาพของเอทานอลในการสกัดสารประกอบที่มีหมู่คาร์บอนิล (C=O) ในสารประกอบฟีนอลิกจากสมุนไพรรวม ทั้งนี้ การลดลงของความเข้มของพีคนี้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของตัวทำละลายในการสกัดสารที่มีหมู่ฟังก์ชัน C=O ในสมุนไพรรวม ในขณะที่พีคที่ C-H stretching (ประมาณ $2800\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$) ซึ่งเกี่ยวข้องกับพันธะ C-H ในโมเลกุลของเอทานอลและสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ ก็แสดงการลดลงของความเข้มเมื่อตัวทำละลายผสมที่ใช้ในการสกัดมีปริมาณเอทานอลลดลงและเพิ่มน้ำ ซึ่งบ่งชี้ว่าเอทานอลมีบทบาทสำคัญในการสกัดสารที่มีพันธะ C-H ในสมุนไพรรวม

4.1.1.3. การศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของสารสกัดจากสมุนไพรรวมฟ้าทะลายโจรหรือเปลือกมังคุด

การศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total Phenolic Content หรือ TPC) เพื่อใช้เป็นตัวในการรีดิวซ์และเพิ่มความเสถียรในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากสารสกัดพืชโดยจะทำการทดสอบด้วยวิธี Folin-Ciocalteu assay เพื่อหาปริมาณสารประกอบกลุ่มฟีนอลิกทั้งหมด โดยการเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของสารมาตรฐานคือสาร Gallic acid ที่ให้ Standard calibration curve เพื่อเป็นสารมาตรฐานเปรียบเทียบความเข้มข้น จะวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 760 nm จะมีหน่วยเป็น mg GAE/g dry weight เพื่อใช้ในการหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของสกัดสมุนไพรรวมจากใบฟ้าทะลายโจรหรือเปลือกมังคุดเพื่อเลือกอัตราส่วนตัวที่เหมาะสมในการสกัดแสดงดังรูปที่ 4.5



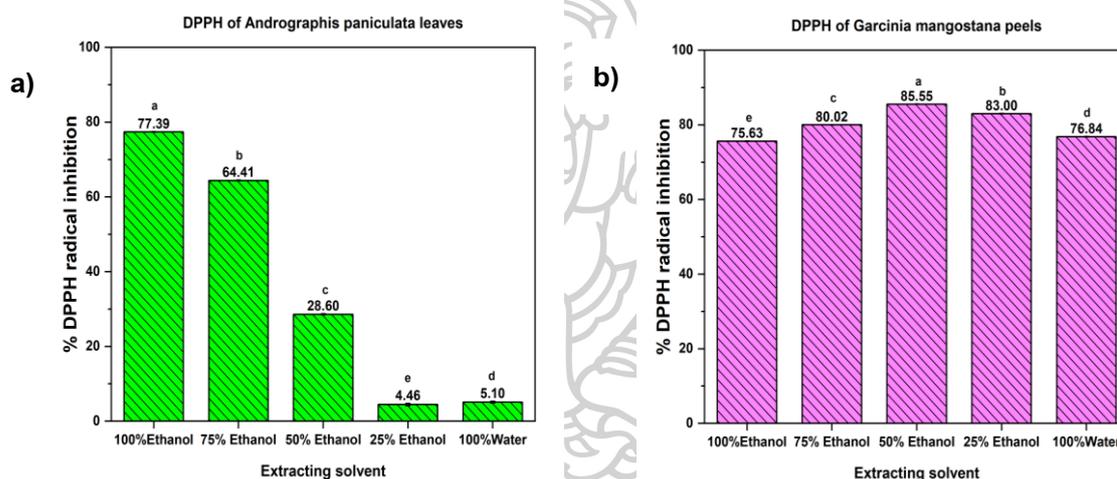
รูปที่ 4.5 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกจาก a) *Andrographis paniculata* leaves และ b) *Garcinia mangostana* peels ของตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ

จากผลการทดลองในการสกัดสารจากสมุนไพรโดยใช้ตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (Total Phenolic Content หรือ TPC) แตกต่างกันตามชนิดของสมุนไพรที่ใช้ในการทดลอง โดยในกรณีของ a) *Andrographis paniculata* leaves พบว่า เอทานอล 100% ให้ประสิทธิภาพการสกัดสารประกอบฟีนอลิกที่สูงที่สุดที่ โดยแสดงค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกที่ 19.92 mg GAE/g dry weight ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเอทานอล 100% เป็นตัวทำละลายที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการสกัดสารฟีนอลิกจากใบฟ้าทะลายโจร เพราะสามารถสกัดเอาสารประกอบฟีนอลิกให้ได้ความเข้มข้นสูง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวทำละลายชนิดอื่นที่ใช้ในอัตราส่วนต่ำกว่า เช่น เอทานอล 75% ,เอทานอล 50%,เอทานอล 25% และน้ำ 100% จะมีผลการสกัดสารประกอบฟีนอลิก ที่ 12.44, 6.26, 2.06 และ 2.95 mg GAE/g dry weight ตามลำดับ ซึ่งให้ผลการสกัดที่ลดลง จะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pillai และคณะ[40] ที่การใช้เอทานอลในการสกัด *Andrographis paniculata* leaves ให้ค่าปริมาณสารที่สูง

ในส่วนของรูปที่ 4.5 b) *Garcinia mangostana* peels พบว่า เอทานอล 50% ให้ผลการสกัดสารฟีนอลิก สูงที่สุดที่ 194.29 mg GAE/g dry weight โดยเอทานอลในอัตราส่วน 50% นี้สามารถสกัดเอาสารประกอบฟีนอลิกให้ได้ความเข้มข้นสูง เมื่อเปรียบเทียบกับ เอทานอล 100%, เอทานอล 75%, เอทานอล 25% และน้ำ 100% จะมีผลการสกัดสารประกอบฟีนอลิก ที่ 100.48, 153.50, 158.17 และ 116.46 mg GAE/g dry weight ตามลำดับ ซึ่งให้ผลการสกัดที่ค่าปริมาณสารลดลง

4.1.1.4. การศึกษาการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจรหรือเปลือกมังคุด

การศึกษาการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH test) เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการรีดิวซ์ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากสารสกัดพืชโดยการทดสอบ DPPH เป็นการประเมินฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของสาร โดยอาศัยการทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ DPPH ที่มีสีม่วง เมื่อสารต้านอนุมูลอิสระแตกตัวให้อิเล็กตรอน จะทำให้อนุมูล DPPH เปลี่ยนเป็นสารสีเหลือง ซึ่งสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงสีโดยใช้เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 nm เพื่อใช้ในการศึกษาการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH test) ของสกัดจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจรหรือเปลือกมังคุดเพื่อเลือกอัตราส่วนตัวที่เหมาะสมในการสกัดแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การทดสอบการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากสมุนไพร a) *Andrographis paniculata* leaves และ b) *Garcinia mangostana* peels ของตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ

จากรูปที่ 4.6 ผลการทดสอบการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH assay ของสารสกัดจากสมุนไพร a) *Andrographis paniculata* leaves จากผลการทดสอบพบว่าตัวทำละลายเอทานอล 100% ให้ผลการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุดที่ 77.39% แสดงให้เห็นถึงการยับยั้งอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวทำละลายอื่นๆ ที่ใช้ในการสกัด เช่น เอทานอล 75% มีการยับยั้งที่ 64.41%, เอทานอล 50% มีการยับยั้งที่ 28.60% ขณะที่ 25% เอทานอล และน้ำ 100% ให้ผลการยับยั้งที่ต่ำสุดเพียง 4.46% และ 5.10% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Dappula และคณะ [34] แสดงให้เห็นว่าเอทานอลในความเข้มข้นที่สูงสามารถสกัดสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากใบของ *Andrographis paniculata* ได้ดีที่สุดในส่วนตัวทำละลายที่มีการผสมเอทานอลกับน้ำใน

อัตราส่วนต่าง ๆ และน้ำล้นมีประสิทธิภาพการยับยั้งอนุมูลอิสระที่ต่ำกว่ามากโดยเฉพาะน้ำ 100% ที่ให้ผลการยับยั้งที่ต่ำที่สุด

ในส่วนของกราฟ b) *Garcinia mangostana* peels พบว่า เอทานอล 50% เป็นตัวทำละลายที่ให้ผลการต้านอนุมูลอิสระสูงสุดที่ 85.55% แสดงให้เห็นถึงการยับยั้งอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเทียบกับตัวทำละลายอื่น ๆ เช่น เอทานอล 75% มีการยับยั้งอนุมูลอิสระที่ 80.02% และเอทานอล 100% มีการยับยั้งอนุมูลอิสระที่ 76.53% ขณะที่การใช้ เอทานอล 25% ให้ผลการยับยั้งที่ 83.00% และน้ำ 100% ให้ผลการยับยั้งอนุมูลอิสระที่ 76.84% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Jaithon และคณะ [35] แสดงให้เห็นว่าเปลือกมังคุดมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระได้ดีจากตัวทำละลายที่ผสมเอทานอลในความเข้มข้น 50% และ 75% อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับใบของ *Andrographis paniculate* ที่ผลการยับยั้งอนุมูลอิสระสูงสุดจากเอทานอล 100% เปลือกมังคุดกลับมีการยับยั้งอนุมูลอิสระสูงสุดจาก 50% เอทานอล ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างในการใช้ตัวทำละลายที่แตกต่างกันในการสกัดสารจากสมุนไพรทั้งสองชนิด

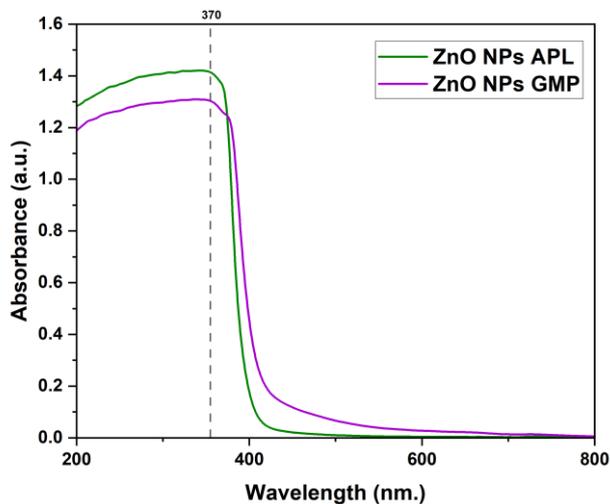
ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของสารสกัดสมุนไพรทั้งสองชนิด ทั้งความเข้มข้นหมู่ฟังก์ชัน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก และการต้านอนุมูลอิสระ พิจารณาจากผลลัพธ์ในการใช้ตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำในอัตราส่วนต่าง ๆ การเลือกใช้ เอทานอล 75% เป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุด สามารถอธิบายได้จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการระเหยของสารสกัดและการเกิดเจล โดยการใช้เอทานอล 100% แม้จะให้ผลการต้านอนุมูลอิสระที่ดี แต่เนื่องจากเอทานอลมีแนวโน้มที่จะระเหยเร็วในระหว่างกระบวนการสกัด ทำให้ได้ปริมาณสารสกัดสมุนไพรที่น้อย ในขณะที่การใช้ 50% เอทานอลอาจทำให้เกิดการก่อตัวของเจลทำให้กระบวนการสกัดใช้เวลานาน และได้ปริมาณสารสกัดที่น้อยลง จากงานวิจัย Kumriawan และคณะ [39] อธิบายว่าจากการจากการดูดซึมน้ำของสารประกอบบางประเภท เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ และกาบาไยพิซ ซึ่งทำให้สารเหล่านี้ขยายตัวและก่อตัวเป็นเจล การเลือกใช้ตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำที่อัตราส่วน 75:25 จึงเหมาะสมที่สุดจากให้ผลปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและการต้านอนุมูลอิสระที่ดีและยังสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาการระเหยเร็วของเอทานอลและการเกิดเจลเนื่องจากน้ำได้ ทำให้เหมาะสมนำไปสกัดสารจากสมุนไพรที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ให้กับซิงค์อะซิเตตไดไฮเดรต (Zinc acetate dihydrate) การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ทางชีวภาพ (Green synthesis) ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

4.1.2. การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์จากสารสกัดจากสมุนไพร

ในงานวิจัยส่วนนี้จะเป็นการศึกษาอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ที่สังเคราะห์จากสารสกัดสมุนไพรจากใบฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculata* leaves) และเปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana* peels) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ให้กับซิงค์อะซิเตรตไดไฮเดรต (Zinc acetate dihydrate) เพื่อการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ทางชีวภาพ (Green synthesis) ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

4.1.2.1. การศึกษาการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร

การศึกษาการดูดกลืนแสงของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer จะใช้ความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-800 เพื่อดูความสามารถในการดูดกลืนของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร ได้ในช่วงของ UV A, B, C และ UV-visible แสดงดังรูปที่ 4.7

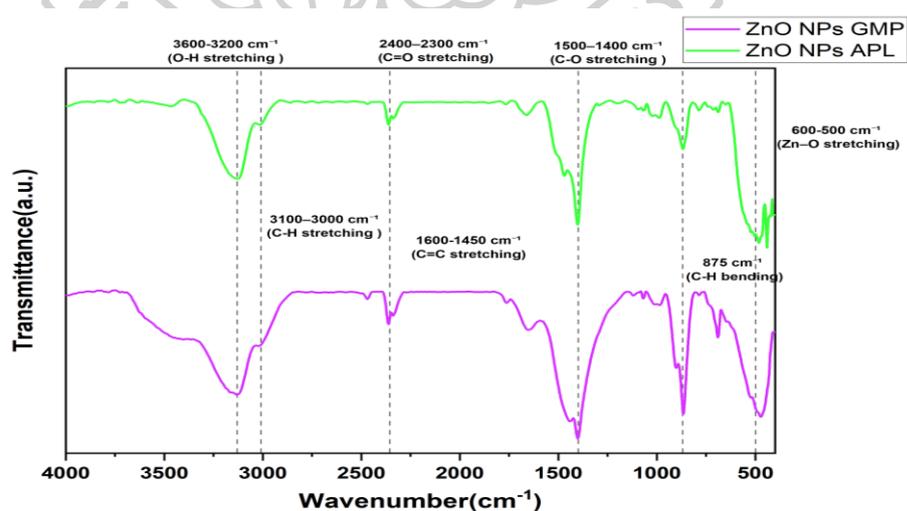


รูปที่ 4.7 UV-spectra ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร ZnO NPs *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP)

จากรูปที่ 4.7 กราฟ UV-spectra ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร ZnO NPs จาก *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ ZnO NPs จาก *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP) จะแสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 370 นาโนเมตร การดูดกลืนนี้มีลักษณะการดูดกลืนที่เด่นชัดในช่วงคลื่นแสง UV-A, UV-B และ UV-C สอดคล้องกับงานวิจัยของ Dappula [34] , Jaithon [35] และคณะ ที่เป็นลักษณะการดูดกลืนที่สอดคล้องกับสมบัติของอนุภาคนาโน ZnO NPs ที่มีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงนี้ เมื่อพิจารณาจากค่าการดูดกลืนแสงในกราฟพบว่า ZnO NPs APL (เส้นสีเขียว) แสดงค่าการดูดกลืนสูงกว่า ZnO NPs GMP (เส้นสีม่วง) ค่าการดูดกลืนสูงสุดของ ZnO NPs APL อยู่ที่ประมาณ 1.4 a.u. ในขณะที่ ZnO NPs GMP อยู่ที่ประมาณ 1.2 a.u. ซึ่งบ่งบอกถึงความแตกต่างในการดูดกลืนแสงของทั้งสองตัวอย่างความแตกต่างนี้อาจมีสาเหตุมาจากโครงสร้างขนาดของอนุภาคนาโนที่ต่างกัน ความหนาแน่นของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ และการกระจายตัวของสาร เป็นต้น

4.1.2.2. การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร

การศึกษาเอกลักษณ์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพรด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ช่วงความยาวคลื่น 4000-400 cm^{-1} โดยใช้โหมด % Transmittance เพื่อดูการสั่นไหวของหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ ตัวอย่างจะแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 FTIR-spectra ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร ZnO NPs *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP)

จากรูปที่ 4.8 FTIR-spectra ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร a) ZnO NPs จาก *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ b) ZnO NPs จาก *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP) จะแสดงการสั่นของหมู่ฟังก์ชันที่คล้ายกัน พีคที่บริเวณ $3600-3200\text{ cm}^{-1}$ (O-H stretching) ในช่วงนี้จะเห็นการสั่นไหวที่จากการสั่นของพันธะ O-H ซึ่งหมายถึงการมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) โดย ZnO NPs GMP (เส้นสีม่วง) และ ZnO NPs APL (เส้นสีเขียว) ทั้งสองชนิดแสดงถึงการมีหมู่ O-H ซึ่งอาจมาจากการดูดซับน้ำหรือความชื้น

พีคที่บริเวณ $3100-3000\text{ cm}^{-1}$ (C-H stretching) ในช่วงนี้เป็นการยืดหยุ่นของพันธะ C-H ซึ่งแสดงถึงการมีพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจนในตัวอย่าง การสั่นไหวในช่วงนี้อาจจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ใช้สังเคราะห์ ZnO NPs

พีคที่บริเวณ $2400-2300\text{ cm}^{-1}$ (C=O stretching) การสั่นไหวในช่วงนี้แสดงถึงการยืดหยุ่นของพันธะ C=O ซึ่งบ่งชี้ว่ามีหมู่คาร์บอนิล (C=O) อยู่ในตัวอย่างซึ่งอาจเกิดจากการมีสารอื่น ๆ ที่มีหมู่นี้ผสมอยู่ใน ZnO NPs หรือจากการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่างกับสภาพแวดล้อม

พีคที่บริเวณ $1600-1450\text{ cm}^{-1}$ (C=C stretching) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jaithon และคณะ [35] อธิบายว่าการสั่นไหวในช่วงนี้แสดงถึงการยืดหยุ่นของพันธะ C=C หมายถึงการมีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนในตัวอย่าง ซึ่งเป็นของสารประกอบที่มีโครงสร้างของพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล การสั่นไหวในช่วงนี้อาจจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ใช้สังเคราะห์

พีคที่บริเวณ 875 cm^{-1} (C-H bending) การสั่นไหวที่เกิดขึ้นแสดงถึงการบิดตัวของพันธะ C-H ซึ่งพบในสารประกอบที่มีพันธะ C-H เช่นเดียวกับที่แสดงในกราฟ และ ZnO NPs ช่วง $600-500\text{ cm}^{-1}$ (Zn-O stretching) ในช่วงนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Dappula, และคณะ [34] ที่ จะแสดงถึงการสั่นของพันธะ Zn-O ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารประกอบ สังกะสี (Zn) และออกซิเจน (O) ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างของ ZnO NPs อย่างชัดเจน

จากการเปรียบเทียบระหว่าง ZnO NPs APL (เส้นสีเขียว) และ ZnO NPs GMP (เส้นสีม่วง) พบว่ากราฟทั้ง 2 แสดงให้เห็นถึงหมู่ฟังก์ชันที่คล้ายกัน และมีพีคที่เด่นชัดที่พีค ZnO NPs ช่วง $600-500\text{ cm}^{-1}$ (Zn-O stretching) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Suresh, J. และคณะ [24] ที่เป็นลักษณะเฉพาะของสารประกอบ สังกะสี (Zn) และออกซิเจน (O) ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างของ ZnO NPs อย่างชัดเจน

4.1.2.3. การศึกษาขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร

การศึกษาขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS) ที่ทำการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคขนาดเล็กในสารแขวนลอย โดยการวัดแสงที่กระเจิงจากอนุภาคที่เคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน (Brownian motion) การทดสอบนี้เหมาะสำหรับอนุภาคตั้งแต่ช่วง 1 นาโนเมตร ถึง 10 ไมโครเมตร ซึ่งให้ผลลัพธ์เป็นขนาดเฉลี่ย และค่า PDI (Polydispersity Index) ที่บ่งบอกถึงความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาค จะแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยการทดสอบ DLS ของอนุภาคของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร ZnO NPs *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP)

Sample	Z-Average (d.nm)	Peak Size (d.nm)	% Intensity	Pdi	St Dev (d.nm)
ZnO NPs APL 1	1016.00	349.80	1.00	0.75	34.90
ZnO NPs APL 2	1224.00	434.60	1.00	0.67	49.70
ZnO NPs APL 3	1296.00	452.30	1.00	0.69	53.10
Total	1178.67	412.23			
±SD	145.40	54.79			
ZnO NPs GMP 1	1916.00	778.90	1.00	0.65	80.40
ZnO NPs GMP 2	1999.00	594.30	1.00	0.93	59.70
ZnO NPs GMP 3	1563.00	449.90	1.00	0.88	44.50
Mean	1826.00	607.70			
±SD	231.51	164.91			

จากตารางที่ 4.2 การทดสอบ Dynamic Light Scattering (DLS) เพื่อหาขนาดอนุภาคในตัวอย่างโดยการทดสอบ 3 ซ้ำ ของอนุภาค ZnO NPs จาก *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP) แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาค โดย ZnO NPs APL 1 มีค่า Z-Average อยู่ที่ 1016.00 nm และค่า Peak Size ที่ 349.80 nm ซึ่งแสดงถึงอนุภาคที่มีขนาด

ค่อนข้างเล็ก โดยมีค่า SD ที่ 34.90 nm และค่า PDI ที่ 0.75 บ่งชี้ถึงการกระจายขนาดที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ในขณะที่ ZnO NPs APL 2 และ ZnO NPs APL 3 แสดงขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น โดย ZnO NPs APL 2 มีค่า Z-Average ที่ 1224.00 nm และค่า Peak Size ที่ 434.60 nm มีค่า SD ที่ 49.70 nm ส่วน ZnO NPs APL 3 มีค่า Z-Average ที่ 1296.00 nm และค่า Peak Size ที่ 452.30 nm โดยมีค่า SD ที่ 53.10 nm. ทั้งสองตัวอย่างนี้มีค่า PDI ที่สูงขึ้นเล็กน้อยที่ 0.67 และ 0.69, ซึ่งบ่งชี้ถึงการกระจายขนาดที่กว้างขึ้นจาก ZnO NPs APL 1 แต่ยังคงมีการกระจายที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ

ในส่วนขนาดอนุภาคของ ZnO NPs GMP 1, ZnO NPs GMP 2, และ ZnO NPs GMP 3 มีการเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดย ZnO NPs GMP 1 มีค่า Z-Average ที่ 1916.00 nm และค่า Peak Size ที่ 778.90 nm พร้อมค่า SD ที่ 80.4 nm และ PDI ที่ 0.65 ซึ่งแสดงถึงการกระจายขนาดที่ค่อนข้างกว้าง สำหรับ ZnO NPs GMP 2, ค่า Z-Average อยู่ที่ 1999.00 nm และค่า Peak Size ที่ 594.30 nm โดยมีค่า SD ที่ 89.70 nm ในขณะที่ ZnO NPs GMP 3 มีค่า Z-Average ที่ 1563.00 nm และ Peak Size ที่ 449.90 nm ค่า SD อยู่ที่ 44.50 nm ทั้งสองตัวอย่างนี้มีค่า PDI ที่สูงขึ้นที่ 0.932 และ 0.88 ซึ่งบ่งชี้ถึงการกระจายขนาดที่กว้างขึ้นและความหลากหลายของขนาดอนุภาคมากกว่า ZnO NPs GMP 1 แสดงให้เห็นถึงการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอและมีความแตกต่างในขนาดอนุภาคมากกว่าตัวอย่างอื่น ๆ สำหรับค่า % Intensity ของทุกตัวอย่าง (ทั้ง APL และ GMP), พบว่ามีค่า % Intensity เท่ากับ 100% ซึ่งหมายความว่าแสงที่กระเจิงจากตัวอย่างทั้งหมดมีความเข้มสูงสุดในช่วงที่ทำการทดสอบ, ไม่ว่าจะเป็นอย่างที่มีอนุภาคขนาดใหญ่หรือขนาดเล็ก, โดยความเข้มของแสงที่กระเจิงมีค่า 100% คงที่ตลอดการทดสอบ

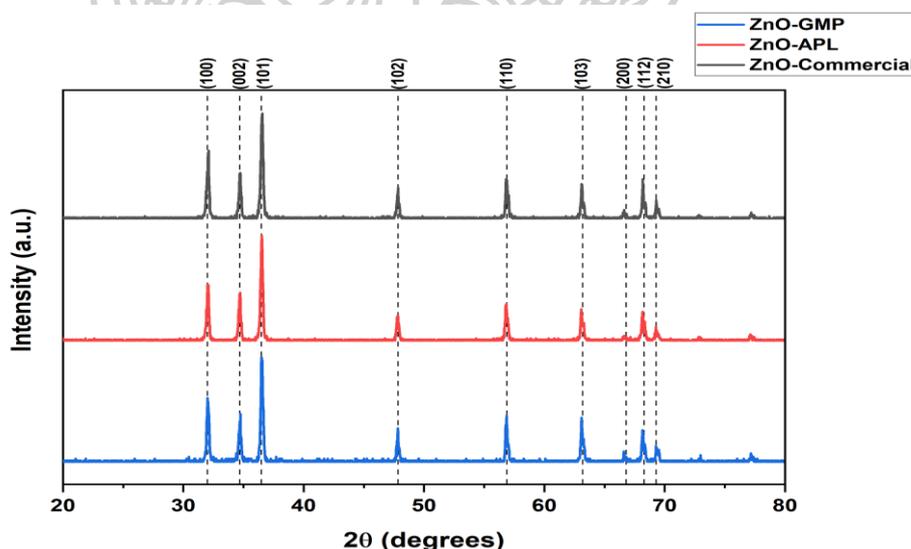
จากการทดสอบ DLS พบว่า ZnO NPs จากสารสกัดสมุนไพร ใบฟ้าทะลายโจร (APL) และ เปลือกมังคุด (GMP) มีความแตกต่างในขนาดและการกระจายตัวของอนุภาค โดย ZnO NPs APL มีค่า Z-Average เฉลี่ยที่ 1178.67 ± 145.40 nm และ Peak Size เฉลี่ยที่ 412.23 ± 54.79 nm, ซึ่งแสดงว่าอนุภาคในกลุ่มนี้มีขนาดเล็กและการกระจายขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอ. ส่วน ZnO NPs GMP มีค่า Z-Average เฉลี่ยที่ 1826.00 ± 231.51 nm และ Peak Size เฉลี่ยที่ 607.70 ± 164.91 nm, ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคในกลุ่มนี้มีขนาดใหญ่และการกระจายขนาดกว้างกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jaithon และคณะ [35] ที่มีขนาดของ ZnO NPs APL จะมีขนาดเล็กกว่า ZnO NPs GMP เนื่องจากโครงสร้างสารประกอบฟีนอลิกของสารสกัดสมุนไพรที่แตกต่างกันที่ใช้สังเคราะห์ ZnO NPs

4.1.2.4. การศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพรมะขาม

การศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างเฉพาะแบบ Wurtzite ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ นอกจากนี้พีคที่ปรากฏจะมีความเด่นชัดสูงบ่งชี้ถึงความบริสุทธิ์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพรมะขาม และสามารถบอกขนาดผลึกได้ โดยการทดสอบจะใช้สภาวะในการทดสอบใช้ Copper radiation $K\alpha$ (ความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม) ใช้ 20-80 องศา อัตราเร็ว 5 mm/min จะแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ย Crystallite Size D (nm) จากการทดสอบ XRD ของ ZnO NPs Commercial grade , ZnO NPs *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP)

Sample	Average Crystallite Size D (nm.)	\pm SD
ZnO NPs Commercial grade	28.691	4.93
ZnO NPs APL	27.374	6.05
ZnO NPs GMP	28.775	5.19



รูปที่ 4.9 XRD pattern ของ ZnO NPs Commercial grade, ZnO NPs *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP)

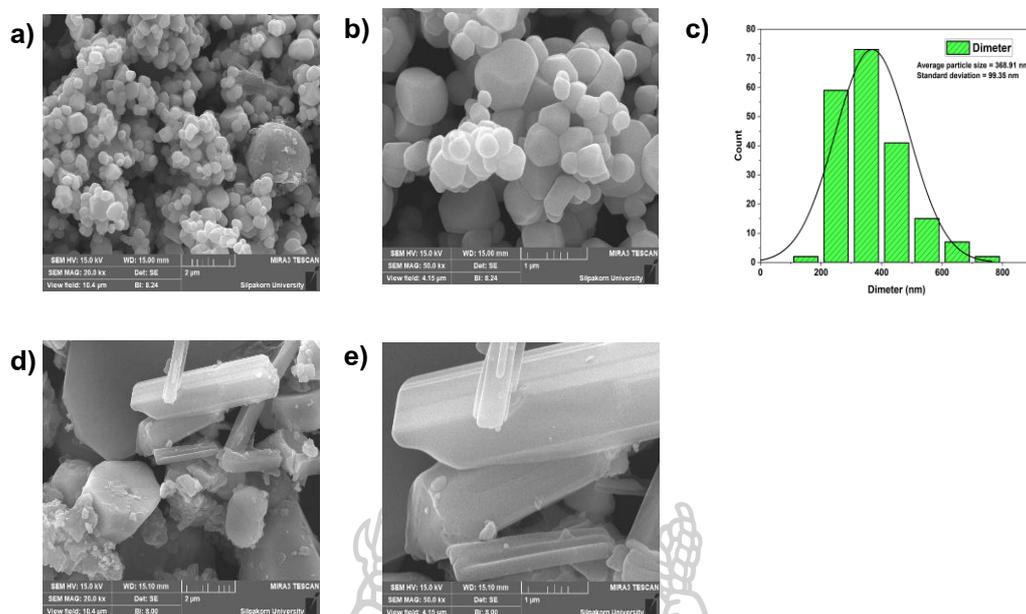
จากรูปที่ 4.9 XRD ที่แสดงการวิเคราะห์ของตัวอย่าง ZnO NPs ทั้งสามประเภท พบว่า จะแสดงพีคที่คมชัดและเด่นที่มุม 2θ ประมาณ 31.9° , 34.6° , 36.4° , 47.5° , 56.6° , 62.9° , 68.0° และ 71.4° ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งพีคของ ZnO แบบ Wurtzite structure ตามมาตรฐาน JCPDS (ชนิด 36-1451) แสดงให้เห็นถึงพีคการกระเจิงที่ตรงกับระนาบผลึกของ ZnO ซึ่งได้แก่ (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (201), (202), (211), และ (212) บ่งชี้ถึงการจัดเรียงตัว ผลึกและความสมบูรณ์ของอนุภาคที่มีขนาดเล็กและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ในส่วนของตารางที่ 4.3 จะพบว่า Average crystallite size D (nm.) ของ ZnO NPs ทั้งสามประเภท จะมีค่าที่ใกล้เคียง กันโดย ZnO NPs มีค่า 28.691, 27.374 และ 28.775 nm ตามลำดับ ซึ่งจะบ่งบอกว่า d-spacing ของ ZnO NPs ที่สังเคราะห์ได้จากสารสกัดสมุนไพรจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับ ZnO NPs Commercial grade สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jaithon และคณะ [35] ที่อธิบายว่าผลของ XRD แสดงให้เห็นถึงโครงสร้าง Wurtzite ของ ZnO NPs นอกจากนี้พีคที่ปรากฏจะมีความเด่นชัดสูงบ่งชี้ ถึงความเป็นผลึกของอนุภาคที่สังเคราะห์ขึ้น ZnO NPs โดยสารสกัดจากสมุนไพร

จะเห็นได้ว่าผลของสารสกัดที่แตกต่างกันในการสังเคราะห์ ZnO NPs ที่ใช้การ สังเคราะห์ทางเคมี ส่งผลให้ขนาดและสัญญาณวิทยาของอนุภาคแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สารประกอบฟีนอลิกจากใบฟ้าทะลายโจรและเปลือกมังคุด จะทำหน้าที่เป็นสารรีดิวซ์ หรือสารทำให้ออกซิไดซ์ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดความเสถียรของ ZnO NPs ที่สังเคราะห์ทางชีวภาพได้

4.1.2.5. การศึกษาสัญญาณวิทยาและวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของอนุภาคนาโน

ซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร

การศึกษาโครงสร้างทางสัญญาณวิทยาและการกระจายขนาดอนุภาคของอนุภาคนาโน ซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพรด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) ที่พลังงาน 5 kV กำลังขยาย 20,00x และ 50,000x โหมด SE ซึ่งตัวอย่างจะถูกเคลือบด้วยธาตุ Au ก่อนนำไปทดสอบและวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยโหมด EDS ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ จะแสดงดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11

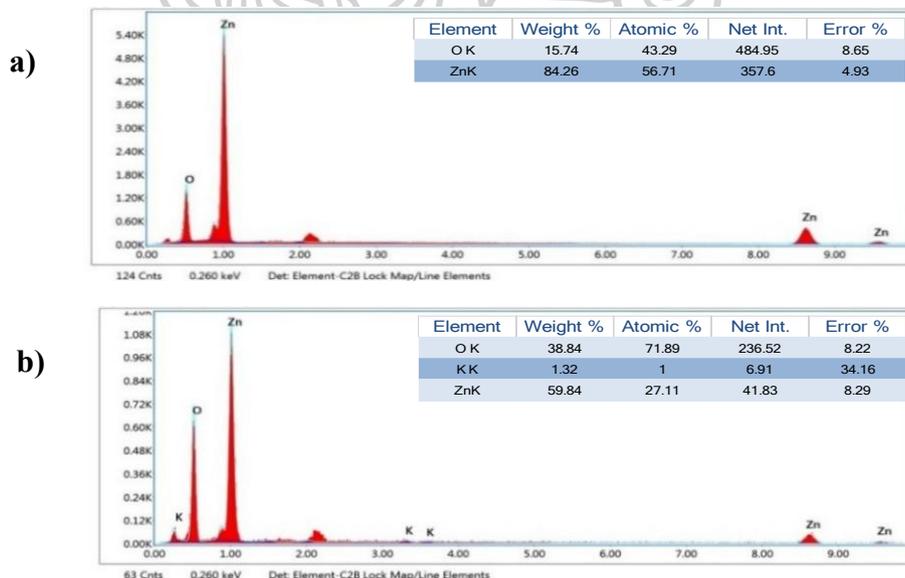


รูปที่ 4.10 ภาพ SEM และการกระจายขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร (a-c) ZnO NPs *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ (d-e) ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP)

ภาพ SEM ในรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าอนุภาค ZnO NPs ที่สังเคราะห์จากการใช้สารสกัดสมุนไพรจากใบฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculate* leaves) (a, b) พบว่าอนุภาค ZnO NPs APL มีลักษณะเป็นทรงกลม โดยมีการรวมกลุ่มกันของอนุภาคทรงกลม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคประมาณ 368.91 ± 99.35 นาโนเมตร ในขณะที่อนุภาค ZnO NPs ที่สังเคราะห์จากสารสกัดสมุนไพรจากเปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana* peels) (d, e) แสดงลักษณะเป็นแท่งเหลี่ยม (Nanorods) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยตามแนวยาวของอนุภาคประมาณ 2479.86 ± 687.16 และตามแนวขวางของอนุภาคประมาณ 669.13 ± 96.38 นาโนเมตร ซึ่งความแตกต่างในลักษณะของอนุภาค ZnO NPs เหล่านี้เกิดจากความแตกต่างในองค์ประกอบทางเคมีของสารสกัดจากสมุนไพรที่ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) ของสารประกอบฟีนอลของสารสกัดสมุนไพรจากใบฟ้าทะลายโจร และสารประกอบฟลาโวนอยด์ของสารสกัดสมุนไพรจากเปลือกมังคุด ซึ่งมีผลต่อรูปทรงการเกิดผลึกของ ZnO NPs

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jaithon และคณะ [35] ที่อธิบายว่าอนุภาค ZnO NPs ของสารสกัดสมุนไพรจาก *Andrographis paniculate* leaves จะมีสารประกอบฟีนอลเป็นสารประกอบ ซึ่งมีโครงสร้างแบบพันธะเดี่ยว (Single bond) จะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) นอกจากนี้สารประกอบฟีนอลในสารสกัดจากใบฟ้าทะลายโจร ทำให้เกิดการก่อตัวของอนุภาคแบบไอโซทรอปิก (Isotropic growth) เมื่อ Zn^{2+} ถูกรีดิวซ์ โดยสารประกอบฟีนอลทำให้ผลึกเติบโตเท่ากัน ทำให้เกิดนิวเคลียส (Nucleation) ของผลึก ZnO เป็นทรงกลม (Spherical shape) ขนาดเล็กที่สม่ำเสมอ

ในขณะที่สารสกัดจาก *Garcinia mangostana* peels มีฟลาโวนอยด์ที่เป็นพันธะคู่ (Double bond) จากโครงสร้างวงอะโรมาติกที่มีพันธะคู่คอนจูเกต จะทำปฏิกิริยากับ Zn^{2+} สอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Raha และคณะ [41] ที่มีการก่อตัวของอนุภาคในลักษณะ Ladder-like structure จับกับผิวผลึกของ $Zn(OH)_2$ โดยฟลาโวนอยด์จะยับยั้งการเติบโต ส่งผลให้ได้อนุภาค ZnO NPs จัดเรียงตัวมีโครงสร้างเป็นแท่งเหลี่ยม (Nanorods) มีโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น และมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่เหมือนกับ ZnO NPs APL ที่โครงสร้างเป็นทรงกลม (Spherical shape) แสดงให้เห็นว่าทั้งสองสารสกัดจากสมุนไพรทั้งสองชนิดนี้จะให้ประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ทางชีวภาพ (Green synthesis) แตกต่างกัน อีกทั้งยังสามารถกำหนดลักษณะของรูปทรงอนุภาค ZnO NPs ได้



รูปที่ 4.11 EDX spectra ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร

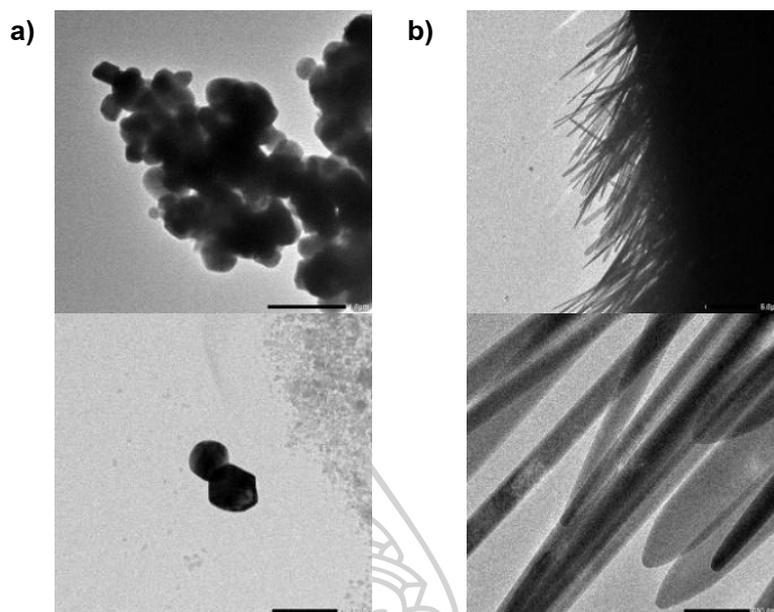
a) ZnO NPs *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ b) ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP)

จากรูปที่ 4.11 EDX spectra ของ ZnO NPs ที่สังเคราะห์ได้จากสารสกัดสมุนไพร
 a) ZnO NPs *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ b) ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP) พบพีคที่ชัดเจนของธาตุสังกะสี (Zn) ในทั้งสองตัวอย่าง ซึ่งบ่งชี้ถึงการมีอยู่ของ ZnO โดย ZnO NPs APL มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของ Zn ที่ 84.25% และเปอร์เซ็นต์อะตอมที่ 56.71% แสดงให้เห็นถึงความเข้มข้นของ ZnO ที่สูง ในขณะที่ ZnO NPs GMP มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของ Zn ที่ 59.84% และเปอร์เซ็นต์อะตอมที่ 27.11% แสดงให้เห็นว่า ZnO NPs APL มี Zn สูงกว่า ZnO NPs GMP

นอกจากนี้ยังพบธาตุออกซิเจน (O) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดออกไซด์ โดย ZnO NPs APL พบว่า O มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก 15.74% และเปอร์เซ็นต์อะตอมที่ 43.29% ในขณะที่ ZnO NPs GMP พบว่า O มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก 38.84% และเปอร์เซ็นต์อะตอมที่ 71.89% งานวิจัยของ Jang, S. และคณะ [42] อธิบายว่าการพบธาตุโพแทสเซียม (K) ใน ZnO NPs GMP อาจเกิดจากสารอินทรีย์ที่มีในเปลือกมังคุด เช่น ปุ๋ยหรือสารเคมีที่อาจตกค้างจากกระบวนการเกษตร ซึ่งสามารถอธิบายการมี K ในตัวอย่างนี้ได้ ดังนั้น การพบธาตุ K ใน ZnO NPs GMP อาจบ่งชี้ถึงการปนเปื้อนจากสารเคมีหรือปุ๋ยที่ใช้ในกระบวนการปลูกมังคุด ซึ่งอาจเป็นผลกระทบที่ทำให้การเกิดโครงสร้างผลึกเป็นแท่งได้

4.1.2.6. การศึกษาสัณฐานวิทยาภายในของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร

การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาภายในและรูปร่างขนาดอนุภาคของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพรด้วยเทคนิค Transmission electron microscope (TEM) ที่พลังงาน 200 kV กำลังขยาย 10,00x และ 20,000x จะแสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ภาพ TEM ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร ZnO NPs
 a) ZnO NPs *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ b) ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP)

จากรูปที่ 4.12 ภาพ TEM ของ ZnO NPs ที่สังเคราะห์ได้จากสารสกัดสมุนไพร ในภาพ a) ZnO NPs *Andrographis paniculata* leaves (ZnO NPs APL) พบว่าอนุภาค ZnO NPs APL มีลักษณะเป็นทรงกลม โดยมีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคทรงกลมอย่างหลวม ๆ สำหรับ ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP) จากภาพ b) พบว่าอนุภาค ZnO NPs GMP มีลักษณะเป็นทรงแท่งเหลี่ยมยาว (Nanorods) สอดคล้องกับงานวิจัยของ [43] และคณะ อนุภาคที่มีลักษณะเป็นทรงแท่งเหลี่ยม (Nanorods) จากการศึกษา ZnO NPs ที่สังเคราะห์จากใบฟ้าทะลายโจร (*Andrographis paniculate* leaves) และเปลือกมังคุด (*Garcinia mangostana* peels) พบว่า ZnO NPs ที่เตรียมจากสารสกัดจากสมุนไพรทั้งสองชนิดมีลักษณะการก่อตัวของรูปทรงอนุภาคที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้จากความแตกต่างของสารประกอบฟีนอลิกที่สกัดได้ คือ สารประกอบฟีนอลที่พบมากจากใบฟ้าทะลายโจร และสารประกอบฟลาโวนอยด์ที่พบมากจากเปลือกมังคุด โดยลักษณะพันธะทางเคมีในสารเหล่านี้ที่มีผลต่อการกำหนดรูปร่างของ ZnO NPs

สารประกอบฟีนอลิกที่สกัดได้จากสมุนไพรจะทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) ในกระบวนการสังเคราะห์ ZnO NPs เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกมีความสามารถในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ง่าย ทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับ Zn^{2+} เกิดเป็น $Zn(OH)_2$ และทำให้เกิดเป็นสารที่มีโครงสร้าง Bioorganic complex ได้อย่างรวดเร็ว จากนั้นเมื่อ $Zn(OH)_2$ ได้รับความร้อนจากการเผาจะสลายตัวเป็น ZnO nano-crystals

สารประกอบฟีนอลที่พบมากจากใบฟ้าทะลายโจร เป็นสารประกอบฟีนอลซึ่งมีโครงสร้างแบบ พันธะเดี่ยว (Single bond) จึงมีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) ที่เหมาะสมต่อการก่อตัวของอนุภาคแบบไอโซทรอปิก (Isotropic growth) เมื่อ Zn^{2+} ถูกรีดิวซ์โดยสารประกอบฟีนอล เนื่องจากสารประกอบฟีนอลไม่มีโครงสร้างที่บังคับทิศทางของการเจริญเติบโตของผลึก (Non-directional bonding) จึงทำให้ผลึกเติบโตเท่า ๆ กันในทุกทิศทาง กลไกนี้ทำให้เกิดการนิวเคลียชัน (Nucleation) ของผลึก ZnO จำนวนมากในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน ส่งผลให้อนุภาคมีแนวโน้มเป็นทรงกลมขนาดเล็กที่สม่ำเสมอ โดยในงานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์ ZnO NPs โดยใช้ตัวรีดิวซ์ที่สกัดจากใบฟ้าทะลายโจรทำให้ได้อนุภาค ZnO NPs ที่มีลักษณะเป็นทรงกลม (Spherical shape) ขนาดเล็ก และมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 368.91 ± 99.35 นาโนเมตร

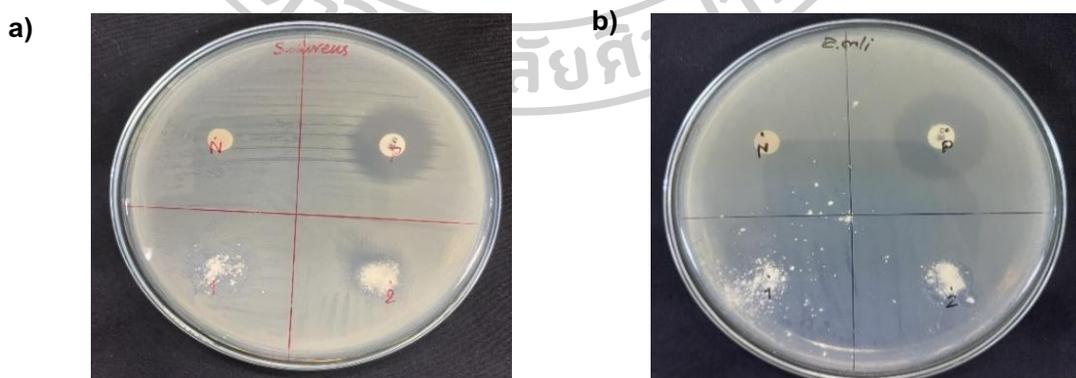
ในขณะที่เปลือกมังคุดจะพบสารประกอบฟลาโวนอยด์ที่มีวงอะโรมาติกซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีพันธะคู่คอนจูเกต (Conjugated double bonds) สามารถจับประสานกับผิวผลึกของ $Zn(OH)_2$ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการสังเคราะห์ได้ในลักษณะเลือกทิศทาง (Selective binding) แบบ Ladder-like structure ทั้งนี้โครงสร้างผลึก ZnO (Wurtzite structure) มีพลังงานผิวไม่เท่ากันในระนาบผลึกต่าง ๆ โดยฟลาโวนอยด์จะจับกับระนาบด้านข้าง (Side facets) และยับยั้งการเติบโตในทิศทางกว้าง แต่ไม่ยับยั้งการเติบโตตามแนว c-axis (แนวยาว) ส่งผลให้การเจริญเติบโตของผลึกไม่เท่ากันในทุกทิศทาง (Anisotropic growth) ดังนั้นผลึก ZnO NPs จึงยึดตัวออกตามแกนเดียว เกิดเป็นรูปร่าง โดยในงานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์ ZnO NPs โดยใช้ตัวรีดิวซ์ที่สกัดจากเปลือกมังคุดทำให้ได้ที่มีโครงสร้างเป็นทรงแท่งเหลี่ยม (Nanorods) มีขนาดเฉลี่ยตามแนวยาวของอนุภาคประมาณ 2479.86 ± 687.16 นาโนเมตร และตามแนวขวางของอนุภาคประมาณที่ 669.13 ± 96.38 นาโนเมตร สอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Raha และคณะ [41] จากการรีดิวซ์ของฟลาโวนอยด์ที่มีพันธะคู่ (Double bond) ของวงอะโรมาติกขนาดใหญ่ ซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) และตัวห่อหุ้ม (Capping agent) ทำให้ควบคุมรูปร่างของขนาดอนุภาคได้ ZnO NPs ที่มีรูปร่างเป็นแท่งเหลี่ยม (Nanorods)

4.1.2.7. การศึกษาต้านเชื้อจุลินทรีย์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร

การทดสอบการต้านเชื้อของเชื้อจุลินทรีย์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากสารสกัดสมุนไพรด้วยวิธี Disc diffusion method จากแบคทีเรียแกรมบวก (G+) *Staphylococcus aureus* ATCC 6538 และแบคทีเรียแกรมลบ (G-) *Escherichia coli* TISTR 073 โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM E2180 โดยใช้ตัวควบคุมเป็น *Chloramphenicol* จะแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.4 การต้านเชื้อจุลินทรีย์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากสารสกัดจากสมุนไพร

Sample	Zone of Inhibition index					
	(G+) <i>Staphylococcus aureus</i>			(G-) <i>Escherichia coli</i>		
	1	2	3	1	2	3
ZnO NPs APL	1.500	1.500	1.490	0.667	0.733	0.667
Mean	1.497			0.689		
±SD	0.006			0.038		
ZnO NPs GMP	1.960	1.960	2.000	1.250	1.250	1.271
Mean	1.973			1.257		
±SD	0.023			0.012		



รูปที่ 4.13 การต้านเชื้อจุลินทรีย์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากสารสกัดสมุนไพร (1) ZnO NPs *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ (2) ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP) ต่อเชื้อ a) *S. aureus* และ b) *E. coli*

การทดสอบการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้จากสารสกัดสมุนไพร a) ZnO NPs *Andrographis paniculate* leaves (ZnO NPs APL) และ b) ZnO NPs *Garcinia mangostana* peels (ZnO NPs GMP) ทดสอบด้วยวิธี Disc diffusion method จากแบคทีเรียแกรมบวก *S. aureus* และแบคทีเรียแกรมลบ *E. coli* จากตารางที่ 4.4 พบว่า ZnO NPs ทั้งสองจะมีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อได้ดี

การทดสอบการต้านเชื้อ *S. aureus*

จากรูปที่ 4.13 พบว่ามี Zone of Inhibition index ในการต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก *Staphylococcus aureus* ของ ZnO NPs APL อยู่ที่ 1.497 ± 0.006 และ ZnO NPs GMP อยู่ที่ 1.973 ± 0.023 เมื่อทำการเปรียบเทียบ ZnO NPs APL และ ZnO NPs GMP พบว่า ZnO NPs พบว่า ZnO NPs GMP ที่สังเคราะห์ได้จะมีการต้านเชื้อของแกรมแบคทีเรียแกรมบวก *Staphylococcus aureus* ได้ดีกว่าจากโซนของการต้านเชื้อที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัด

การทดสอบการต้านเชื้อ *E. coli*

พบว่ามี Zone of Inhibition index ในการต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ *Escherichia coli* ของ ZnO NPs APL อยู่ที่ 0.689 ± 0.038 และ ZnO NPs GMP อยู่ที่ 1.257 ± 0.012 ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 4.13 จะแสดงให้เห็นโซนในการยับยั้งเชื้อได้เป็นอย่างดี จะเห็นได้ว่า ZnO NPs GMP มีประสิทธิภาพในการยับยั้งได้ดีกว่า ZnO NPs APL จากโซนการยับยั้งเชื้อที่แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dappula และคณะ [34] จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการต้านเชื้อแบคทีเรียได้เป็นอย่างดี จากการปล่อยกลไกทางเคมีของ Zn^{2+} และ ROS จาก ZnO

เมื่อทำการเปรียบเทียบ ZnO NPs APL มีลักษณะเป็นทรงกลมส่วนใหญ่ (Sphere) และ ZnO NPs GMP แสดงลักษณะเป็นรูปทรงคล้ายแท่ง (Nanorods) พบว่า ZnO NPs GMP ที่สังเคราะห์ได้จะมีประสิทธิภาพต่อการต้านเชื้อแบคทีเรียทั้ง *S. aureus* และ *E. coli* ที่ดีกว่า ZnO NPs APL โดยเฉพาะแบคทีเรียแกรมลบ *E. coli* จะแสดงความแตกต่างได้ชัดเจน จากงานวิจัยของ Rahul Goyal [43] และคณะอธิบายไว้ว่า ZnO NPs แบบ Nanorods ต้าน *E. coli* ได้ดีกว่านั้น จากกลไกการทำลายเชิงกายภาพ (Mechanical damage) โดยลักษณะรูปทรงของ ZnO NPs GMP แบบ Nanorods ซึ่งมีพื้นที่สัมผัสเพิ่มขึ้นจากปลายแหลมของอนุภาค ทำให้มีโอกาสสูงในการสัมผัสกับชั้นเมมเบรนของ *E. coli* ที่เป็นเกราะป้องกันหลัก Nanorods จะเพิ่มพื้นที่สัมผัส และสามารถเหนี่ยวนำปฏิกิริยาระหว่างไอออนของ ZnO NPs กับไอออนในเมมเบรนของแบคทีเรีย โดย

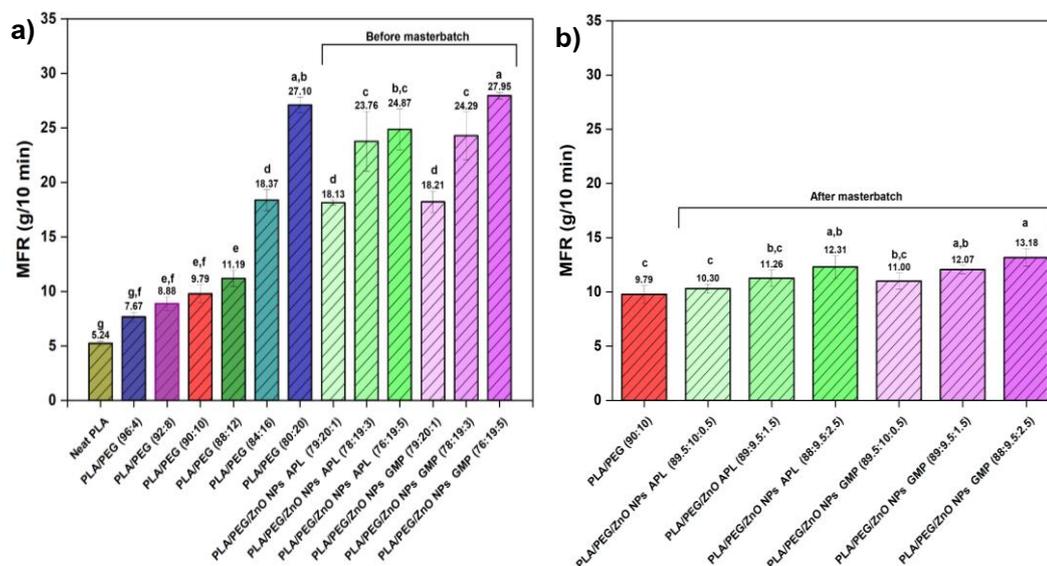
แบคทีเรียจะมีการเคลื่อนที่ ซึ่งเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกับปลายแหลม (Tip) ของ Nanorods ทำให้ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างผนังเซลล์และเมมเบรนของแบคทีเรียได้ นอกจากนี้ยังมีกลไกทางเคมี จากการปล่อย Zn^{2+} และ ROS จาก ZnO NPs ซึ่งจะไปทำลายโครงสร้างของเมมเบรนแบคทีเรีย และกระตุ้นการเกิด Oxidative stress ในเซลล์แบคทีเรีย ส่งผลให้เซลล์แบคทีเรียเกิดการเสียหายและตาย

4.2. การศึกษาฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

ในงานวิจัยในตอนที 2 นี้จะเป็นการศึกษาฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอลและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ส่งผลต่อสมบัติดัชนีการไหล สมบัติทางเคมี สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพพื้นฐานวิทยา และการต้านเชื้อจุลชีพ จะแบ่งออกเป็น 6 ส่วน เพื่อนำไปเป็นแนวทางพัฒนาเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์แบบแอคทีฟที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารได้

4.2.1. การศึกษาค่าดัชนีการไหลของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

เนื่องจากต้องมีการวิเคราะห์ข้อมูลดัชนีการไหลของวัสดุเสริมองค์ประกอบเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม ทำให้ทราบว่าต้องมีการขึ้นรูป 2 ครั้ง เพื่อในการปรับปรุงในการขึ้นรูป และเพิ่มการกระจายตัว ทดสอบ MFI ตามมาตรฐาน ASTM D1238 ใช้ load cell ขนาด 2.16 kg และอุณหภูมิในการทดสอบ 190 °C ตัวอย่างจะแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 MFR ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) a) ดัชนีการไหลของเม็ดวัสดุผสม PLA/PEG และ PLA/PEG/ZnO ก่อนกระบวนการ masterbatch และ b) ดัชนีการไหลของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบ PLA/PEG/ZnO หลังการทำ masterbatch

จากรูปที่ 4.14 ในรูป a) ดัชนีการไหลของเม็ดวัสดุผสม PLA/PEG และ PLA/PEG/ZnO ก่อนกระบวนการ masterbatch โดยการเปรียบเทียบระหว่าง PLA/PEG ที่อัตราส่วน 100:0, 96:4, 92:8, 90:10, 88:12, 84:16 และ 80:20 %wt ตามลำดับ และ PLA/PEG ที่เติม ZnO NPs ที่ 1, 3, และ 5 %wt ที่อัตราส่วน 79.20/19.8/1, 77.60/19.4/3 และ 76.00/19.00/5 %wt ตามลำดับ พบว่าการเพิ่ม PEG และ ZnO NPs ลงใน PLA/PEG ส่งผลให้ค่า MFR เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้ Neat PLA มีค่า MFR ต่ำที่สุดที่ 5.24 g/10 min แสดงให้เห็นว่า Neat PLA มีการไหลที่ต่ำที่สุดในกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด แต่เมื่อมีการเพิ่ม PEG ในอัตราส่วน 96:4 ทำให้ค่า MFR เพิ่มขึ้นมาเป็น 7.67 g/10 min ค่า MFR ที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่า PEG ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและการไหลของวัสดุ เนื่องจาก PEG เป็นสารที่มีความสามารถในการทำให้พลาสติกมีความยืดหยุ่นมากขึ้น เมื่อเพิ่ม PEG ในอัตราส่วน 92:8 ค่า MFR เพิ่มขึ้นเป็น 8.88 g/10 min เพิ่ม PEG ในอัตราส่วน 90:10 ค่า MFR เพิ่มขึ้นเป็น 9.79 g/10 min ซึ่งแสดงว่าอัตราส่วน PEG ที่เพิ่มขึ้นทำให้การไหลของวัสดุดีขึ้น

การเติม PEG ในอัตราส่วน 88:12 ค่า MFR เพิ่มขึ้นเป็น 11.19 g/10 min เติม PEG ในอัตราส่วน 84:16 ค่า MFR เป็น 18.37 g/10 min และที่เติม PEG ในอัตราส่วน 80:20 พบว่าค่า

MFR เพิ่มขึ้นเป็น 27.10 g/10 min ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดในอัตราส่วน PLA /PEG อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของการไหลอย่างมากเมื่อมีการเติม PEG ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Guo, J. และคณะ[44] ที่อธิบายว่า PEG จะทำหน้าที่เป็นสารทำให้พลาสติกอ่อนตัว ซึ่งการเป็น Plasticizer ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น เพิ่มความยืดหยุ่น และลดความหนืดของการหลอมเหลว ส่งผลให้ MFR สูงขึ้น

สำหรับการเติม ZnO NPs พบว่า PLA/PEG/ZnO NPs APL และ PLA/PEG/ZnO NPs GMP (79.20/19.8/1) ตัวอย่างนี้มีค่า MFR เท่ากับ 18.13 และ 18.21 g/10 min ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติม 1% ZnO NPs เข้าไปช่วยลดการไหลของวัสดุได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่เติม PEG เพียงอย่างเดียวที่อัตราส่วน 80:20 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hadi, N. และคณะ [45] ที่อธิบายว่าอนุภาค ZnO NPs จะทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม (Filler) ซึ่งไปจำกัดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เพิ่มความหนืดขณะหลอมเหลว ส่งผลทำให้ MFR ลดลงแต่เมื่อทำการเติม ZnO NPs เป็น 3% และ 5% จะทำให้มีค่า MFR ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดย ทั้ง PLA/PEG/ZnO NPs APL และ GMP (77.60/19.4/3) จะมีค่าตัวอย่างนี้มีค่า MFR เท่ากับ 23.76 และ 24.29 g/10 min สำหรับ PLA/PEG/ZnO NPs APL และ GMP (76.00/19.00/5) จะมีค่าตัวอย่างนี้มีค่า MFR เท่ากับ 24.87 และ 27.95 g/10 min ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติม ZnO NPs เข้าไปทำให้การไหลของวัสดุสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อาจเกิดจากการที่ ZnO NPs ช่วยปรับปรุงการกระจายตัวของวัสดุ และลดความหนืด จึงทำให้ค่า MFR เพิ่มขึ้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบพบว่า การเพิ่มพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) ลงในเมทริกซ์หลัก คือพอลิแล็กติกแอซิด (PLA) จะทำให้ค่า MFR มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่อเพิ่มที่อัตราส่วน PLA/PEG (80:20) จะมีค่าการไหลของวัสดุ (MFR) ที่ 27.10 g/10 min และเมื่อทำการเติม ZnO NPs แม้จะช่วยเพิ่มการกระจายตัวและปรับปรุงค่าการไหลของวัสดุได้ในตอนแรก แต่การเติม ZnO NPs มากไปทำให้ค่า MFR เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลทำให้ยากต่อการขึ้นรูปฟิล์ม เนื่องจากการขึ้นรูปฟิล์มต้องการวัสดุที่มีการไหลที่เหมาะสมและความหนืดต่ำเพื่อให้สามารถขึ้นรูปได้ง่าย

ดังนั้น การทำ Master batch จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการแก้ไขปัญหาี้ โดยการทำให้ Master batch จะช่วยให้การผสมสารต่าง ๆ เช่น ZnO NPs หรือ PEG กับวัสดุหลักทำได้ง่ายขึ้น และมีการกระจายตัวที่ดีกว่า โดยการทำให้ Master batch จะนำ PLA/PEG/ZnO NPs ที่อัตราส่วน

79.2/19.8/1, 77.6/19.4/3 และ 76/19/5 %wt ตามลำดับ มาทำเป็น Masterbatch โดยนำมาผสมกับ Neat PLA ที่อัตราส่วน 1:1 %wt เพื่อให้ง่ายต่อการขึ้นรูปและเพิ่มการกระจายตัวของ ZnO NPs จากใบฟ้าทะลายโจรและเปลือกมังคุดมากขึ้นจะทำให้ได้ PLA/PEG/ZnO NPs ที่อัตราส่วน 89.5/10/0.5, 89/9.5/1.5 และ 88/9.5/2.5 %wt ตามลำดับ

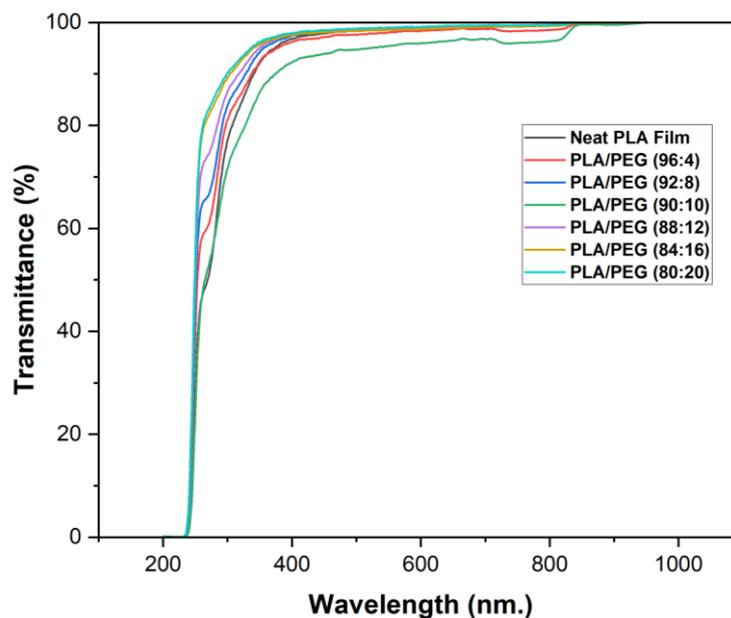
จากรูป b) ดัชนีการไหลของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบ PLA/PEG/ZnO หลังการทำ masterbatch พบว่า MFR ที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ค่า MFR ของ PLA/PEG/ZnO NPs APL จะมีค่าเท่ากับ 10.30, 11.26 และ 12.31 ในส่วนของ PLA/PEG/ZnO NPs GMP จะมีค่าเท่ากับ 11.00, 12.07 และ 13.18 ตามลำดับ ซึ่งจะใกล้เคียงกับสูตร PLA/PEG ในอัตราส่วน 90:10 มีค่า MFR เป็น 9.79 g/10 min ทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rahman, M. และคณะ[46] ที่อธิบายว่าจากการใช้ Master batch สามารถควบคุมปริมาณของสารต่าง ๆ ที่เติมได้อย่างดี ช่วยเพิ่มความหนืดในกระบวนการผลิต และทำให้วัสดุมีสมบัติที่เหมาะสมกับการขึ้นรูปฟิล์มได้ดีขึ้น การทำ Master batch ยังช่วยให้สามารถควบคุมการกระจายตัวของ ZnO NPs ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้เกิดการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและช่วยเพิ่มการไหลของวัสดุ จึงเป็นวิธีที่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุและทำให้กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มดีขึ้นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

4.2.2. การศึกษาสมบัติทางเคมีของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

4.2.2.1. การศึกษาการการส่องผ่านแสงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

การศึกษาการส่องผ่านแสงของการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer จะใช้ความยาวคลื่นตั้งแต่ 200-1000 nm แสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.16

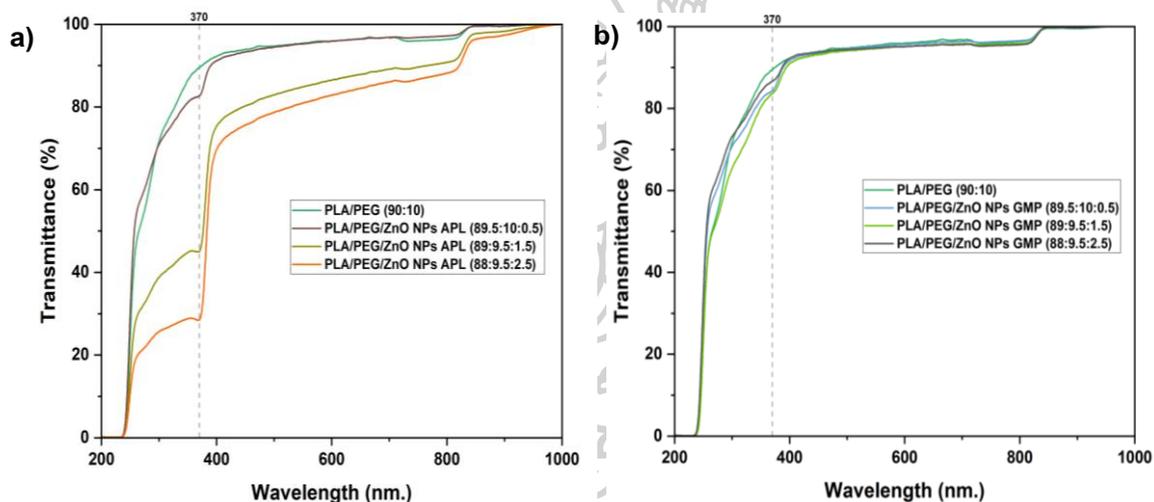


รูปที่ 4.15 UV-Vis spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG)

จากรูปที่ 4.15 UV-Vis spectra ของฟิล์มที่วัดการส่องผ่านแสง (%Transmittance) สามารถอธิบายได้ว่า Neat PLA Film จะแสดงการส่องผ่านแสงที่ต่ำที่สุด ซึ่งแสดงว่า Neat PLA มีการดูดกลืนแสงในช่วงนี้ได้ดี ทำให้การส่องผ่านแสงมีค่าที่ต่ำ เมื่อเติม PEG ในอัตราส่วน 96:4 มีการส่องผ่านแสงที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับการเติม PEG ในอัตราส่วน 92:8 การส่องผ่านแสงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และพบว่า PLA/PEG (90:10) จะมีการส่องผ่านแสงที่ลดลง จากงานวิจัยของ Phuangthong, P และคณะ [47] ที่อธิบายว่าอาจจะเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ระหว่าง PLA และ PEG ที่ดี ทำให้ฟิล์มมีความเข้มที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่า % Transmittance ลดลงในช่วงที่ส่องผ่านแสง ทำให้แสงสามารถผ่านได้น้อยลงเมื่อเทียบกับ Neat PLA

ในส่วนของ PLA/PEG (88:12) พบว่าการส่องผ่านแสงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มตัวอย่างก่อนหน้า สำหรับ PLA/PEG (84:16) การส่องผ่านแสงเพิ่มขึ้น และการเติม PEG ที่มากที่สุด (80:20) ส่งผลให้การส่องผ่านแสงมากที่สุดในกลุ่มทั้งหมด การส่องผ่านแสง PLA/PEG (80:20) แสดงให้เห็นถึงการส่องผ่านที่สูงที่สุดในช่วงฟิล์มทั้งหมดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ

การเพิ่ม PEG ลงใน PLA/PEG ช่วยเพิ่มการส่องผ่านแสง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากโครงสร้างของ PEG สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gao, H. และคณะ [48] ที่อธิบายไว้ว่าเนื่องจาก PEG ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่น Plasticizer ทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) ของฟิล์ม PLA/PEG และควบคุมขนาดของผลึกไม่ให้อายุเกินไปจนเกิดการกระเจิงแสง (Light scattering) แต่เมื่อ PEG ในอัตราส่วนที่ 90:10 ฟิล์มจะมีความทึบแสงมากขึ้นทำให้การส่องผ่านลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ให้การสร้างผลึกสอดคล้องกับงานวิจัยของ [49] และคณะที่อธิบายว่าโครงสร้างผลึกขนาดใหญ่เหล่านี้จะทำการกระเจิงแสงในย่านแสงที่มองเห็นทำให้ฟิล์มดูขุ่นหรือขาวขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่า % Transmittance ลดลง



รูปที่ 4.16 UV-Vis spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) a) PLA/PEG/ZnO NPs จาก *Andrographis paniculate* leaves และ b) PLA/PEG/ZnO NPs จาก *Garcinia mangostana* peels

ในรูปที่ 4.16 UV-Vis spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบ PLA/PEG/ZnO NPs จาก *Andrographis paniculate* leaves (APL) และ *Garcinia mangostana* peels (GMP) ที่มีอัตราส่วน 89.5/10/0.5, 89/9.5/1.5 และ 88/9.5/2.5 %wt ของ ZnO NPs พบว่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มที่มีการผสม ZnO NPs เข้ากับ PLA/PEG โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงคลื่น 370 nm ซึ่งเป็นจุดที่ ZnO NPs จะมีการดูดกลืนแสงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shanshool, H. และคณะ [50] ที่แสดงให้เห็น ZnO NPs เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานกว้าง (Wide Band Gap) ที่ 3.37 eV ทำให้เป็นสารดูดกลืน UV-A ที่มีประสิทธิภาพ

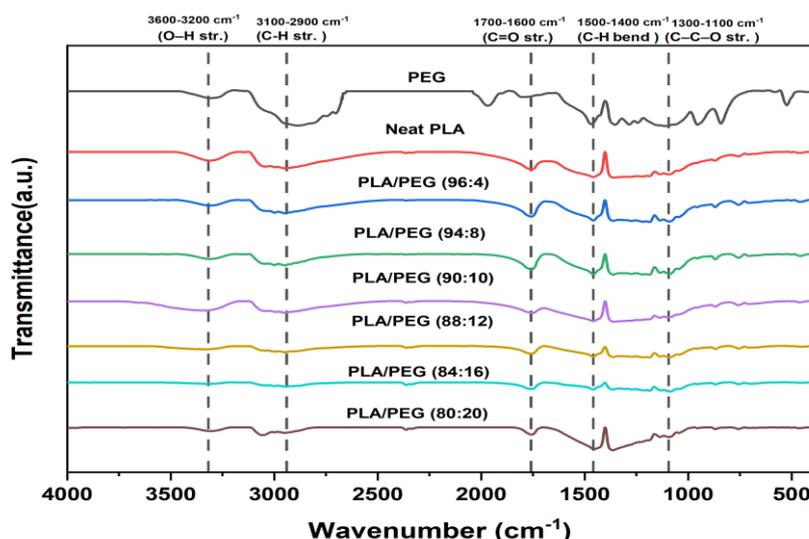
ในรูปที่ 4.16 a) พิล์ม PLA/PEG/ZnO NPs ที่ได้จาก *Andrographis paniculate* leaves (APL) พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ ZnO NPs จาก 0.5% เป็น 2.5% การส่งผ่านแสงของฟิล์มจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม PLA/PEG (90:10) โดยการลดลงนี้แสดงให้เห็นว่า ZnO NPs APL ที่มีปริมาณสูงขึ้นมีผลต่อการกระจายตัวและการดูดกลืนแสง ซึ่งอาจเกิดจากอนุภาค ZnO NPs APL มีขนาดเล็กและลักษณะการกระจายตัวไม่ต่อเนื่องมีการเกาะกลุ่มกัน ทำให้เกิดลดลงของการส่งผ่านแสงนี้ทำให้ฟิล์มมีความทึบแสงมากขึ้น จากงานวิจัยของ Oivanen, M. และคณะ [51] ที่สามารถสนับสนุนได้ว่าสำหรับนาโนคอมโพสิตที่มีอนุภาคนาโนขนาดเล็กและกระจายตัวไม่ต่อเนื่องทำให้เกิดการรวมตัวกันเกาะกลุ่มกันเกิดความขุ่น เป็นผลมาจากการกระเจิงแสงแบบเรย์ลีย์ (Rayleigh Scattering) ของวัสดุที่มีดัชนีหักเหต่างกัน (Refractive index mismatch) ทำให้ฟิล์มมีความขุ่นขึ้นส่งผลทำให้ค่าส่งผ่านแสงลดลง

ในรูปที่ 4.16 b) พิล์ม PLA/PEG/ZnO NPs ที่ได้จาก *Garcinia mangostana* peels (GMP) ฟิล์มจะแสดงการส่งผ่านแสงที่ค่อนข้างคงที่ไม่ว่าจะมีการเพิ่มปริมาณ ZnO NPs การเปลี่ยนแปลงในปริมาณ ZnO NPs จาก 0.5% เป็น 2.5% แทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อ การส่งผ่านแสงของฟิล์ม ซึ่งบ่งชี้ว่า ZnO NPs จาก GMP มีการกระจายตัวที่ดี ไม่เกิดการรวมตัวกัน และมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ การส่งผ่านแสงที่ไม่ลดลงแม้จะเพิ่มปริมาณ ZnO NPs ขึ้น แสดงให้เห็นว่า ZnO NPs จาก GMP อาจจะเป็นข้อดีทำให้ฟิล์มจาก PLA/PEG/ZnO NPs GMP มีความโปร่งใสและเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการสมบัติทางแสงที่ดี

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเติม ZnO NPs จาก APL และ GMP ชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างในการกระจายตัว และผลต่อการส่งผ่านแสงของ ZnO NPs ที่ได้จากสมุนไพรทั้งสองชนิด โดย ZnO NPs จาก GMP แสดงถึงการกระจายตัวที่สม่ำเสมอและมีผลต่อการส่งผ่านแสงน้อย เมื่อเทียบกับ ZnO NPs จาก APL ซึ่งการเพิ่มปริมาณ ZnO ในฟิล์มจาก APL ส่งผลให้การส่งผ่านแสงลดลงอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อาจจะเป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพหรือโครงสร้างของ ZnO NPs ที่แตกต่างกัน ดังนั้นจากการเปรียบเทียบนี้ฟิล์ม PLA/PEG/ZnO NPs ที่ใช้ ZnO จาก *Garcinia mangostana* แสดงถึงประสิทธิภาพที่ดีกว่าในแง่ของการรักษาความโปร่งใสของฟิล์ม แม้จะเพิ่มปริมาณ ZnO NPs ขณะที่ฟิล์มที่ใช้ ZnO NPs จาก *Andrographis paniculate* แสดง การลดลงของการส่งผ่านแสงเมื่อเพิ่ม ZnO NPs ซึ่งอาจทำให้ฟิล์มมีสมบัติที่ไม่เหมาะสมในการใช้งานที่ต้องการการส่งผ่านแสงสูง

4.2.2.2. การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

การศึกษาเอกลักษณ์หมู่ฟังก์ชันของการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ในฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy จะใช้ความยาวคลื่นตั้งแต่ $4000-400\text{ cm}^{-1}$ ใช้โหนด Transmittance เพื่อดูการสั่นไหวของหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) แสดงดังรูปที่ 4.17 และ 4.18



รูปที่ 4.17 FTIR-spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

จากรูปที่ 4.17 กราฟ FTIR-spectra ของฟิล์ม PLA/PEG ที่อัตราส่วน 100:0, 96:4, 92:8, 90:10, 88:12, 84:16 และ 80:20 %wt ตามลำดับ แสดงผลการสั่นไหวของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ในฟิล์ม PLA และ PLA/PEG ที่มีอัตราส่วน PEG แตกต่างกัน สังเกตเห็นได้ว่า การสั่นไหวของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นในช่วงคลื่นต่าง ๆ มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนเมื่อมีการเติม PEG ลงใน PLA

พีกที่บริเวณ $3600-3200\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นการสั่นไหวของหมู่ไฮดรอกซิล (O-H stretch) ใน PEG พบว่าเมื่อเติม PEG ลงใน PLA จะทำให้เกิดการเลื่อนตำแหน่ง (Shift) ไปที่ความถี่ต่ำกว่า โดยพีกนี้จะเลื่อนไปอยู่ที่ประมาณ $3400-3200\text{ cm}^{-1}$ เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen

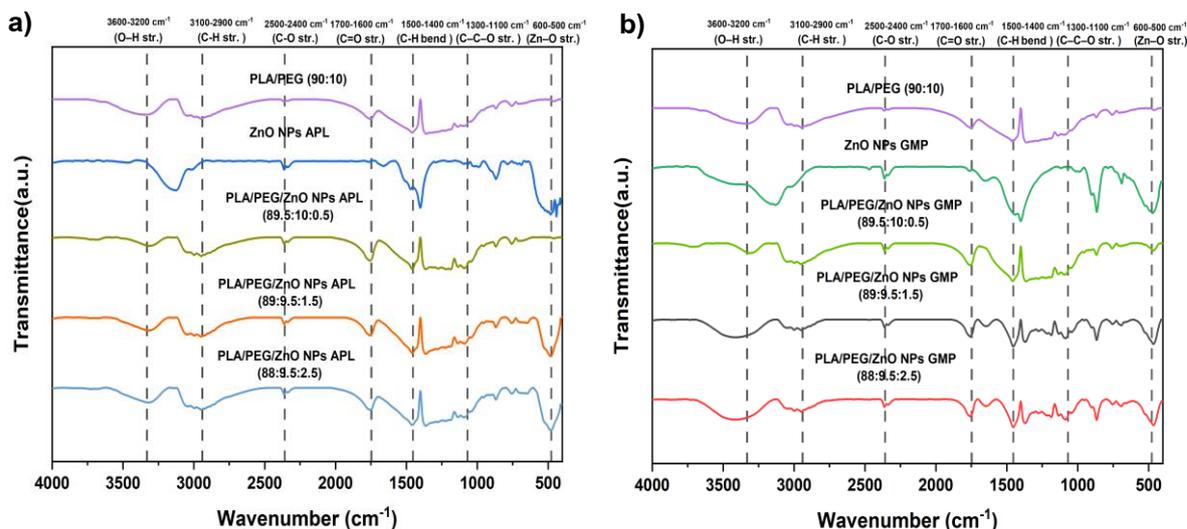
bonding) ระหว่างหมู่ O-H ของ PEG และหมู่ C=O (Carbonyl) ของ PLA การเกิดพันธะนี้บ่งชี้ว่า PLA และ PEG เข้ากันได้ นอกจากนี้ ยังมีการเปลี่ยนแปลงที่พีค 1700-1600 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นไหวของพันธะคาร์บอน-ออกซิเจน (C=O stretch) โดยการเพิ่ม PEG จะทำให้ความเข้มของพีคลดลง เนื่องจากการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่าง PEG และ PLA ที่ทำให้พันธะ C=O ของ PLA เปลี่ยนแปลงไป

พีคที่บริเวณ 3100-2900 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นไหวของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน (C-H stretch) ที่มีความสัมพันธ์กับการสั่นไหวของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน ในโครงสร้างของ PLA และ PEG พบว่าเมื่อมีการเติม PEG ลงใน PLA จะทำให้การสั่นไหวในช่วงนี้มีความชัดเจนมากขึ้น แสดงถึงการปรับตัวของพันธะ C-H ที่มีอยู่ใน PEG ซึ่งการเพิ่ม PEG จะทำให้โครงสร้างฟิล์มมีความยืดหยุ่นและสามารถรับแรงต่างๆ ได้ดีขึ้น

พีคที่บริเวณ 1700-1600 cm^{-1} เป็นการสั่นไหวของพันธะคาร์บอน-ออกซิเจน (C=O stretch) ที่เกี่ยวข้องกับการสั่นไหวของพันธะในหมู่คาร์บอนิล การสั่นไหวในช่วงนี้จะชัดเจนมากขึ้น ในตัวอย่าง PLA/PEG ที่มีการเติม PEG โดยแสดงถึงการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มคาร์บอนิลใน PLA กับ PEG โดยการเพิ่ม PEG จะทำให้การสั่นไหวของพันธะนี้มีความเข้มข้นที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shin, H., et al. และคณะ [36] ที่อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างและความสัมพันธ์ของพันธะคาร์บอน-ออกซิเจนภายในฟิล์มสุดท้าย

พีคที่บริเวณ 1500-1400 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นไหวของพันธะคาร์บอน-ไฮโดรเจน (C-H bend) การสั่นไหวในช่วงนี้จะเพิ่มขึ้นในตัวอย่างที่มีการเติม PEG และแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของพันธะ C-H ซึ่งการเพิ่ม PEG ในอัตราส่วนต่าง ๆ จะส่งผลให้การสั่นไหวของพันธะ C-H มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงในการสั่นไหวของหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้แสดงถึงการมีปฏิสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่าง PLA และ PEG ซึ่งการเพิ่ม PEG ในอัตราส่วนต่าง ๆ จะส่งผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางเคมีของฟิล์ม PLA/PEG ต่อไป

พีกที่บริเวณ $1300-1100\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นไหวของ C-O ในพันธะเอสเทอร์ของ PLA (C-O stretch) และการสั่น C-O-C ในพันธะอีเทอร์ของ PEG (C-O-C stretch) การเปลี่ยนแปลงนี้บ่งชี้ถึงการเข้ากันได้ (Compatible) ระหว่าง PLA และ PEG ที่เกิดระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ทั้งสอง



รูปที่ 4.18 FTIR-spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) a) PLA/PEG/ZnO NPs จาก *Andrographis paniculate leaves* และ b) PLA/PEG/ZnO NPs จาก *Garcinia mangostana peels*

จาก FTIR-spectra ในรูปที่ 4.18 ของฟิล์ม PLA/PEG/ZnO NPs ที่อัตราส่วน 89.5/10/0.5, 89/9.5/1.5, 88/9.5/2.5 %wt จาก *Andrographis paniculate leaves* a) และ *Garcinia mangostana peels* b) แสดงถึงการสั่นไหวของหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในช่วงต่าง ๆ ที่คล้ายคลึงกับฟิล์ม PLA/PEG (90:10) แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่ม ZnO NPs ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนในช่วง $400-600\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพีกที่เกี่ยวข้องกับการสั่นไหวของกลุ่ม Zn-O stretching ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vannozzi, L. และคณะ [52] ที่แสดงถึงการมี ZnO NPs ในฟิล์มและการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างที่เกิดขึ้นจากการเติม ZnO NPs ลงในฟิล์ม PLA/PEG โดยพีกนี้จะเห็นได้อย่างชัดเจนในทั้งกราฟ (a) และ (b) ซึ่งบ่งชี้ถึงการมี ZnO NPs ที่มีความบริสุทธิ์และกระจายตัวในฟิล์มอย่างมีประสิทธิภาพ การสั่นไหวของ ZnO ในช่วงนี้แสดงถึงการมีโครงสร้าง

ผลึกที่ดีของ ZnO NPs ซึ่งมีผลในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของฟิล์ม เช่น ความทนทานต่อการยืดและความทนทานต่อแรงได้อย่างดี

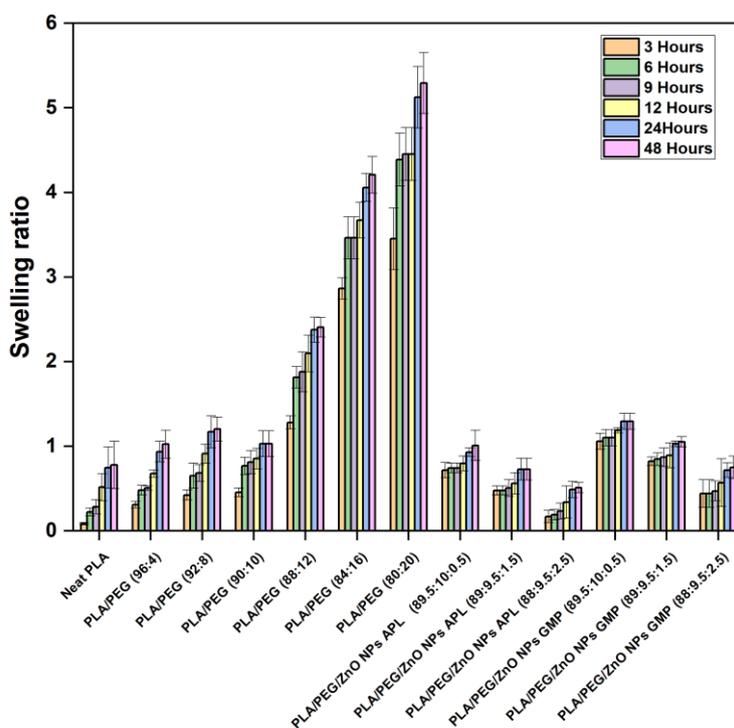
4.2.2.3. การศึกษาการบวมตัวของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

การศึกษาการบวมตัวของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D570 ใช้น้ำกลั่น 100 ml ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3, 6, 9, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง จะแสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.19

ตารางที่ 4.5 การบวมตัวของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

Sample	3 Hours	6 Hours	9 Hours	12 Hours	24Hours	48 Hours
Neat PLA	0.08 ± 0.02	0.22 ± 0.05	0.28 ± 0.08	0.52 ± 0.16	0.75 ± 0.24	0.78 ± 0.28
PLA/PEG (96:4)	0.31 ± 0.04	0.48 ± 0.06	0.50 ± 0.03	0.68 ± 0.04	0.94 ± 0.12	1.03 ± 0.17
PLA/PEG (92:8)	0.42 ± 0.06	0.65 ± 0.15	0.68 ± 0.10	0.91 ± 0.11	1.17 ± 0.19	1.20 ± 0.14
PLA/PEG (90:10)	0.46 ± 0.05	0.77 ± 0.10	0.81 ± 0.14	0.85 ± 0.12	1.03 ± 0.15	1.03 ± 0.15
PLA/PEG (88:12)	1.28 ± 0.08	1.81 ± 0.13	1.88 ± 0.24	2.10 ± 0.22	2.38 ± 0.15	2.41 ± 0.12
PLA/PEG (84:16)	2.87 ± 0.13	3.46 ± 0.25	3.46 ± 0.25	3.67 ± 0.21	4.06 ± 0.17	4.21 ± 0.22
PLA/PEG (80:20)	3.45 ± 0.36	4.39 ± 0.31	4.45 ± 0.31	4.45 ± 0.31	5.13 ± 0.36	5.29 ± 0.36
PLA/PEG/ZnO NPs APL (89.5:10:0.5)	0.72 ± 0.09	0.74 ± 0.06	0.74 ± 0.06	0.80 ± 0.09	0.93 ± 0.05	1.01 ± 0.18
PLA/PEG/ZnO NPs APL (89:9.5:1.5)	0.48 ± 0.05	0.48 ± 0.05	0.51 ± 0.10	0.56 ± 0.13	0.73 ± 0.13	0.73 ± 0.13

Sample	3 Hours	6 Hours	9 Hours	12 Hours	24Hours	48 Hours
PLA/PEG/ZnO NPs APL (88:9.5:2.5)	0.17 ± 0.07	0.19 ± 0.06	0.23 ± 0.10	0.34 ± 0.19	0.49 ± 0.09	0.51 ± 0.06
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89.5:10:0.5)	1.06 ± 0.09	1.10 ± 0.10	1.10 ± 0.10	1.19 ± 0.03	1.30 ± 0.09	1.30 ± 0.09
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89:9.5:1.5)	0.82 ± 0.05	0.85 ± 0.08	0.87 ± 0.11	0.89 ± 0.15	1.03 ± 0.03	1.05 ± 0.06
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (88:9.5:2.5)	0.44 ± 0.16	0.44 ± 0.16	0.47 ± 0.12	0.57 ± 0.28	0.72 ± 0.09	0.75 ± 0.13



รูปที่ 4.19 การบวมตัวของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

จากการทดสอบ Swelling ratio ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบ PLA/PEG และ PLA/PEG/ZnO NPs ที่แสดงในตาราง 4.5 และรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์ม เมื่อแช่ในน้ำเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ตั้งแต่ 3–48 ชั่วโมง โดยสังเกตได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ PEG ในโครงสร้างของ PLA ส่งผลให้วัสดุมี Swelling ratio สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในสูตรที่มี PEG ปริมาณสูง เช่น PLA/PEG (80:20) มี Swelling ratio สูงสุดที่ประมาณ 5.29 ± 0.36 หลังจาก

แช่ในน้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการดูดซับน้ำที่ดี เมื่อเทียบกับสูตร Neat PLA ที่มีค่า Swelling ratio ต่ำที่สุดเพียง 0.78 ± 0.28 หลังจากแช่ในน้ำ 48 ชั่วโมง ซึ่งสะท้อนถึงการที่ PLA เป็นวัสดุที่มีการดูดซับน้ำได้ต่ำและไม่มีการขยายตัวมาก

โดยสูตร PLA/PEG (90:10) มี Swelling ratio เท่ากับ 1.03 ± 0.15 หลังจากแช่ 48 ชั่วโมง แสดงถึงการบวมที่เพิ่มขึ้นจาก Neat PLA แต่ยังคงอยู่ในระดับต่ำ ซึ่งสูตรนี้ยังคงความเสถียรทางโครงสร้างที่ดีจากการผสม PLA ทำให้วัสดุมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นแต่ไม่ขยายตัวมากจนเกินไป เมื่อเพิ่มปริมาณ PEG สูงขึ้น เช่นเดียวกับสูตร PLA/PEG (96:4) และ PLA/PEG (92:8) ค่า Swelling ratio เพิ่มขึ้นเป็น 1.03 ± 0.17 และ 1.20 ± 0.14 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการดูดซับน้ำและการบวมของฟิล์มในสูตรที่มี PEG สูงกว่า

สำหรับ PLA/PEG (88:12) มี Swelling ratio เท่ากับ 2.41 ± 0.12 และสูตร PLA/PEG (84:16) ค่า Swelling ratio เพิ่มขึ้นเป็น 4.21 ± 0.22 ซึ่งแสดงถึงการเพิ่มขึ้นของการบวมน้ำที่มากขึ้น โดยฟิล์มมีการขยายตัวสูงสุดเมื่อมี PEG สูงถึง 20% โดยสูตร PLA/PEG (80:20) มีค่า Swelling ratio เท่ากับ 5.29 ± 0.36 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gao, H., et al. และคณะ [48] แสดงให้เห็น PEG ซึ่งเป็นสารชอบน้ำ (Hydrophilic) ทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างฟิล์มได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นการกระตุ้นให้เกิดการบวมตัวและปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของ PLA

เมื่อมีการเติม ZnO NPs APL จาก *Andrographis paniculata* leaves ลงใน PLA/PEG ค่า Swelling ratio ลดลง PLA/PEG/ZnO NPs APL (89.5:10:0.5) ที่มีค่า Swelling ratio เท่ากับ 1.01 ± 0.18 หลังจาก 48 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่า ZnO NPs ช่วยลดการบวมของฟิล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในสูตร PLA/PEG/ZnO NPs APL (88:9.5:2.5) ค่า Swelling ratio ลดลงไปที่ 0.51 ± 0.06 ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวของ ZnO NPs ที่มีความสม่ำเสมอและช่วยลดการขยายตัวของฟิล์ม

ในส่วนของ ZnO NPs GMP จาก *Garcinia mangostana* peels ซึ่ง ZnO NPs กระจายตัวได้ดีกว่าค่า Swelling ratio ก็ลดลง โดยสูตร PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89.5:10:0.5) ให้ค่า Swelling ratio เท่ากับ 1.30 ± 0.09 และสูตร PLA/PEG/ZnO NPs GMP (88:9.5:2.5) มีค่า Swelling ratio เท่ากับ 0.75 ± 0.13 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Srisuwan, Y., et al. และคณะ [53] อธิบายว่าอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์จะสร้างเส้นทางที่แคบๆ สำหรับ

โมเลกุลของน้ำที่พยายามแพร่ผ่าน ทำให้โมเลกุลของน้ำเดินทางผ่านฟิล์มได้ยากขึ้นแสดงให้เห็นว่า ZnO NPs ช่วยลดการดูดซึมน้ำ และทำให้วัสดุมีความคงตัวมากขึ้น

เมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่มี ZnO NPs การเพิ่ม PEG ทำให้ Swelling ratio ของฟิล์มเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน PEG ที่สูงขึ้น โดย PLA/PEG (80:20) มีค่า Swelling ratio สูงสุด ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ดี ขณะที่การเติม ZnO NPs โดยเฉพาะใน ZnO NPs APL และ ZnO NPs GMP ช่วยลดอัตราการบวม เนื่องจากการเสริมกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์จะสร้างเส้นทางที่คดเคี้ยว สำหรับโมเลกุลของน้ำที่พยายามแพร่ผ่าน และความเป็น Hydrophobic ของ ZnO NPs ทำให้วัสดุมีความเสถียรและทนทานต่อการดูดซึมน้ำได้ดี

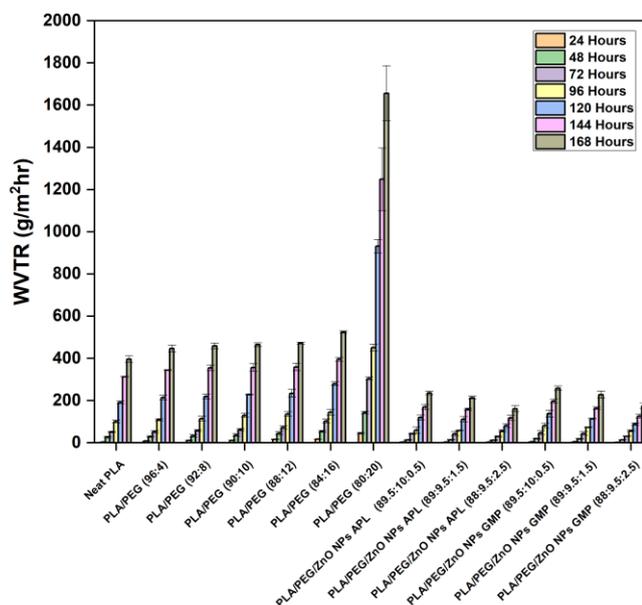
4.2.2.4. การศึกษาการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

การศึกษาการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM E96 ใช้น้ำกลั่น 500 ml โดยจะได้ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ประมาณ 99 %RH ที่อุณหภูมิ 25°C เป็นเวลา 24, 48, 72, 96, 120, 144 และ 168 ชั่วโมง จะแสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.20

ตารางที่ 4.6 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) เป็นเวลา 24-168 ชั่วโมง

Sample	24 Hours	48 Hours	72 Hours	96 Hours	120 Hours	144 Hours	168 Hours
Neat PLA	3.93 ±0.53	26.86 ± 3.72	50.94 ± 3.55	100.97 ± 7.14	191.94 ± 6.40	313.13 ± 2.69	396.92 ± 15.00
PLA/PEG (96:4)	8.56 ±0.73	29.69 ± 3.80	52.63 ± 5.77	109.25 ± 5.41	214.24 ±10.83	344.44 ± 2.03	446.87 ± 15.88
PLA/PEG (92:8)	10.84 ±0.87	32.54 ± 6.87	57.57 ± 4.56	114.18 ±10.86	219.62 ±11.06	355.24 ±13.24	459.38 ± 13.13
PLA/PEG (90:10)	11.40 ±0.15	36.56 ± 5.86	62.07 ± 5.53	130.24 ±10.46	228.48 ± 2.91	356.46 ±17.67	465.16 ± 9.11
PLA/PEG (88:12)	15.78 ±1.42	44.74 ± 7.46	72.98 ± 8.37	136.49 ±10.47	233.89 ±18.51	359.00 ±17.62	472.41 ± 4.24

Sample	24 Hours	48 Hours	72 Hours	96 Hours	120 Hours	144 Hours	168 Hours
PLA/PEG (84:16)	17.35 ±0.46	54.19 ± 4.16	103.06 ± 8.19	144.38 ±13.65	279.59 ± 8.61	395.87 ± 9.26	525.22 ± 4.93
PLA/PEG (80:20)	45.24 ±3.69	143.3 ±6.48	304.80 ±7.82	450.58 ±15.90	931.34 ±31.75	1248.8 ±148.3	1656.58 ±131.07
PLA/PEG/ZnO NPs APL (89.5:10:0.5)	4.45 ±1.12	13.85 ±1.42	43.69 ±3.20	59.59 ±14.80	119.68 ±12.73	169.82 ±12.70	236.35 ±8.63
PLA/PEG/ZnO NPs APL (89:9.5:1.5)	4.13 ±0.20	13.52 ±2.87	42.23 ±9.71	58.26 ±1.23	112.08 ±12.20	158.47 ±5.132	214.01 ±6.75
PLA/PEG/ZnO NPs APL (88:9.5:2.5)	3.49 ±0.49	12.72 ±1.05	30.03 ±2.56	55.46 ±4.95	81.73 ±8.92	117.58 ±12.38	161.52 ±14.54
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89.5:10:0.5)	4.98 ±0.52	19.70 ±2.30	47.5 ±10.11	81.15 ±11.67	137.87 ±16.19	197.30 ±8.90	258.40 ±11.31
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89:9.5:1.5)	4.55 ±0.77	18.73 ±2.01	44.34 ±8.18	73.01 ±2.83	113.31 ±3.21	163.63 ±6.40	228.56 ±17.04
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (88:9.5:2.5)	3.12 ±0.25	13.92 ±0.89	31.04 ±2.27	56.28 ±4.20	88.60 ±6.38	126.22 ±9.25	174.91 ±13.15



รูปที่ 4.20 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)
เป็นเวลา 24-168 ชั่วโมง

จากข้อมูลในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.20 ผลการศึกษาการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์มวัสดุพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG และการเติมอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วน PEG ในสูตร PLA/PEG ค่า WVTR จะสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดย Neat PLA ค่า WVTR ที่ 24 ชั่วโมงอยู่ที่ $3.93 \pm 0.53 \text{ g/m}^2\text{-hr}$ จะแสดงให้เห็นว่ามีการซึมผ่านที่น้อย เมื่อเพิ่ม PEG พบว่าสูตร PLA/PEG (96:4) มีค่า 8.56 ± 0.73 , สูตร PLA/PEG (92:8) มีค่า 10.84 ± 0.87 และสูตร PLA/PEG (90:10) มีค่า $11.40 \pm 0.15 \text{ g/m}^2\text{-hr}$ ซึ่งจะมีค่า WVTR ที่ 24 ชั่วโมงสูงขึ้นตามลำดับอย่างชัดเจน

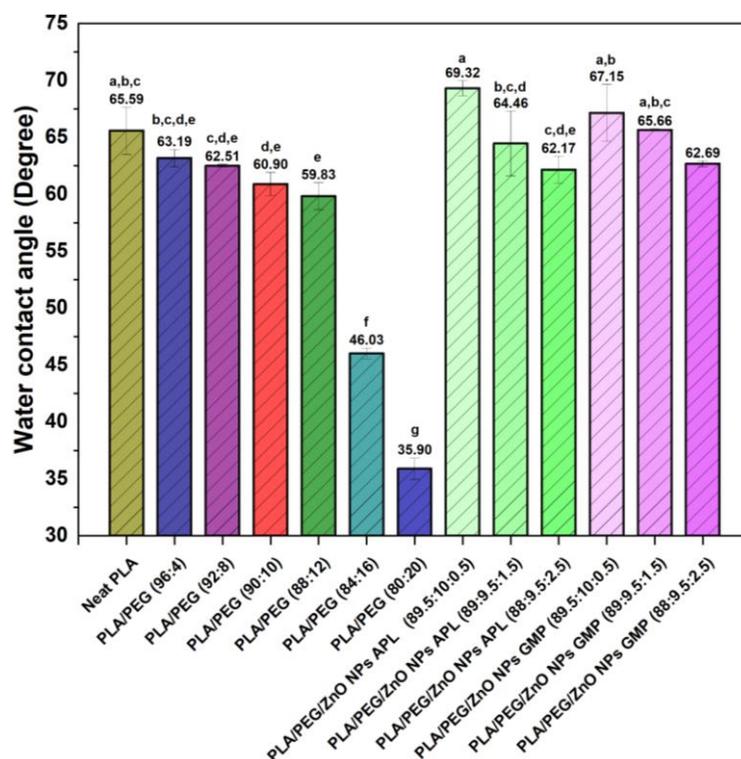
ในขณะที่สูตร PLA/PEG (88:12) และ PLA/PEG (84:16) ที่มีการเติม PEG สูงขึ้นจะมีค่า WVTR ที่ 24 ชั่วโมงสูงขึ้นตามลำดับ เช่น สูตร PLA/PEG (88:12) มีค่า 15.78 ± 1.42 และสูตร PLA/PEG (84:16) มีค่า $17.35 \pm 0.46 \text{ g/m}^2\text{-hr}$ และในสูตร PLA/PEG (80:20) ค่า WVTR ที่ 24 ชั่วโมงจะสูงที่สุด ถึง $45.24 \pm 3.69 \text{ g/m}^2\text{-hr}$ จากงานวิจัยของ Gao, H., et al. และคณะ[48] อธิบายไว้ว่า PEG ซึ่งเป็นสารชอบน้ำ (Hydrophilic) ทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างฟิล์มได้ง่ายขึ้น ทำให้เกิดการซึมผ่านของไอน้ำได้ง่ายใน PLA แสดงให้เห็นว่า PEG ที่มีความสามารถในการซึมผ่านของน้ำสูงทำให้ค่า WVTR เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของ PEG ในสูตร โดยเฉพาะ PLA/PEG (80:20)

ในขณะที่การเติม ZnO NPs ลงในสูตร PLA/PEG จะช่วยลดค่า WVTR อย่างชัดเจน ในสูตร PLA/PEG/ZnO NPs APL (89.5:10:0.5) ค่า WVTR ที่ 24 ชั่วโมงจะลดลงเหลือเพียง $4.45 \pm 1.12 \text{ g/m}^2\text{-hr}$ แสดงให้เห็นถึงผลของ ZnO NPs ที่ช่วยเพิ่มความต้านทานการซึมผ่านของน้ำในวัสดุ ซึ่งเป็นผลที่สำคัญในด้านการพัฒนาวัสดุที่ต้องการความต้านทานความชื้นสูง เมื่อเพิ่มเวลาในการทดสอบถึง 168 ชั่วโมง ค่า WVTR ของวัสดุในสูตร PLA/PEG (80:20) จะสูงถึง $1656.58 \pm 131.07 \text{ g/m}^2\text{-hr}$ ซึ่งสูงมากเมื่อเทียบกับสูตรที่มี ZnO NPs เช่น PLA/PEG/ZnO NPs APL (89.5:10:0.5) ที่มีค่า WVTR เพียง $236.35 \pm 8.63 \text{ g/m}^2\text{-hr}$ เมื่อเปรียบเทียบ การเติม ZnO NPs APL ลงในส่วนผสม PLA/PEG ช่วยให้ค่า WVTR ลดลงได้มากกว่าการเติม ZnO NPs GMP ซึ่งในสูตร PLA/PEG/ZnO NPs APL (89.5:10:0.5) ค่า WVTR ที่ 168 ชั่วโมงอยู่ที่ $236.35 \pm 8.63 \text{ g/m}^2\text{-hr}$ ขณะที่ในสูตร PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89.5:10:0.5) ค่า WVTR ที่ 168 ชั่วโมงอยู่ที่ $258.40 \pm 11.31 \text{ g/m}^2\text{-hr}$ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ZnO NPs APL มีประสิทธิภาพในการลด WVTR ได้ดีกว่า ZnO NPs GMP

พบว่า การเพิ่ม PEG ในสูตร PLA/PEG ทำให้ค่า WVTR สูงขึ้นตามสัดส่วนของ PEG ในขณะที่การเติม ZnO NPs ลงไปช่วยลดการซึมผ่านของไอน้ำอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในสูตรที่ใช้ ZnO NPs APL ซึ่งให้ผลดีที่สุดในการลดค่า WVTR และเพิ่มความทนทานต่อการซึมผ่านของน้ำในทุกช่วงเวลา สอดคล้องกับงานวิจัยของ Srisuwan, Y., et al. และคณะ [53] อธิบายว่าอนุภาคนาโน ZnO NPs ที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์จะสร้างเส้นทางที่คดเคี้ยวสำหรับโมเลกุลของน้ำที่พยายามแพร่ผ่านทำให้โมเลกุลของน้ำเดินทางผ่านฟิล์มได้ยากขึ้น ส่งผลให้ค่าการซึมผ่านของไอน้ำลดลง

4.2.2.5. การศึกษามุมสัมผัสน้ำของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

การศึกษามุมสัมผัสน้ำของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM D7334 ใช้น้ำกลั่น 1 หยดประมาณ 50 ไมโครลิตร ณ อุณหภูมิห้อง ทำการจับเวลา 3 นาทีจะแสดงดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 มุมสัมผัสน้ำของไอน้ำของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

จากรูปที่ 4.21 แสดงค่ามุมสัมผัสพื้นน้ำ (Contact angle) ของฟิล์มวัสดุที่เสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และ พอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG) รวมทั้งการเติม อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) โดยในรูปถึงการเปลี่ยนแปลงของ มุมสัมผัสพื้นน้ำ จากการเพิ่มสัดส่วนของ PEG ในสูตร PLA/PEG ซึ่งจะส่งผลให้วัสดุมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนไป จาก Hydrophobic (ไม่ชอบน้ำ) ไปสู่ Hydrophilic (ชอบน้ำ) เนื่องจาก PEG เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติ Hydrophilic เมื่อเพิ่มสัดส่วน PEG สูงขึ้น

โดย Neat PLA จะมีค่ามุมสัมผัสพื้นน้ำที่ 65.59° แต่เมื่อทำการเพิ่ม PEG เข้าไปในสูตร PLA/PEG (96:4) ซึ่งมี PEG ต่ำสุด จะมีค่ามุมสัมผัสพื้นน้ำที่ 63.19° แสดงถึงความเป็น Hydrophilic ที่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่ม PEG ไปตามสูตร PLA/PEG ที่ 92:8, 90:10, 88:12, 84:16 และ 80:20 จะมีค่ามุมสัมผัสพื้นน้ำที่ 62.51° , 60.90° , 59.83° , 46.03° และ 35.90° ซึ่งจะมีค่ามุมสัมผัสพื้นน้ำที่ลดลงตามลำดับ การเพิ่ม PEG เข้าไปในสูตร PLA/PEG (80:20) ที่มีสัดส่วน PEG มากขึ้นค่ามุมสัมผัสพื้นน้ำจะลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 35.90° แสดงถึงการเพิ่มสมบัติ Hydrophilic มากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gao, H., et al. และคณะ [48] ที่อธิบายว่าเนื่องจาก PEG ซึ่งเป็นสารชอบน้ำ (Hydrophilic) ทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างฟิล์มได้ง่ายขึ้น ทำให้ค่ามุมสัมผัสพื้นน้ำลดลง ซึ่งบ่งบอกว่ามีความสามารถในการจับน้ำมากขึ้น

ในขณะที่การเติม ZnO NPs ที่มีขนาดนาโนเข้าไปในสูตร PLA/PEG/ZnO NPs จะมีผลทำให้ค่ามุมสัมผัสพื้นน้ำเพิ่มขึ้นไปในทิศทาง hydrophobic หรือไม่ชอบน้ำมากขึ้น เนื่องจาก ZnO มีสมบัติ Hydrophobic โดยเฉพาะการเติม ZnO NPs APL ซึ่งเป็น ZnO ที่สังเคราะห์จากสารสกัดสมุนไพรใบฟ้าทะลายโจร ทำให้ PLA/PEG/ZnO NPs APL มีค่ามุมสัมผัสพื้นน้ำสูงสุดที่ 69.32° แสดงถึงการเพิ่มคุณสมบัติ Hydrophobic มากที่สุดในกลุ่มที่เติม ZnO NPs สอดคล้องกับงานวิจัยของ Srisuwan, Y., et al. และคณะ [53] อธิบายว่าอนุภาคนาโน ZnO NPs ที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์จะสร้างเส้นทางที่คดเคี้ยวสำหรับโมเลกุลของน้ำที่พยายามแพร่ผ่านทำให้เดินทางผ่านฟิล์มได้ยากขึ้น

ส่วน ZnO NPs GMP ที่ได้จากการสังเคราะห์จากสารสกัดเปลือกมังคุด มีค่ามุมสัมผัสพื้นน้ำ อยู่ที่ 67.15° ซึ่งต่ำกว่า ZnO NPs APL เล็กน้อย แต่ยังคงแสดงถึงการเพิ่มสมบัติ Hydrophobic อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับสูตร PLA/PEG ที่ไม่มีการเติม ZnO NPs และในสูตรที่มี ZnO NPs GMP พบว่า ZnO NPs จาก APL มีผลดีกว่าในการทำให้วัสดุมีความ Hydrophobic มากขึ้น ดังนั้นการเพิ่ม PEG ในสูตร PLA/PEG จะทำให้วัสดุมีคุณสมบัติ Hydrophilic มากขึ้น ขณะที่การเติม ZnO NPs จาก APL และ GMP จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติ Hydrophobic และลดการดูดซึมน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.2.3. การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

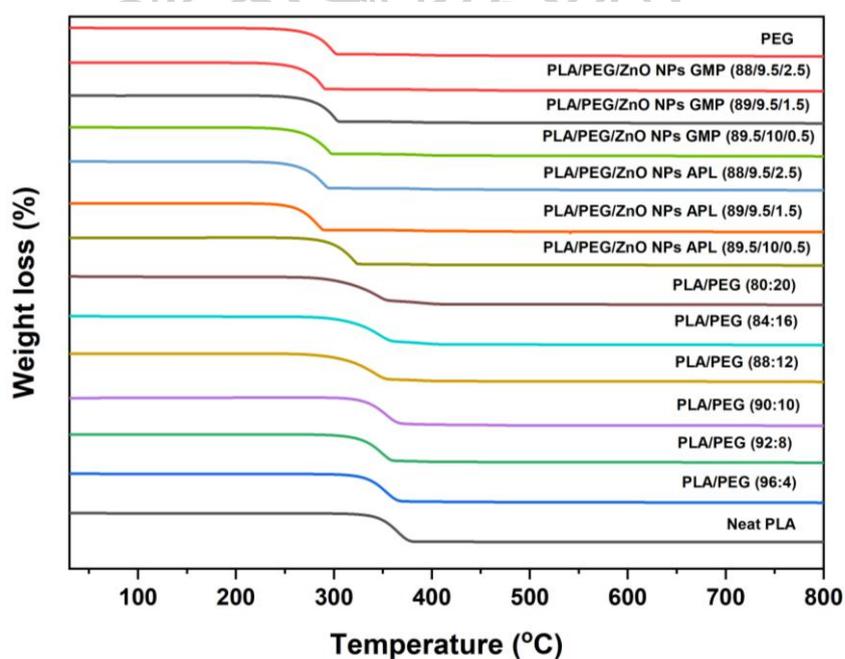
4.2.3.1. การศึกษาเสถียรภาพและการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

การศึกษาเสถียรภาพและการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) และ Derivative Thermogravimetric Analysis (DTG) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิ 30-800°C อัตราการให้ความร้อน 5°C/min โหมด Heat-Cool-Heat เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของวัสดุคอมโพสิตและปริมาณผลึกของวัสดุคอมโพสิตจะแสดงดังตารางที่ 4.7 รูปที่ 4.22 และ 4.23

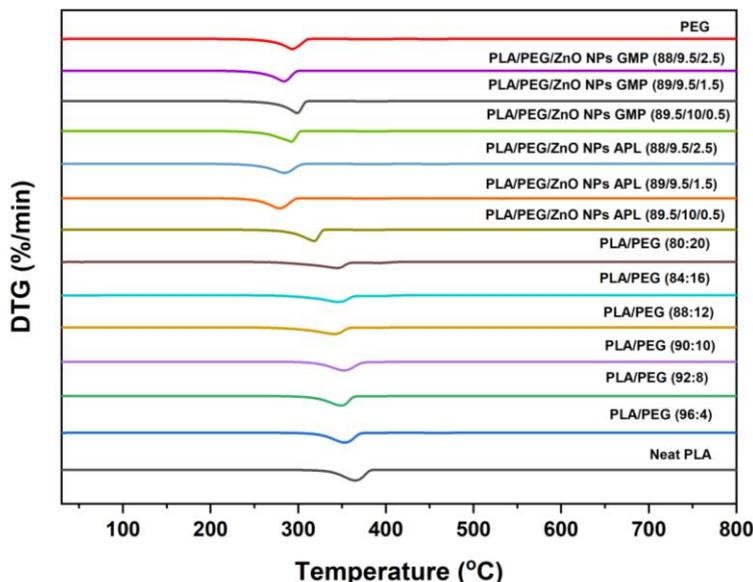
ตารางที่ 4.7 การสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

Sample	Step	Onset (°C)	Inflect point (°C)	End set (°C)	Residue (%)
PEG	1	279.21	298.25	302.03	8.90
Neat PLA	1	346.02	365.17	375.80	1.42
PLA/PEG (96:4)	1	334.58	352.92	363.90	4.07
PLA/PEG (92:8)	1	330.69	348.33	357.83	8.81
PLA/PEG (90:10)	1	332.54	352.83	364.42	9.40
PLA/PEG (88:12)	1	310.15	343.00	351.72	9.80
	2	385.27	392.92	400.72	5.06
PLA/PEG (84:16)	1	316.76	348.08	357.02	10.10
	2	386.14	392.83	404.24	2.06
PLA/PEG (80:20)	1	313.08	346.08	353.10	15.69
	2	383.54	395.25	402.94	4.07

Sample	Step	Onset (°C)	Inflect point (°C)	End set (°C)	Residue (%)
PLA/PEG/ZnO NPs APL (89.5/10/0.5)	1	296.80	319.33	322.45	4.29
PLA/PEG/ZnO NPs APL (89/9.5/1.5)	1	263.94	283.50	288.40	7.77
PLA/PEG/ZnO NPs APL (88/9.5/2.5)	1	268.42	289.92	293.82	7.24
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89.5/10/0.5)	1	273.81	295.50	297.39	7.24
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89/9.5/1.5)	1	282.11	300.25	304.11	10.12
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (88/9.5/2.5)	1	270.36	288.42	290.70	8.26



รูปที่ 4.22 TGA thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)



รูปที่ 4.23 DTG thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

จากตารางที่ 4.7 รูปที่ 4.22 และ 4.23 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) พบว่า PEG มีอุณหภูมิสลายตัวจากความร้อนเริ่มต้น (Onset) ที่ 279.21°C จุดเปลี่ยนแปลง (Inflection point) ที่ 298.25°C และสิ้นสุดการสลายตัวจากความร้อน (End set) ที่ 302.03°C โดยเหลือสารตกค้าง 8.90% ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PEG มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์สายโซ่สั้นและมีพันธะอีเทอร์ที่แตกตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน ในขณะที่ Neat PLA มีค่า Onset สูงกว่าอย่างชัดเจนที่ 346.02°C Inflection point ที่ 365.17°C และ End set ที่ 375.80°C โดยมีสารตกค้างเพียง 1.42% แสดงถึงเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงและการสลายตัวจากความร้อนที่สมบูรณ์ของ PLA

เมื่อมีการเติม PEG ลงใน PLA พบว่าอุณหภูมิสลายตัวจากความร้อนของฟิล์มลดลงตามสัดส่วนของ PEG ที่เพิ่มขึ้น โดยในสูตร PLA/PEG (96:4) การสลายตัวจากความร้อนเริ่มที่ 334.58°C มีจุด Inflection ที่ 352.92°C และสิ้นสุดที่ 363.90°C โดยเหลือสารตกค้าง 4.07% ซึ่งแม้ค่าอุณหภูมิสลายตัวจากความร้อนจะลดลงเล็กน้อย แต่ยังคงมีเสถียรภาพทางความร้อนใกล้เคียงกับ PLA สำหรับสูตร PLA/PEG (92:8) พบว่า Onset ลดลงเป็น 330.69°C มีจุด Inflection point ที่ 348.33°C และ End set ที่ 357.83°C พร้อมกับสารตกค้างที่เพิ่มขึ้นเป็น 8.81% แสดงว่าเมื่อมีการเติม PEG มากขึ้น เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มจะลดลงอย่างต่อเนื่อง

ลักษณะการสลายตัวจากความร้อนของฟิล์มจะมี 2 ชั้น พบได้ในสูตรที่มีปริมาณ PEG เพิ่มขึ้น เช่น PLA/PEG (84:16) ซึ่งเริ่มสลายตัวจากความร้อนในช่วง 316.76–357.02°C และชั้นที่สองที่ 386.14–404.24°C โดยมีสารตกค้างรวมประมาณ 12.16% (10.10%+2.06%) แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเติม PEG ในปริมาณสูงขึ้น อุณหภูมิสลายตัวจากความร้อนของฟิล์ม มีการแยกชั้นตอนการสลายตัวจากความร้อน ระหว่างสององค์ประกอบได้อย่างชัดเจน สำหรับสูตรที่มี PEG สูงสุดคือ PLA/PEG (80:20) พบว่ามีอุณหภูมิสลายตัวจากความร้อน สองช่วงที่เด่นชัด โดยช่วงแรกอยู่ในช่วง 313.08–353.10°C และช่วงที่สองอยู่ในช่วง 383.54–402.94°C โดยเหลือสารตกค้างสูงสุดถึง เกือบ 20% (15.69%+4.07%) ซึ่งบ่งชี้ว่าการเพิ่มปริมาณ PEG มากขึ้นทำให้เกิดการคาร์บอนไนซ์และการตกค้างของสารอินทรีย์ในปริมาณสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Li, F.-J., et al. และคณะ [54] ที่อธิบายว่าอุณหภูมิสลายตัวจากความร้อนจะมีสองชั้น ชั้นแรกจะเป็นของ PEG ซึ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่า PLA การสูญเสียน้ำหนักในชั้นตอนนี้สอดคล้องกับปริมาณ PEG ที่เติมเข้าไปและชั้นสองจะเป็นการสลายตัวจากความร้อนของ PLA หลัก โดยส่วนใหญ่ผ่านกลไก Random scission และ Depolymerization ซึ่งเป็นไปตามลักษณะการสลายตัวจากความร้อนของ PLA

จากการเติม PEG ลงใน PLA ทำให้ค่าอุณหภูมิสลายตัวจากความร้อนเริ่มต้น (Onset) และสิ้นสุด (End set) ลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณ PEG ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Li, F.-J., et al. และคณะ [54] ที่อธิบายไว้ว่า PEG เพิ่มความคล่องตัวของสายโซ่ PLA ทำให้สายโซ่แยกออกจากกันได้ง่ายขึ้น จึงอาจส่งเสริมให้เกิดการสลายตัวจากความร้อนได้ง่ายขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้ การปรากฏของลักษณะการสลายตัวจากความร้อน สองชั้นในสูตรที่มี PEG มากกว่า 12% แสดงให้เห็นถึงการสลายตัวจากความร้อนของ PEG และ PLA ที่เกิดขึ้นแยกกัน โดย PEG จะมีอุณหภูมิสลายตัวจากความร้อนก่อน ในขณะที่เดียวกัน ปริมาณสารตกค้าง (Residue) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PEG ที่เติม ซึ่งอาจเกิดจากการคาร์บอนไนซ์หรือการเกิดสารตกค้างแข็งซ็อน (Char) ที่มีความเสถียรสูง

เมื่อเติม ZnO NPs APL ลงในระบบ PLA/PEG พบว่าอุณหภูมิสลายตัวจากความร้อน ลดลงอย่างชัดเจน โดยสูตรที่มี ZnO NPs APL 0.5% (89.5/10/0.5) มีค่า Onset ที่ 296.80°C และ End set ที่ 322.45°C ซึ่งต่ำกว่าสูตร PLA/PEG (90:10) ที่ไม่มี ZnO อย่างมาก แสดงว่า ZnO NPs APL ในปริมาณต่ำมีแนวโน้มทำหน้าที่เป็นตัวเร่งอุณหภูมิสลายตัวจากความร้อนของพอลิเมอร์ มากกว่าการเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO NPs APL เป็น 1.5% ค่า Onset ลดลงต่อเนื่องเหลือ 263.94°C และ End set ที่ 288.40°C ซึ่งเป็นช่วงเสถียรภาพ

ทางความร้อนของพอลิเมอร์ที่ต่ำที่สุดในกลุ่ม บ่งชี้ว่าปริมาณ ZnO NPs ดังกล่าวเร่งการแตกตัวของโครงสร้างโซ่ PLA ได้ชัดเจนที่สุด ส่วนในสูตรที่มี ZnO NPs APL 2.5% ค่า Onset เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เป็น 268.42°C และ End set ที่ 293.82°C แสดงว่าเมื่อปริมาณ ZnO NPs สูงขึ้น อนุภาคมีแนวโน้มเกิดการจับกลุ่ม (agglomeration) ทำให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาลดลง โดยการเติม ZnO NPs APL ส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์ม PLA/PEG ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในสัดส่วน 1.5% ซึ่งมีการสลายตัวจากความร้อนเร็วที่สุดและเหลือสารตกค้างน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่า ZnO NPs APL มีแนวโน้มทำหน้าที่เป็นตัวเร่งอนุกรมสลายตัวจากความร้อนมากกว่าการเพิ่มความความร้อนของวัสดุ

เมื่อเติม ZnO NPs GMP ลงใน PLA/PEG พบว่าค่าอุณหภูมิการสลายตัวจากความร้อน มีการเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของ ZnO NPs โดยสูตรที่มี ZnO NPs GMP 0.5% (89.5/10/0.5) เริ่มสลายตัวจากความร้อนที่ 273.81°C และสิ้นสุดที่ 297.39°C ซึ่งต่ำกว่าสูตร PLA/PEG (90:10) เล็กน้อย แสดงว่า ZnO NPs GMP ในปริมาณนี้ยังไม่สามารถเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนได้อย่างชัดเจน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO NPs GMP เป็น 1.5% (89/9.5/1.5) ค่า Onset และ End set เพิ่มขึ้นเป็น 282.11°C และ 304.11°C ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าสูงสุดในกลุ่ม แสดงว่าในสัดส่วนนี้ ZnO NPs GMP มีการกระจายตัวที่ดีและสามารถป้องกันความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยชะลอการสลายตัวจากความร้อนของ PLA และเพิ่มสารตกค้างให้สูงขึ้นเป็น 10.12% แสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้นของฟิล์ม

อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO NPs GMP เป็น 2.5% (88/9.5/2.5) ค่า Onset และ End set ลดลงเหลือ 270.36°C และ 290.70°C พร้อมสารตกค้าง 8.26% แสดงว่าเมื่อมี ZnO NPs ในปริมาณสูง อนุภาคอาจเกิดการรวมตัวกัน (Agglomeration) ทำให้การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้อุณหภูมิสลายตัวจากความร้อนลดลง โดยสรุปการเติม ZnO NPs GMP ส่งผลให้ฟิล์ม PLA/PEG มีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นในปริมาณที่เหมาะสม โดยเฉพาะที่สัดส่วน 1.5% ซึ่งให้ค่าอุณหภูมิสลายตัวจากความร้อนที่สูงที่สุด และมีสารตกค้างมากที่สุด แสดงให้เห็นว่า ZnO NPs GMP มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความอุณหภูมิสลายตัวจากความร้อนของวัสดุได้ดีกว่า ZnO NPs APL สอดคล้องกับงานวิจัยของ Anžlovar, A. และคณะ [54] ที่อธิบายว่าการเติมอนุภาค ZnO NPs ลงในฟิล์ม PLA/PEG อาจจะมีผลกระทบต่อความเสถียรทางความร้อน เนื่องจาก ZnO NPs มีสองสามารถเป็นตัวเพิ่มความเสถียรในฐานะสารตัวเติม แต่ก็อาจเป็นตัวเร่งการสลายตัวจากความร้อนได้ โดยเฉพาะเมื่อเติมในปริมาณสูง หรือ มีการกระจายตัวไม่ดี จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่ง

ปฏิกิริยา (Catalyst) เร่งปฏิกิริยา Depolymerization ของ PLA/PEG ทำให้เกิดการสลายตัวจากความร้อนของสายโซ่ PLA/PEG ผ่านกลไก Hydrolysis หรือ Thermolysis ได้

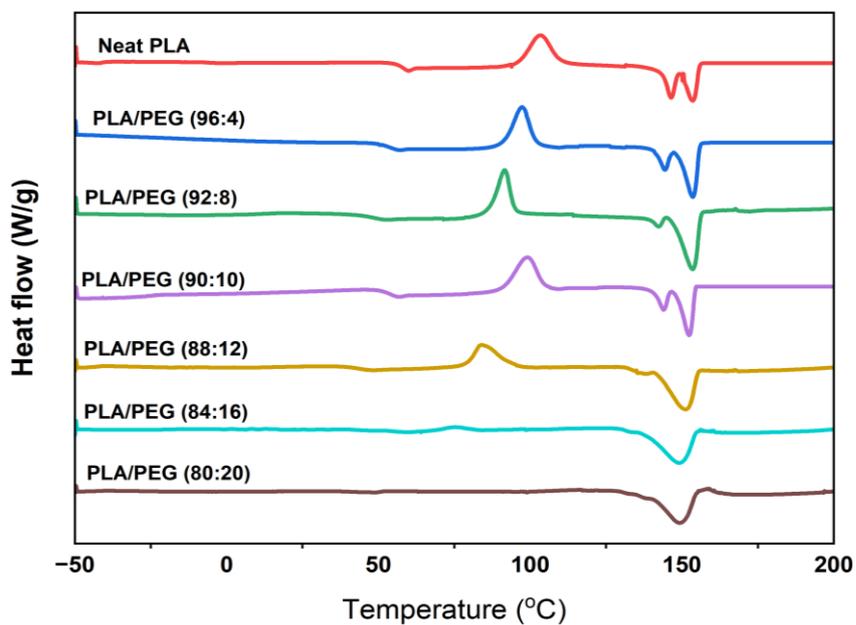
4.2.3.2. การศึกษาสมบัติทางความร้อนและการหาปริมาณผลึกของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิ -50-800 °C อัตราการให้ความร้อน 3 °C/min โหมด Heat-Cool-Heat เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของวัสดุคอมโพสิตและปริมาณผลึกของวัสดุคอมโพสิตจะแสดงดังตารางที่ 4.8 รูปที่ 4.24 และ 4.25

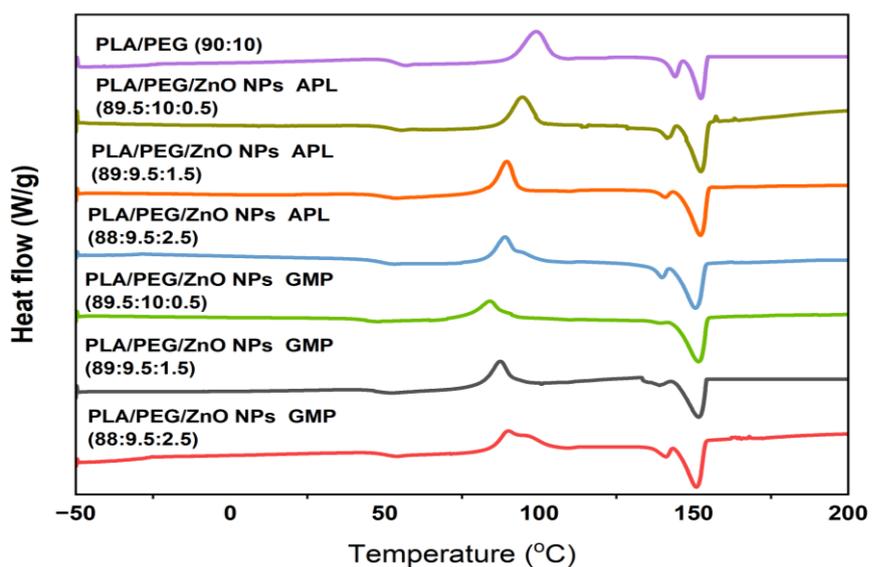
ตารางที่ 4.8 สมบัติทางความร้อนและปริมาณผลึกของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

Sample	T_g (°C)	T_g (°C)	T_m (°C)	T_m (°C)	T_{cc} (°C)	ΔH_{cc} (J/g)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
	PLA	PEG	PLA 1	PLA 2				
Neat PLA	57.06	-	147.05	153.55	103.45	17.08	20.48	3.63
PLA/PEG (96:4)	53.11	-	144.28	153.80	97.50	20.98	24.77	4.22
PLA/PEG (92:8)	48.10	-	143.82	153.65	91.65	16.16	25.44	10.78
PLA/PEG (90:10)	53.04	-	138.79	152.35	99.20	16.62	26.62	11.87
PLA/PEG (88:12)	44.11	-	151.25	-	84.15	12.60	23.27	12.95

Sample	T_g (°C)	T_g (°C)	T_m (°C)	T_m (°C)	T_{cc} (°C)	ΔH_{cc} (J/g)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
	PLA	PEG	PLA 1	PLA 2				
PLA/PEG (84:16)	48.11	-	149.15	-	75.05	2.61	24.43	27.75
PLA/PEG (80:20)	47.99	-	149.35	-	-	-	23.44	31.30
PLA/PEG/ZnO NPs APL (89.5/10/0.5)	51.50	-	141.59	152.45	94.55	19.21	21.60	2.85
PLA/PEG/ZnO NPs APL (89/9.5/1.5)	49.04	-	140.86	152.71	89.50	14.04	24.85	12.98
PLA/PEG/ZnO NPs APL (88/9.5/2.5)	47.72	-	139.75	150.60	88.95	16.19	24.01	9.49
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89.5/10/0.5)	44.04	-	141.28	151.65	84.10	11.45	26.33	17.76
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89/9.5/1.5)	47.87	-	139.52	151.75	87.45	15.57	30.84	18.33
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (88/9.5/2.5)	49.72	-	138.84	150.95	90.00	15.21	26.97	14.28



รูปที่ 4.24 DSC thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG)



รูปที่ 4.25 DSC thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

ผลการวิเคราะห์ตารางที่ 4.8 รูปที่ 4.24 และ 4.25 แสดงให้เห็นว่า Neat PLA มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) เท่ากับ 57.06°C จุดหลอมเหลวสองช่วง (T_{m1} และ T_{m2}) ที่ 147.05°C และ 153.55°C ตามลำดับ รวมถึงอุณหภูมิการตกผลึกเย็น (T_{cc}) ที่ 103.45°C และค่าความร้อนแฝงการหลอมเหลว (ΔH_m) เท่ากับ 20.48 J/g ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของ PLA ที่มีความเป็นผลึกต่ำ โดยมีค่าร้อยละการตกผลึก (X_c) เพียง 3.63% แสดงให้เห็นถึงการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ไม่เป็นระเบียบ

เมื่อมีการเติม PEG ลงใน PLA พบว่าค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) ลดลงตามปริมาณของ PEG ที่เพิ่มขึ้น โดยเริ่มจาก Neat PLA ซึ่งมีค่า T_g เท่ากับ 57.06°C แสดงถึงลักษณะของฟิล์มที่แข็งและยืดหยุ่นต่ำ การเติม PEG ช่วยลดค่า T_g ลงอย่างต่อเนื่อง เช่น ที่สัดส่วน PLA/PEG (96:4) ค่า T_g ลดลงเป็น 53.11°C , ที่ 8% PEG เท่ากับ 48.10°C , 10% PEG เท่ากับ 53.04°C และ 12% PEG เท่ากับ 44.11°C การลดลงของ T_g ดังกล่าวสะท้อนถึงการเพิ่มขึ้นของความยืดหยุ่นของฟิล์ม โดยเฉพาะในสูตรที่มีการเติม PEG 16% และ 20% ซึ่งมีค่า T_g เท่ากับ 48.11°C และ 47.99°C ตามลำดับ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า PEG มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์ม PLA

นอกจากนี้ การเติม PEG ยังส่งผลต่อค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของฟิล์ม PLA โดยทำให้ค่า T_m ลดลงเมื่อเทียบกับ Neat PLA ที่มีค่า T_m อยู่ที่ 147.05 และ 153.55°C การเติม PEG ในสัดส่วน PLA/PEG (96:4) ทำให้ค่า T_m ลดลงมาอยู่ที่ 144.28 และ 153.80°C ซึ่งแสดงถึงการหลอมที่เกิดขึ้นในอุณหภูมิที่ต่ำลงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มสัดส่วนของ PEG เป็น 8% ค่า T_m ลดลงเป็น 143.82 และ 153.65°C และที่ 10% PEG ลดลงชัดเจนเป็น 138.79 และ 152.35°C สำหรับสูตร PLA/PEG (88:12) ค่า T_m อยู่ที่ 151.25°C ซึ่งใกล้เคียงกับสูตรที่มี PEG น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่ม PEG ในสัดส่วนสูงถึง 20% (PLA/PEG 80:20) ค่า T_m อยู่ที่ 149.35°C ซึ่งแม้จะลดลงจาก Neat PLA แต่ยังคงมีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวที่สูงพอสมควร

การเติม PEG ลงใน PLA ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการตกผลึกเย็น (T_{cc}) ของฟิล์มลดลงอย่างชัดเจนจากค่า T_{cc} ของ Neat PLA ที่ 103.45°C แสดงให้เห็นว่า PEG มีอิทธิพลต่อกระบวนการตกผลึกของ PLA อย่างมีนัยสำคัญ ในสูตรที่มี PEG 4% (PLA/PEG 96:4) ค่า T_{cc} ลดลงเล็กน้อยมาอยู่ที่ 97.50°C แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ PEG เป็น 8% (PLA/PEG 92:8) ค่า T_{cc} ลดลงต่อเนื่องจนเหลือ 91.65°C แสดงว่า PEG ช่วยให้สายโซ่พอลิเมอร์ของ PLA เคลื่อนที่ได้สะดวกขึ้นและสามารถจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้รวดเร็วยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่ม PEG เป็น 10% (PLA/PEG 90:10) ค่า T_{cc} กลับ

เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 99.20°C ซึ่งอาจเกิดจากการกระจายตัวของ PEG ที่ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้การตกผลึกของ PLA ลดลง เมื่อเพิ่ม PEG เป็น 12% (PLA/PEG 88:12) ค่า T_{cc} ลดลงอีกครั้งอย่างชัดเจนเป็น 84.15°C แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ได้รับการส่งเสริมมากขึ้น ในสูตรที่มีปริมาณ PEG สูงกว่า เช่น PLA/PEG (84:16) ค่า T_{cc} ลดลงอย่างมากเหลือเพียง 75.05°C ซึ่งบ่งชี้ว่า PLA สามารถตกผลึกได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่ามาก เมื่อมี PEG ในปริมาณสูง และในสูตร PLA/PEG (80:20) ไม่พบค่า T_{cc} ที่ชัดเจน แสดงว่าการตกผลึกของ PLA อาจเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำก่อนการวัด หรือเกิดการตกผลึกบางส่วนตั้งแต่ในขั้นตอนการทำให้เย็น (Cooling) โดยสรุปการลดลงของค่า T_{cc} เมื่อเพิ่มปริมาณ PEG แสดงให้เห็นว่า PEG ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวช่วยการตกผลึก (nucleating agent) และ plasticizer ของ PLA โดยช่วยเพิ่มการเคลื่อนไหวของโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้ PLA สามารถตกผลึกได้ง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าร้อยละการตกผลึก (X_c) ที่สังเกตได้ในสูตรที่มี PEG มากขึ้น

การเติม PEG ลงใน PLA ส่งผลให้ค่าร้อยละผลึก (X_c) ของฟิล์มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จากค่า % X_c ของ Neat PLA ที่ 3.63% ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำ สะท้อนว่า PLA มีลักษณะกึ่งผลึก (Semi-crystalline) ที่มีการเกิดผลึกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อเติม PEG 4% (PLA/PEG 96:4) ค่าความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเป็น 4.22% แสดงว่า PEG เริ่มมีบทบาทช่วยให้โซ่ของ PLA สามารถจัดเรียงตัวได้ดีขึ้นเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มปริมาณ PEG เป็น 8% (PLA/PEG 92:8) ค่าผลึกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเป็น 10.78% ซึ่งแสดงว่า PEG ทำหน้าที่ส่งเสริมให้การตกผลึกของ PLA เกิดขึ้นได้ง่ายขึ้น ในสูตรที่มี PEG 10% (PLA/PEG 90:10) ค่าความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นต่อเนื่องเป็น 11.87% และที่ 12% PEG (PLA/PEG 88:12) ค่า X_c เพิ่มขึ้นเป็น 12.95% แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณ PEG ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มระดับความเป็นผลึกของฟิล์ม เมื่อเพิ่มปริมาณ PEG เป็น 16% (PLA/PEG 84:16) ค่าความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเป็น 27.75% และที่สัดส่วนสูงสุดที่ทำการทดสอบคือ 20% (PLA/PEG 80:20) ค่า X_c สูงถึง 31.30% ซึ่งมากกว่าค่าของ Neat PLA อย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่า การเติม PEG มีผลชัดเจนต่อการเพิ่มระดับความเป็นผลึกของ PLA โดย PEG มีบทบาททั้งในการเพิ่มความคล่องตัวของโซ่พอลิเมอร์และส่งเสริมให้เกิดการจัดเรียงตัวของโซ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Phuangthong, P., et al. และคณะ [47] ที่อธิบายว่า PEG ช่วยให้การตกผลึกของ PLA เพิ่มขึ้นในแง่ของความเร็วและระดับความสมบูรณ์ เนื่องจากมันทำหน้าที่เป็นตัวลดความหนืดและเพิ่มความคล่องตัวของสายโซ่ (Plasticizer) ในขณะเดียวกันก็ทำหน้าที่เป็นพื้นผิวเร่งการเกิด

ผลึก (Nucleating agent) อย่างไรก็ตามหากปริมาณ PEG สูงเกินไป อาจทำให้วัสดุมีความเปราะหรือยืดหยุ่นเกินไป เนื่องจากการเกิดเฟสแยกระหว่าง PLA และ PEG

เมื่อเติม ZnO NPs APL ลงใน PLA/PEG พบว่าค่าร้อยละผลึก (X_c) มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนตามปริมาณการเติม โดยที่ปริมาณ 0.5% ค่า X_c มีเพียง 2.85% ซึ่งต่ำกว่าค่าของ PLA/PEG เดิม แสดงว่าในปริมาณที่น้อย ZnO NPs APL ยังไม่สามารถทำให้เกิดการตกผลึกของ PLA ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO NPs APL เป็น 1.5% ค่า X_c เพิ่มขึ้นอย่างมากเป็น 12.98% ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดในกลุ่มตัวอย่าง ZnO NPs APL แสดงให้เห็นว่าที่สัดส่วนนี้ ZnO NPs APL มีการกระจายตัวที่ดีและสามารถทำหน้าที่เป็นจุดกำเนิดผลึก (Nucleating sites) ช่วยให้สายโซ่ของ PLA จัดเรียงตัวเพื่อเกิดผลึกได้ง่ายขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO NPs APL เป็น 2.5% ค่า X_c กลับลดลงเหลือ 9.49% เนื่องจากการรวมตัวของอนุภาค (Agglomeration) ส่งผลให้การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและลดประสิทธิภาพในการเป็นเกิดผลึกของ ZnO NPs APL นอกจากนี้ ยังพบว่าค่าอุณหภูมิการตกผลึกเย็น (T_c) ลดลงจาก 99.20°C ของ PLA/PEG (90:10) เหลือ 89.50°C และ 88.95°C ในสูตรที่มีการเติม ZnO NPs APL ซึ่งบ่งชี้ว่า PLA สามารถเริ่มตกผลึกได้ที่อุณหภูมิต่ำลง อันเป็นผลจากการที่ ZnO NPs APL ช่วยเพิ่มการเคลื่อนไหวของโซ่พอลิเมอร์ ขณะที่ค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ยังคงอยู่ในช่วงใกล้เคียงเดิม (ประมาณ 140–153°C) แสดงให้เห็นว่าการเติม ZnO NPs APL ไม่ได้ส่งผลต่อโครงสร้างผลึกของ PLA อย่างมีนัยสำคัญ แต่มีผลต่อกระบวนการตกผลึกและระดับการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ในระหว่างการเย็นตัวเท่านั้น

ในกรณีของการเติม ZnO NPs GMP พบว่ามีผลต่อการเพิ่มระดับความเป็นผลึก (X_c) ของฟิล์มอย่างชัดเจน โดยเมื่อเติมในปริมาณ 0.5% ค่า X_c ของฟิล์มเพิ่มขึ้นเป็น 17.76% ซึ่งสูงกว่าค่าของ PLA/PEG 90:10 (11.87%) และสูงกว่าค่าของ ZnO NPs APL ในสัดส่วนเดียวกัน (2.85%) อย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่า ZnO NPs GMP สามารถทำหน้าที่เป็น Nucleating agent ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ในปริมาณต่ำ ช่วยกระตุ้นให้เกิดการตกผลึกของ PLA ได้ง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO NPs GMP เป็น 1.5% ค่าความเป็นผลึก (X_c) เพิ่มขึ้นต่อเนื่องเป็น 18.33% ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดทั้งในกลุ่ม ZnO NPs GMP และเมื่อเทียบกับทุกสูตรที่มีการเติม ZnO ทั้งสองชนิด แสดงให้เห็นว่าในปริมาณนี้ ZnO มีการกระจายตัวอย่างเหมาะสม สามารถทำหน้าที่เป็นจุดกำเนิดผลึก (Nucleation sites) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้สายโซ่ของ PLA จัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO NPs GMP เป็น 2.5% ค่าความเป็นผลึกลดลงเหลือ 14.28% ซึ่งเป็นแนวโน้มเดียวกับที่พบในกลุ่ม ZnO NPs APL โดยคาดว่าเกิดจากการรวมตัวของอนุภาค ZnO

(Agglomeration) ทำให้การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและลดจำนวนจุดกำเนิดผลึกที่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การตกผลึกของ PLA ลดลงในระดับหนึ่ง แม้ว่าจะมีปริมาณอนุภาคมากขึ้นก็ตาม

สำหรับสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม พบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) ของกลุ่มที่เติม ZnO NPs อยู่ในช่วง 44–52°C ซึ่งต่ำกว่าค่าของ Neat PLA อย่างชัดเจน เป็นผลของการเกิด Plasticizing จาก PEG และ ZnO NPs ร่วมกัน ที่ช่วยเพิ่มความเคลื่อนไหวของโซ่พอลิเมอร์ของ PLA ทำให้วัสดุมีความยืดหยุ่นมากขึ้นและสามารถตกผลึกได้ง่ายขึ้นขณะเดียวกัน ค่าอุณหภูมิการตกผลึกเย็น (T_c) ลดลงจากประมาณ 99.20°C ของสูตร PLA/PEG (90:10) เหลืออยู่ในช่วง 84–95°C เมื่อมีการเติม ZnO NPs แสดงให้เห็นว่า PLA สามารถเริ่มตกผลึกได้ที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งเป็นสัญญาณของการเกิด Nucleation ที่ดีขึ้นและรวดเร็วยิ่งขึ้น ส่วนค่าอุณหภูมิลอมเหลว (T_m) ยังคงอยู่ในช่วง 140–152°C ซึ่งใกล้เคียงกับสูตรเดิม บ่งชี้ว่าการเติม ZnO NPs ไม่ได้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของ PLA อย่างมีนัยสำคัญ แต่มีผลต่ออัตราการเกิดผลึก และประสิทธิภาพของการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ มากกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Srisuwan, Y. และคณะ [53] ที่อธิบายว่า ZnO NPs ที่กระจายตัวได้ดีจะช่วยเร่งอัตราการตกผลึกของ PLA/PEG ทำให้โครงสร้างพอลิเมอร์จัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ดีขึ้น แสดงให้เห็นว่า ZnO NPs มีหน้าที่เป็น Nucleating agent หากเติมในปริมาณที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาค ซึ่งส่งผลให้ Nucleation มีประสิทธิภาพลดลง และอาจทำให้สมบัติการตกผลึกและสมบัติเชิงกลลดลงได้

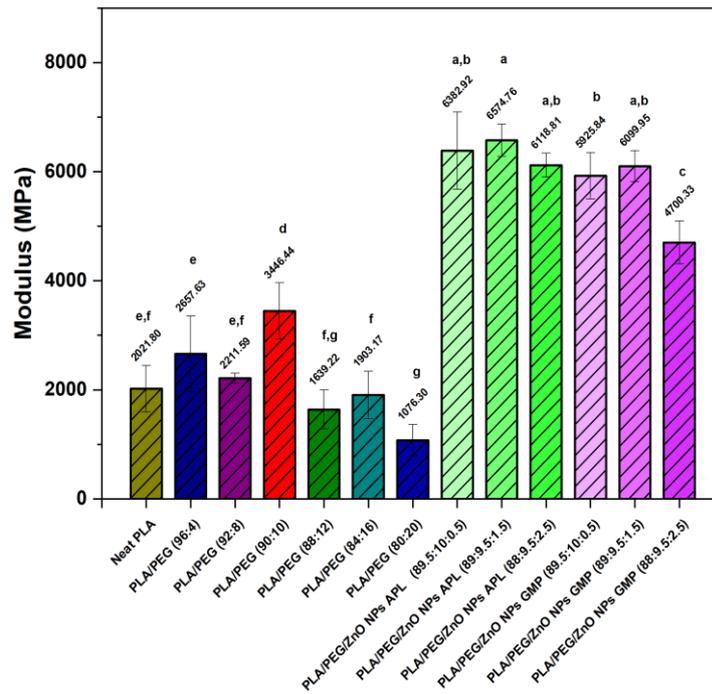
4.2.4. การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

4.2.4.1 การศึกษาการดึงยึดของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

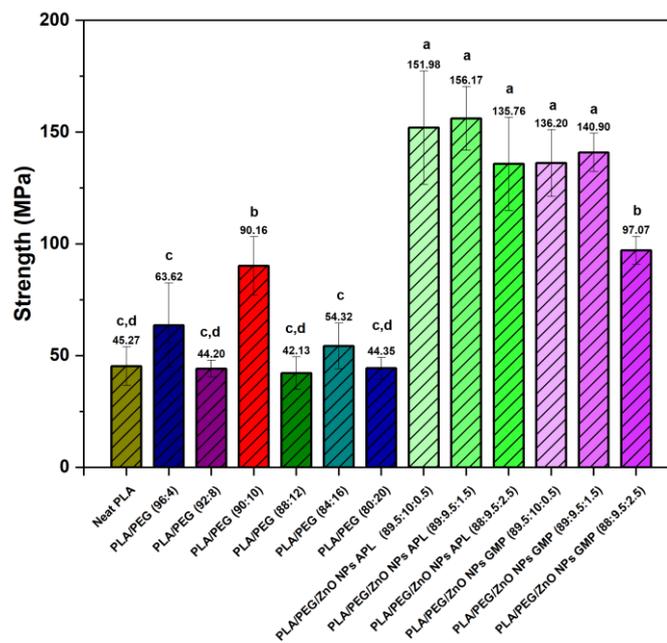
การศึกษาการดึงยึดของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิดพอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ทำการเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D882 ขนาด 2.54x10 เซนติเมตร มี gate length 5 เซนติเมตร นำไปทดสอบด้วย load 5 kN อัตราเร็ว 5 mm/min โดยจะมีระยะจับชิ้นงานข้างละ 2.5 เซนติเมตร จะแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.26, 4.27 และ 4.28

ตารางที่ 4.9 ค่าโมดูลัส, ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

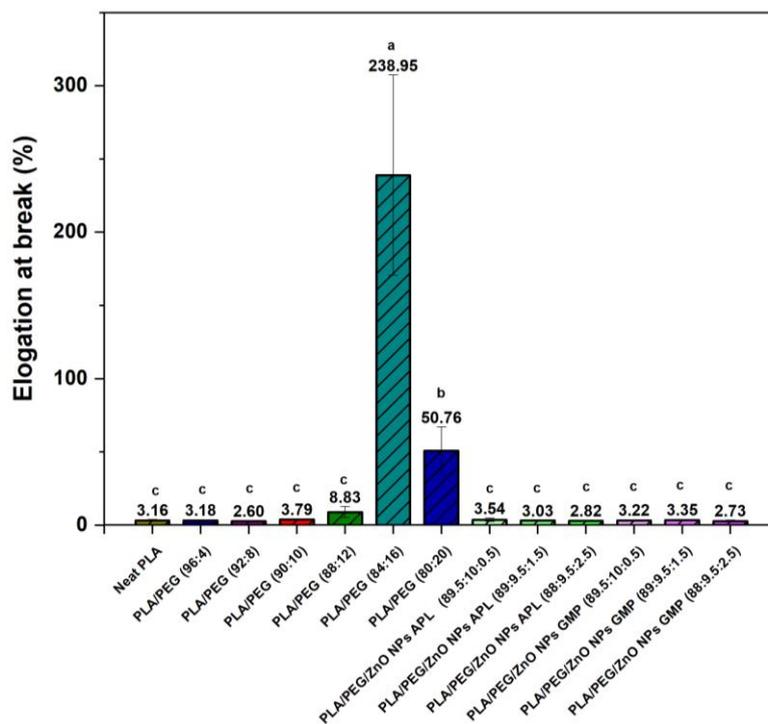
Sample		Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break(%)
Neat PLA	Mean	2021.80	45.27	3.16
	±SD	423.93	8.72	0.56
PLA/PEG (96:4)	Mean	2657.63	63.62	3.18
	±SD	692.91	18.90	0.47
PLA/PEG (92:8)	Mean	2211.59	44.20	2.60
	±SD	92.60	3.73	0.48
PLA/PEG (90:10)	Mean	3446.44	90.16	3.79
	±SD	512.83	13.07	0.31
PLA/PEG (88:12)	Mean	1639.22	42.13	8.83
	±SD	357.03	7.29	3.75
PLA/PEG (84:16)	Mean	1903.17	54.32	238.95
	±SD	436.12	10.22	68.36
PLA/PEG (80:20)	Mean	1076.30	44.35	50.76
	±SD	289.83	4.91	16.28
PLA/PEG/ZnO NPs APL (89.5:10:0.5)	Mean	6382.92	151.98	3.54
	±SD	709.05	25.36	1.19
PLA/PEG/ZnO NPs APL (89:9.5:1.5)	Mean	6574.76	156.17	3.03
	±SD	298.13	14.30	0.27
PLA/PEG/ZnO NPs APL (88:9.5:2.5)	Mean	6118.81	135.76	2.82
	SD	217.42	20.87	0.43
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89.5:10:0.5)	Mean	5925.84	136.20	3.22
	±SD	423.71	14.99	0.42
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89:9.5:1.5)	Mean	6099.95	140.90	3.35
	±SD	285.81	8.60	0.52
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (88:9.5:2.5)	Mean	4700.33	97.07	2.73
	±SD	392.81	6.29	0.52



รูปที่ 4.26 ค่าโมดูลัสของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)



รูปที่ 4.27 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)



รูปที่ 4.28 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PLA/PEG และ PLA/PEG/ZnO NPs จากตารางที่ 4.9 รูปที่ 2.6, 2.7 และ 2.8 พบว่า Neat PLA มีลักษณะของฟิล์มที่แข็งแต่เปราะ โดยมีค่า Modulus 2021.80 ± 423.93 MPa, Tensile strength 45.27 ± 8.72 MPa, และ Elongation at break $3.16 \pm 0.56\%$ แสดงถึงโครงสร้างที่แข็งแรงแต่มีความยืดหยุ่นต่ำ การเติม PEG ในสัดส่วนเล็กน้อยช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลได้อย่างเหมาะสม โดยในสูตร PLA/PEG (96:4) พบว่าให้ค่า Modulus 2657.63 ± 692.91 MPa, Tensile strength 63.62 ± 18.90 MPa, และ Elongation at break $3.18 \pm 0.47\%$ ซึ่งสูงกว่า PLA แสดงว่าการเติม PEG ปริมาณน้อยช่วยให้สายโซ่พอลิเมอร์สามารถจัดเรียงตัวได้ดีขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีทั้งความแข็งแรงและความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

เมื่อเพิ่มสัดส่วน PEG เป็น 8% (PLA/PEG 92:8) พบว่าค่า Modulus และ Tensile strength ลดลงเหลือ 2211.59 ± 92.60 MPa และ 44.20 ± 3.73 MPa ตามลำดับ ขณะที่ Elongation at break ลดลงเป็น $2.60 \pm 0.48\%$ ซึ่งบ่งชี้ว่า PEG ในปริมาณที่สูงขึ้นเริ่มทำหน้าที่เป็น Plasticizer อย่างชัดเจน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ลดลงและวัสดุมีแนวโน้มอ่อนตัวมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม ในสูตร PLA/PEG (90:10) พบค่าที่โดดเด่นที่สุดในกลุ่มฟิล์มผสมให้ค่า Modulus 3446.44 ± 512.83 MPa, Tensile strength 90.16 ± 13.07 MPa, และ Elongation at break $3.79 \pm 0.31\%$ ซึ่งสูงกว่าสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าในสัดส่วนนี้ PEG มีการกระจายตัวที่เหมาะสม สามารถเสริมแรงยึดระหว่างเฟสของวัสดุได้ดี ส่งผลให้โครงสร้างของฟิล์มแข็งแรงและทนแรงดึงได้มากที่สุด

เมื่อเพิ่มสัดส่วน PEG มากกว่า 10% พบแนวโน้มการลดลงของความแข็งแรงแต่เพิ่มขึ้นของความยืดหยุ่นของวัสดุ โดยในสูตร PLA/PEG (88:12) ค่า Modulus ลดลงเหลือ 1639.22 ± 357.03 MPa, Tensile strength 42.13 ± 7.29 MPa แต่ Elongation at break เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเป็น $8.83 \pm 3.75\%$ แสดงให้เห็นถึงบทบาทของ PEG ในการลดความแข็งของโครงสร้าง และเพิ่มความเหนียวของฟิล์ม ส่วนสูตร PLA/PEG (84:16) แสดงสมบัติที่ยืดหยุ่นมากที่สุด โดยมีค่า Modulus 1903.17 ± 436.12 MPa, Tensile strength 54.32 ± 10.22 MPa และ Elongation at break สูงถึง $238.95 \pm 68.36\%$ ในสัดส่วนนี้ PEG ทำหน้าที่เป็น Plasticizer ได้อย่างเต็มที่ ส่งผลให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นสูงสุด แต่ส่งผลให้ความแข็งแรงเชิงกลของฟิล์มลดลง

สำหรับสูตรที่มี PEG สูงสุด PLA/PEG (80:20) พบว่า Modulus ลดลงเหลือเพียง 1076.30 ± 289.83 MPa, Tensile strength 44.35 ± 4.91 MPa และ Elongation at break $50.76 \pm 16.28\%$ ซึ่งยืนยันแนวโน้มชัดเจนว่าเมื่อเพิ่ม PEG ในปริมาณมาก โครงสร้างของ PLA จะมีความอ่อนตัวและยืดหยุ่นมากขึ้น แต่ความแข็งแรงและความต้านทานต่อแรงดึงจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Li, F.-J., et al. และคณะ [55] อธิบายว่าเมื่อเติม PEG ในปริมาณต่ำ เช่น 5% - 15% โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของ PEG จะทำหน้าที่เป็น สารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ที่เข้ากันได้ดีกับ PLA (Miscibility) ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น (Elongation at break) และลดความเปราะบางของ PLA แต่หากปริมาณ PEG สูงขึ้น เกิน 15 % จะทำให้ความเข้ากันได้ของ PLA และ PEG องค์ประกอบทั้งสองจึงเริ่มแยกเฟส (Phase Separation) ออกจากกัน ซึ่งบ่งชี้ว่าปริมาณ PEG ที่มากเกินไปทำให้เกิดการแยกเฟส (Phase separation) ระหว่าง PLA และ PEG ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลงชัดเจน

เมื่อมีการเติม ZnO nanoparticles (ZnO NPs) ลงในระบบ PLA/PEG พบว่าสมบัติเชิงกลของฟิล์มดีขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจาก ZnO NPs ทำหน้าที่เป็น อนุภาคเสริมแรง (Reinforcing filler) ที่ช่วยกระจายและถ่ายโอนแรงระหว่างโซ่พอลิเมอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้โครงสร้าง

ของวัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น ในกรณีของ ZnO NPs APL (*Andrographis paniculata* leaves) พบว่าในสูตร PLA/PEG/ZnO NPs (89.5/10/0.5) फिल्मมีค่า Modulus 6382.92 ± 709.05 MPa, Tensile strength 151.98 ± 25.36 MPa และ Elongation at break $3.54 \pm 1.19\%$ ซึ่งสูงกว่า फिल्म PLA/PEG เดิมอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO NPs APL เป็น 1.5% (PLA/PEG/ZnO NPs 89/9.5/1.5) พบว่าให้ค่าที่สูงที่สุดในกลุ่ม โดยมี Modulus 6574.76 ± 298.13 MPa, Tensile strength 156.17 ± 14.30 MPa และ Elongation at break $3.03 \pm 0.27\%$ แสดงให้เห็นว่าการเติม ZnO NPs APL ในปริมาณ 1.5% ช่วยเพิ่มแรงยึดระหว่างเฟสของวัสดุได้อย่างเหมาะสม ทำให้ फिल्मมีความแข็งแรงสูงและคงความยืดหยุ่นในระดับที่ดี อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO NPs APL เป็น 2.5% (PLA/PEG/ZnO NPs 88/9.5/2.5) พบว่าค่าความแข็งแรงลดลงเหลือ Modulus 6118.81 ± 217.42 MPa, Tensile strength 135.76 ± 20.87 MPa และ Elongation at break $2.82 \pm 0.43\%$ เนื่องจากอนุภาค ZnO NPs มีแนวโน้มเกิดการรวมตัวกัน (Agglomeration) ทำให้การกระจายแรงภายในเนื้อ फिल्मลดลงและโครงสร้างโดยรวมเปราะมากขึ้น

สำหรับ ZnO NPs GMP (*Garcinia mangostana* peels) ซึ่งมีลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอ พบว่า फिल्मที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ากลุ่ม APL โดยเฉพาะในสูตร PLA/PEG/ZnO NPs (89/9.5/1.5) ที่ให้ค่า Modulus 6099.95 ± 285.81 MPa, Tensile strength 140.90 ± 8.60 MPa และ Elongation at break $3.35 \pm 0.52\%$ ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุดในกลุ่ม GMP แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของอนุภาค ZnO NPs ที่ดีช่วยเสริมแรงระหว่างเฟสได้อย่างมีประสิทธิภาพและเพิ่มความเหนียวของ फिल्मได้ดี อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่ม ZnO NPs GMP เกิน 2.5% พบว่า फिल्मมีแนวโน้ม แข็งแต่เปราะมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของอนุภาคนาโนในปริมาณสูงเกินไป ส่งผลให้ความสามารถในการกระจายแรงลดลงและเกิดจุดอ่อนในโครงสร้างวัสดุ

การเติม ZnO NPs ทั้งสองชนิดช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลของ फिल्म PLA/PEG ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในสัดส่วน 1.5% ซึ่งให้ผลการเสริมแรงที่ดีที่สุด ทั้งในด้านความแข็งแรงและความยืดหยุ่น โดย फिल्मที่เติม ZnO NPs GMP แสดงประสิทธิภาพที่ดีกว่ากลุ่ม APL เนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอ ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรง เหนียว และทนต่อแรงดึงได้ดีกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shankar, S. และคณะ [56] ที่อธิบายว่าอนุภาค ZnO NPs ทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ (Polymer chain mobility) ส่งผลให้ फिल्मมีความแข็งแรงและแข็งแรงมากขึ้น

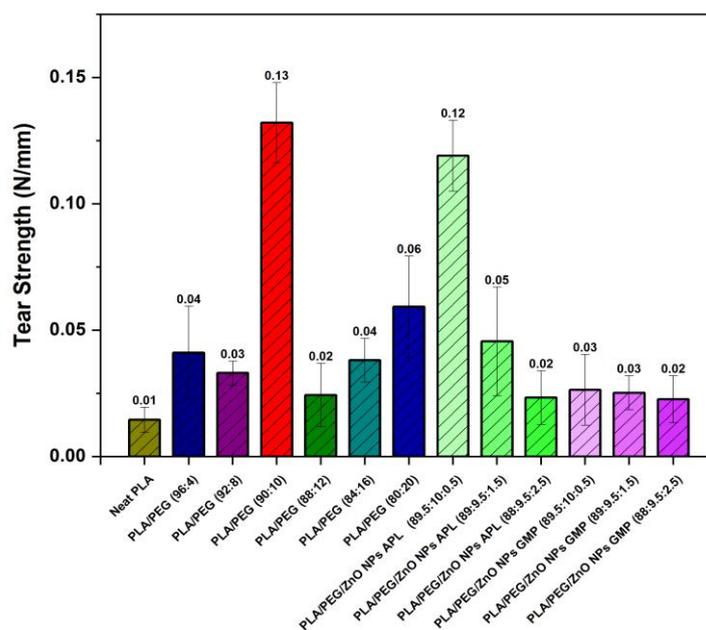
4.2.4.2 การศึกษาการฉีกขาดของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

การศึกษาการฉีกขาดของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ทำการเตรียมชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D1938 ขนาด 6.3x7.6 เซนติเมตร ทำรอยบากยาว 2 เซนติเมตร นำไปทดสอบด้วย load 5 kN อัตราเร็ว 100 mm/min ทดสอบแนว Machine direction (MD) และ Transverse direction (TD) ตัวอย่างจะแสดงในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.29 และ 4.30

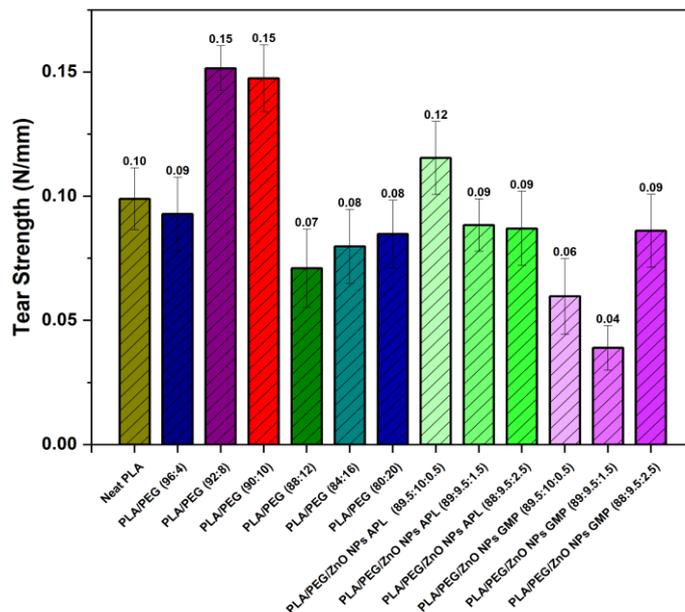
ตารางที่ 4.10 ค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

Sample		Machine direction (MD)	Transverse direction (TD)
		Tear strength (N/mm)	Tear strength (N/mm)
Neat PLA	Mean	0.015	0.099
	±SD	0.005	0.012
PLA/PEG (96:4)	Mean	0.041	0.093
	±SD	0.018	0.015
PLA/PEG (92:8)	Mean	0.033	0.152
	±SD	0.005	0.009
PLA/PEG (90:10)	Mean	0.132	0.147
	±SD	0.016	0.014
PLA/PEG (88:12)	Mean	0.024	0.071
	±SD	0.013	0.016
PLA/PEG (84:16)	Mean	0.038	0.080
	±SD	0.009	0.015
PLA/PEG (80:20)	Mean	0.056	0.085
	±SD	0.017	0.014
PLA/PEG/ZnO NPs APL (89.5:10:0.5)	Mean	0.119	0.115
	±SD	0.014	0.015

Sample		Machine direction (MD)	Transverse direction (TD)
		Tear strength (N/mm)	Tear strength (N/mm)
PLA/PEG/ZnO NPs APL (89:9.5:1.5)	Mean	0.046	0.088
	±SD	0.022	0.011
PLA/PEG/ZnO NPs APL (88:9.5:2.5)	Mean	0.023	0.087
	SD	0.011	0.015
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89.5:10:0.5)	Mean	0.026	0.060
	±SD	0.014	0.015
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89:9.5:1.5)	Mean	0.025	0.039
	±SD	0.007	0.009
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (88:9.5:2.5)	Mean	0.023	0.086
	±SD	0.009	0.015



รูปที่ 4.29 ค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดตามแนว *Machine Direction (MD)* ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)



รูปที่ 4.30 ค่าความต้านทานต่อแรงฉีกขาดตามแนว *Transverse Direction (TD)*

ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

จากตารางที่ 4.10 รูปที่ 4.29 และ 4.30 แสดงผลการทดสอบ ค่าความต้านแรงฉีกขาด (Tear strength; N/mm) ของฟิล์มในทั้งสองทิศทาง ได้แก่ ทิศทางการขึ้นรูป (Machine direction; MD) และ ทิศทางขวาง (Transverse direction; TD) พบว่าการเติม PEG และ ZnO nanoparticles (ZnO NPs) ส่งผลต่อสมบัติทางกลของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับ Neat PLA พบว่ามีค่าความต้านแรงฉีกขาดต่ำที่สุด โดยมีค่า 0.015 ± 0.005 N/mm (MD) และ 0.099 ± 0.012 N/mm (TD) แสดงให้เห็นว่าฟิล์มเป็นที่แข็งแต่เปราะ และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์แน่น ทำให้ทนต่อแรงฉีกขาดได้ต่ำ เมื่อมีการเติม PEG ลงในระบบ พบว่าค่า Tear Strength เพิ่มขึ้นในบางสัดส่วน โดยเฉพาะในสูตร PLA/PEG (90:10) ที่ให้ค่าความต้านแรงฉีกขาดสูงสุดในกลุ่ม PLA/PEG คือ 0.132 ± 0.016 N/mm (MD) และ 0.147 ± 0.014 N/mm (TD) แสดงว่าในสัดส่วนนี้ PEG มีการกระจายตัวที่เหมาะสม ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและการถ่ายโอนแรงระหว่างสายโซ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ฟิล์มมีความเหนียวและต้านแรงฉีกขาดได้ดีขึ้น

ในขณะที่สูตร PLA/PEG (96:4) และ PLA/PEG (92:8) มีค่าความต้านแรงฉีกขาดต่ำกว่า โดยมีค่า 0.041 ± 0.018 N/mm และ 0.033 ± 0.005 N/mm (MD) ตามลำดับ ส่วนในสูตรที่มีปริมาณ PEG สูงกว่า เช่น PLA/PEG (88:12), (84:16) และ (80:20) พบว่าค่าความต้านแรงฉีกขาดกลับลดลง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.024 ± 0.013 , 0.038 ± 0.009 และ 0.056 ± 0.017 N/mm (MD) และ 0.071 ± 0.016 , 0.080 ± 0.015 และ 0.085 ± 0.014 N/mm (TD) ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Li, F.-J., et al. และคณะ [55] อธิบายว่าเมื่อเติม PEG ในปริมาณต่ำ เช่น 5% - 15% โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของ PEG จะทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ที่เข้ากันได้ดีกับ PLA (Miscibility) ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น (Elongation at break) และลดความเปราะบางของ PLA แต่หากปริมาณ PEG สูงขึ้น เกิน 15 % จะทำให้ความเข้ากันได้ของ PLA และ PEG องค์กรประกอบทั้งสองจึงเริ่ม แยกเฟส (Phase separation) ออกจากกัน

สำหรับฟิล์มที่มีการเติม ZnO nanoparticles (ZnO NPs) พบว่าการเสริมอนุภาคนาโนช่วยเพิ่มค่าความต้านแรงฉีกขาด (Tear strength) ของฟิล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในระบบที่ใช้ ZnO NPs APL (*Andrographis paniculata* leaves) ซึ่งมีผลในการเสริมแรงได้เด่นชัดที่สุด โดยสูตร PLA/PEG/ZnO NPs (89.5/10/0.5) ให้ค่า Tear strength 0.119 ± 0.014 N/mm (MD) และ 0.115 ± 0.015 N/mm (TD) ซึ่งสูงกว่า Neat PLA หลายเท่า แสดงให้เห็นว่า ZnO NPs ในปริมาณเพียง 0.5 wt% สามารถช่วยเสริมแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโครงสร้างพอลิเมอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ฟิล์มมีความเหนียวและต้านแรงฉีกขาดได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO NPs APL เป็น 1.5–2.5 wt% พบว่าค่า Tear strength กลับลดลงอย่างชัดเจน โดยสูตร PLA/PEG/ZnO NPs (89/9.5/1.5) มีค่า 0.046 ± 0.022 N/mm (MD) และ 0.088 ± 0.011 N/mm (TD) ขณะที่สูตร PLA/PEG/ZnO NPs (88/9.5/2.5) ลดลงเหลือเพียง 0.023 ± 0.011 N/mm (MD) และ 0.087 ± 0.015 N/mm (TD) ซึ่งอธิบายได้ว่าการเพิ่มปริมาณ ZnO มากเกินไปทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาค (Agglomeration) ส่งผลให้การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ รบกวนความต่อเนื่องของโครงสร้างพอลิเมอร์ และเกิดจุดอ่อนที่เป็นจุดเริ่มต้นของการฉีกขาด ส่งผลให้ฟิล์มมีความเปราะมากขึ้น

ในทางกลับกัน ZnO NPs GMP (*Garcinia mangostana* peels) ซึ่งอนุภาค ZnO NPs GMP มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอกว่า พบว่าฟิล์มที่ได้มีค่า Tear strength ต่ำกว่าระบบ APL แต่มีความสม่ำเสมอและคงรูปมากกว่า โดยสูตร PLA/PEG/ZnO NPs (89.5/10/0.5) มีค่า 0.026 ± 0.014 N/mm (MD) และ 0.060 ± 0.015 N/mm (TD) สำหรับสูตร PLA/PEG/ZnO NPs GMP

(89/9.5/1.5) มีค่า 0.025 ± 0.007 N/mm (MD) และ 0.039 ± 0.009 N/mm (TD) และสูตร PLA/PEG/ZnO NPs GMP (88/9.5/2.5) มีค่า 0.023 ± 0.009 N/mm (MD) และ 0.086 ± 0.015 N/mm (TD) ซึ่งแม้ค่าความต้านแรงฉีกขาดโดยรวมจะต่ำกว่ากลุ่ม APL แต่ฟิล์มในระบบ GMP แสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของโครงสร้างและความคงตัวทางกลที่ดีกว่า

การเติม PEG มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มทั้งความยืดหยุ่นและความต้านแรงฉีกขาดของฟิล์ม PLA โดยเฉพาะในสูตร PLA/PEG (90:10) ซึ่งให้ค่าความต้านแรงฉีกขาดสูงที่สุดในกลุ่มฟิล์มผสม คือ 0.132 ± 0.016 N/mm (MD) และ 0.147 ± 0.014 N/mm (TD) บ่งบอกถึงการกระจายตัวของ PEG ที่เหมาะสมซึ่งช่วยเพิ่มการถ่ายโอนแรงและลดความเปราะของโครงสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับการเติม ZnO nanoparticles (ZnO NPs) พบว่าในสัดส่วนที่เหมาะสม โดยเฉพาะที่ 0.5 wt% ที่ ZnO NPs APL (*Andrographis paniculata* leaves) สามารถช่วยเสริมความแข็งแรงต่อแรงฉีกของฟิล์มได้ดีที่สุด โดยให้ค่า 0.119 ± 0.014 N/mm (MD) และ 0.115 ± 0.015 N/mm (TD) อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO NPs มากเกินไป พบว่าค่าความต้านแรงฉีกขาดลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากการรวมตัวของอนุภาคนาโน (Agglomeration) ทำให้การกระจายแรงภายในฟิล์มลดลงและเกิดจุดอ่อนในโครงสร้าง ในขณะที่ ZnO NPs GMP (*Garcinia mangostana* peels) แม้จะให้ค่าความต้านแรงฉีกขาดต่ำกว่ากลุ่ม APL แต่มีความสม่ำเสมอและความคงตัวของฟิล์มที่ดีกว่า แสดงให้เห็นว่า การกระจายตัวของอนุภาค ZnO NPs มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติทางกลของฟิล์ม โดยการกระจายตัวที่ดีช่วยเพิ่มความเหนียว ความแข็งแรง และความคงรูปของฟิล์ม ในขณะที่การรวมตัวของอนุภาคจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shankar, S. และคณะ [56] ที่อธิบายว่าอนุภาค ZnO ทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ (Polymer Chain Mobility) ส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงและแข็งแรงมากขึ้น

4.2.5. การศึกษาลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

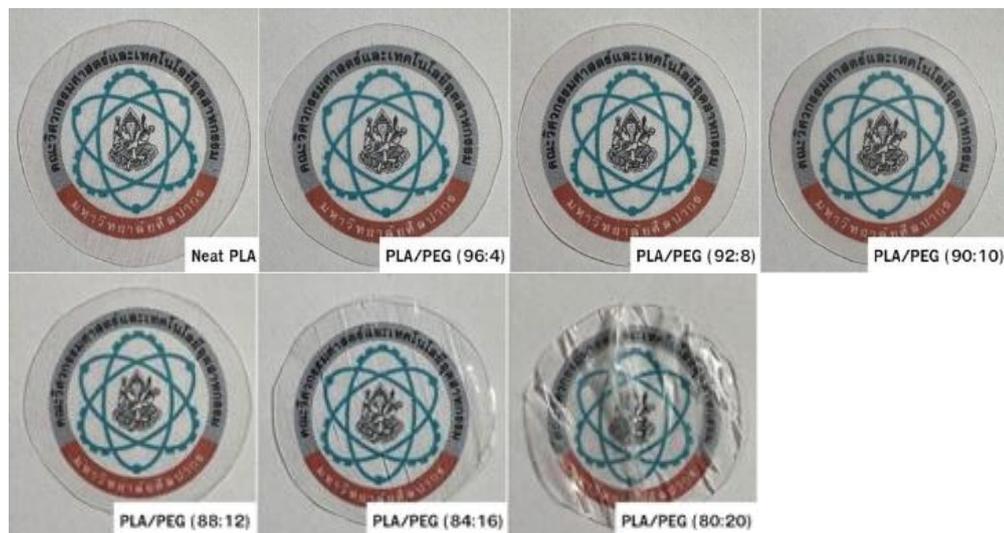
4.2.5.1. การศึกษาค่าสี และความแตกต่างสีของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิ

เมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

การศึกษาค่าสี และความแตกต่างของสีของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ทำการเตรียมชิ้นงานอย่างละ 3 ชิ้น เตรียม Background เป็นสีขาวทำการวัด 3 ครั้งและบันทึกความแตกต่างค่าสีกับชิ้นงานตัวอย่างตัวอย่างจะแสดงในตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.31 และ 4.32

ตารางที่ 4.11 ค่าสีและความแตกต่างของสีของฟิล์มฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

Sample	L	a	b	ΔE
Background	26.200	-0.700	0.400	0.000
Neat PLA	26.200	-0.800	0.400	0.100
PLA/PEG (96:4)	26.200	-0.700	0.500	0.100
PLA/PEG (92:8)	26.200	-0.800	0.400	0.100
PLA/PEG (90:10)	26.200	-0.800	0.400	0.100
PLA/PEG (88:12)	26.200	-0.800	0.400	0.100
PLA/PEG (84:16)	26.300	-0.700	0.300	0.141
PLA/PEG (80:20)	26.300	-0.700	0.300	0.141
PLA/PEG/ZnO NPs APL (89.5/10/0.5)	26.200	-0.800	0.400	0.100
PLA/PEG/ZnO NPs APL (89/9.5/1.5)	26.200	-0.700	0.500	0.100
PLA/PEG/ZnO NPs APL (88/9.5/2.5)	26.200	-0.700	0.600	0.200
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89.5/10/0.5)	26.300	-0.700	0.400	0.100
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89/9.5/1.5)	26.200	-0.700	0.500	0.100
PLA/PEG/ZnO NPs GMP (88/9.5/2.5)	26.200	-0.800	0.500	0.141



รูปที่ 4.31 ความโปร่งแสงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG)



รูปที่ 4.32 ความโปร่งแสงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

จากตารางที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ของฟิล์ม PLA ที่มีการเติม PEG และ ZnO NPs พบว่าการเติมสารทั้งสองชนิดมีผลต่อลักษณะสีและความใสของฟิล์มอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาการเติม PEG ในสัดส่วนต่าง ๆ เช่น PLA/PEG (96:4), PLA/PEG (92:8), PLA/PEG (88:12) และ PLA/PEG (80:20) พบว่าค่า L (ค่าความสว่าง) มีแนวโน้มคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แสดงถึงความสว่างของฟิล์มที่มากขึ้น ขณะที่ค่า b ซึ่งแสดงถึงระดับของสีเหลือง มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย หรือแทบไม่แตกต่างจากเดิม ทำให้สีของฟิล์มยังคงเป็นกลาง และมีความใสสูง

นอกจากนี้ค่าความแตกต่างของสีโดยรวม (ΔE) ของฟิล์มที่เติม PEG อยู่ในระดับต่ำ เช่น $\Delta E = 0.1-0.14$ ซึ่งบ่งชี้ว่าการเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้นมีเพียงเล็กน้อยและไม่เด่นชัด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การเติม PEG ช่วยเพิ่มความโปร่งใสของฟิล์ม PLA โดยไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีอย่างมีนัยสำคัญ ฟิล์มที่ได้จึงมีลักษณะใสและคงความเป็นธรรมชาติของสี PLA เดิมไว้ได้ดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bumrungnok, K. และคณะ[57] ที่อธิบายว่า การเติม PEG โดยเฉพาะในปริมาณที่ต่ำถึงปานกลาง และ PEG ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งเข้ากันได้กับ PLA ในระดับหนึ่งจะช่วยรักษาความใสไว้ได้ดี หรือในบางกรณีอาจใสขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ เนื่องจาก PLA อาจทำให้เกิดผลึกขนาดเล็กมาก (Nano sized crystals) ที่เล็กกว่าความยาวคลื่นของแสงที่ตามองเห็น ทำให้เกิดการกระเจิงแสงน้อย ส่งผลให้ฟิล์มดูใสขึ้น (Higher light transmittance)

การเติม ZnO nanoparticles (ZnO NPs) ลงใน PLA/PEG ส่งผลให้ฟิล์มมีลักษณะขุ่นมากขึ้นและความสามารถในการส่งผ่านแสงลดลง เนื่องจากอนุภาคนาโน ZnO NPs ทำให้เกิดการกระเจิงของแสงภายในเนื้อฟิล์ม ส่งผลให้ฟิล์มมีความโปร่งใสน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด โดยจากตัวอย่างเช่น PLA/PEG/ZnO NPs APL (89.5/10/0.5), PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89.5/10/0.5) และ PLA/PEG/ZnO NPs APL (88/9.5/2.5) พบว่าค่า ΔE มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (บางตัวอย่างมีค่า $\Delta E = 0.1-0.2$) ซึ่งสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของสีที่เด่นชัดขึ้นและบ่งบอกถึงการลดลงของความใสของฟิล์มจากการกระจายตัวของอนุภาค ZnO NPs ภายในเนื้อฟิล์ม นอกจากนี้ ยังพบว่าค่า b ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ระดับของสีเหลือง มีค่าที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่างที่มี ZnO NPs เช่น ในสูตร PLA/PEG/ZnO NPs APL (88/9.5/2.5) ค่า b เพิ่มจาก 0.4 เป็น 0.6 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของสีในทิศทางที่ทำให้ฟิล์มดูขุ่นและอมเหลืองมากขึ้น ซึ่งมีสาเหตุจากการกระจายตัวของ ZnO NPs ที่ไม่สม่ำเสมอภายในฟิล์ม ทำให้เกิดจุดที่แสงสะท้อนและกระเจิงมากกว่าจุดอื่น

โดยความใสหรือความขุ่นของฟิล์มขึ้นอยู่กับลักษณะของสารที่เติมเข้าไป โดยที่ PEG มีบทบาทช่วยเพิ่มความโปร่งใสของฟิล์มและเพิ่มการส่องผ่านของแสง ในขณะที่ ZnO NPs ส่งผลให้ฟิล์มมีการกระจายแสงมากขึ้นและลดการส่องผ่านของแสงโดยรวม ส่งผลให้ฟิล์มมีลักษณะ ทึบและขุ่นมากขึ้น เมื่อปริมาณ ZnO NPs เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gao, H. และคณะ [51] ที่สามารถสนับสนุนได้ว่าสำหรับนาโนคอมโพสิตที่มีอนุภาคนาโนขนาดเล็กมากและกระจายตัวไม่เกิดการรวมตัวกันเกาะกลุ่มกัน ความขุ่นที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นผลมาจาก การกระเจิงแสงแบบเรย์ลีย์ (Rayleigh scattering) ที่รอยต่อของฟิล์มที่มีดัชนีหักเหต่างกัน (Refractive index mismatch)

จากรูปที่ 4.31 พบว่า ฟิล์ม Neat PLA มีลักษณะใส (Transparent) และพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอ แต่มีความ เปราะและแข็ง ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของ พอลิแลกติกแอซิด (PLA) โดยฟิล์มสูตร PLA/PEG (96:4), (92:8) และ (90:10) ยังคงมีลักษณะ ใสและพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอ แสดงให้เห็นว่า PEG มีการกระจายตัวที่ดีภายในโครงสร้างของ PLA ทำให้ฟิล์มมีความสมดุลระหว่าง ความใส ความยืดหยุ่น และความเหนียว ได้อย่างเหมาะสม

อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ PEG สูงขึ้น เช่นในสูตร PLA/PEG (88:12) และ (84:16) เริ่มปรากฏลักษณะการย่นและบิดงอของฟิล์มบางส่วน ซึ่งเป็นผลมาจากการขึ้นรูปของฟิล์มที่มีอัตราส่วนผสมที่ไม่ดีและการดึงที่ไม่ดี ทำให้เกิดช่องว่าง (Void) ทำให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มลดลง การเติม PEG สูงถึง 20% (PLA/PEG 80:20) พบว่าเกิดการหดตัวและการย่นของฟิล์มอย่างชัดเจน ส่งผลให้ฟิล์มมีความไม่สม่ำเสมอทางโครงสร้างและลดคุณภาพทางกายภาพโดยรวม

จากรูปที่ 4.32 พบว่า ฟิล์มที่มีการเติม ZnO nanoparticles (ZnO NPs) มีลักษณะขุ่นขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่มีการเติม ZnO NPs ซึ่งเกิดจาก การกระเจิงของแสง (Light scattering) โดยอนุภาคนาโน ZnO NPs ที่แทรกตัวอยู่ภายในเมทริกซ์ของ PLA/PEG ส่งผลให้การส่องผ่านของแสงลดลงเล็กน้อย

ในฟิล์ม ที่ใช้ ZnO NPs APL จาก ใบฟ้าทะลายโจร พบว่าฟิล์มมีความใสลดลงและความหนาแน่นเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงการเสริมแรงของอนุภาค ZnO NPs APL ในระดับหนึ่ง โดยเฉพาะในสูตรที่มีปริมาณ ZnO NPs APL อยู่ในช่วง 0.5–1.5 wt% ฟิล์มยังคงมีพื้นผิวที่เรียบและสม่ำเสมอ บ่งบอกถึงการกระจายตัวของ ZnO NPs APL ที่เหมาะสมในเมทริกซ์พอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO NPs เป็น 2.5 wt% พบว่าความขุ่นและความไม่เรียบของผิว

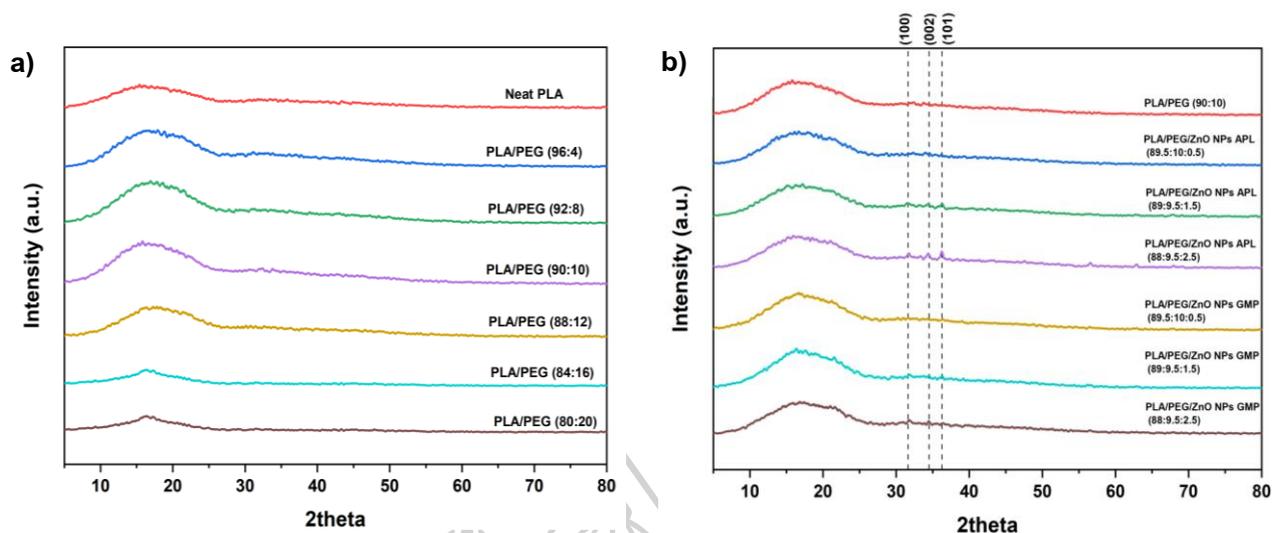
ฟิล์มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งอาจเกิดจากการรวมตัวของอนุภาค ZnO NPs (Agglomeration) ที่กระจายไม่ทั่วถึง ทำให้เกิดบริเวณที่มีความหนาแน่นของอนุภาคสูงในบางส่วนของฟิล์ม

ในขณะที่ที่ใช้ ZnO NPs GMP จาก เปลือกมังคุด พบว่าฟิล์มที่ได้มีความสม่ำเสมอและความใสดีกว่าระบบ ZnO NPs APL โดยฟิล์มทุกสูตรในระบบนี้มีพื้นผิวที่เรียบและโปร่งใสมากกว่าเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า ZnO NPs GMP มีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์ของ PLA/PEG ช่วยลดการเกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคและส่งผลให้โครงสร้างของฟิล์มมีความคงตัวมากขึ้น

โดยการเติม ZnO NPs ส่งผลให้ฟิล์มมีความขุ่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากการกระเจิงแสง แต่หากอนุภาคมีการกระจายตัวดี เช่น ZnO NPs GMP จะช่วยให้ฟิล์มคงความใสและความเรียบของพื้นผิวได้ดีกว่า ขณะเดียวกันยังช่วยเสริมความหนาแน่นและความคงตัวเชิงโครงสร้างของฟิล์มโดยรวม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim, I., et al และคณะ[58] ที่อธิบายว่าเนื่องจาก ZnO NPs มีขนาดเล็กมากและมีการกระจายตัวที่ดีมีการรวมตัวของอนุภาคน้อย ส่งผลให้การกระเจิงแสง (Light scattering) จึงน้อย ฟิล์มจึงยังคงความใส (Transparency)

4.2.5.2. การศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

การศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างเฉพาะแบบ Wurtzite ของ ZnO NPs นอกจากนี้พิกที่ปรากฏจะมีความเด่นชัดสูงบ่งชี้ถึงความเป็นผลึกของอนุภาคที่สังเคราะห์ขึ้น ZnO NPs โดยสารสกัดและสามารถบอกขนาดผลึกเฉลี่ยที่คำนวณได้จากขนาดผลึกมีขนาดเท่าไร โดยการทดสอบจะใช้สภาวะในการทดสอบใช้ Copper radiation $K\alpha$ (ความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม) ใช้ 10-80 องศา อัตราเร็ว 5 mm/min ตัวอย่างจะแสดงใน รูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 XRD pattern ของ a) फिल्मวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และ b) फिल्मวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

ในรูปที่ 4.33 a) XRD pattern ของ PLA/PEG พบว่าฟิล์มมีลักษณะกราฟที่เกือบจะเรียบ ไม่มีพีคที่ชัดเจนในช่วง 2θ 10° – 80° ซึ่งบ่งชี้ว่า PLA/PEG มีลักษณะ Amorphous หรือไม่เป็นผลึก (Non-crystalline) โดยไม่มีการสะท้อนรังสี X-ray จากโครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จึงไม่สามารถปรากฏพีคเด่นใน XRD pattern ได้ ซึ่งหมายความว่าฟิล์ม PLA/PEG ไม่มีการกระจายตัวที่ดีของผลึก ทำให้ฟิล์มมีความโปร่งใสสูงและมีสมบัติการยืดหยุ่นที่ดีจากการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ไม่ถูกยึดติดกับกันในลักษณะผลึก ในรูป b) XRD pattern ของ PLA/PEG ที่เสริมด้วย ZnO NPs พบว่าเริ่มมีการปรากฏพีคของ ZnO NPs ที่ $2\theta \approx 31.5^{\circ}$, 34.4° และ 36.3° ซึ่งเป็นพีคที่สอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างผลึกของ ZnO NPs ที่มีลำดับระเบียบในการจัดเรียงโมเลกุลในระดับนาโนเมตร โดยเฉพาะพีคที่ (100), (002) และ (101)

จากรูปที่ 4.33 a) XRD pattern ของฟิล์ม PLA/PEG พบว่าลักษณะกราฟมีความเรียบและไม่มีพีคที่เด่นชัดในช่วงมุม 2θ ระหว่าง 10° – 80° ซึ่งบ่งชี้ว่า PLA/PEG มีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบ amorphous สูง ไม่มีการสะท้อนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) จากระนาบผลึกที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ จึงไม่ปรากฏพีคที่ชัดเจนในรูปแบบของ XRD pattern ซึ่งลักษณะนี้สะท้อนให้เห็นว่า ฟิล์ม PLA/PEG มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ไม่เป็นระเบียบและไม่มีผลึกขนาดใหญ่เกิดขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีความโปร่งใสสูง

และมีความยืดหยุ่นที่ดี เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระโดยไม่ถูกยึดเหนี่ยวจากโครงสร้างผลึก

ในกราฟ (b) ซึ่งแสดงผลของฟิล์ม PLA/PEG ที่มีการเติม ZnO nanoparticles (ZnO NPs) พบว่ามีการปรากฏของพีคใหม่ในตำแหน่งมุม $2\theta \approx 31.5^\circ, 34.4^\circ$ และ 36.3° ซึ่งเป็นพีคเฉพาะของ ZnO NPs ที่สอดคล้องกับระนาบผลึก (100), (002) และ (101) ตามลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal wurtzite structure) ของ ZnO NPs การปรากฏของพีคเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า ZnO NPs ยังคงคงสภาพความเป็นผลึกได้ดีภายในเมทริกซ์ของ PLA/PEG และมีการจัดเรียงตัวในระดับนาโนเมตรอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งยืนยันถึงการมีอยู่ของ ZnO NPs ภายในฟิล์มและการผสมเข้ากับพอลิเมอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jaithon และคณะ [35] ที่อธิบายว่าผลของ XRD แสดงให้เห็นถึงโครงสร้าง Wurtzite ของ ZnO NPs ซึ่งแสดงถึงการมีอยู่ของอนุภาค ZnO ในฟิล์ม PLA/PEG

การปรากฏของพีคเหล่านี้บ่งชี้ว่า ZnO nanoparticles (ZnO NPs) ทำหน้าที่เป็นอนุภาคเสริมแรง (Reinforcing filler) ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับฟิล์มได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเสริม ZnO NPs เข้าไปในเมทริกซ์ของ PLA/PEG ช่วยให้เกิด การจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในที่มีระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้การสะท้อนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) ชัดเจนขึ้น แสดงให้เห็นว่า ZnO NPs สามารถสร้างและคงสภาพโครงสร้างผลึกขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรได้ดี ซึ่งช่วยเสริมให้ฟิล์มมีเสถียรภาพทางโครงสร้าง (Structural stability) และความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength) สูงขึ้น

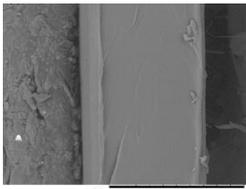
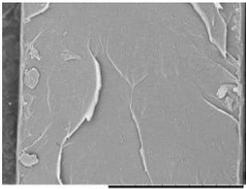
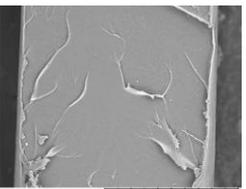
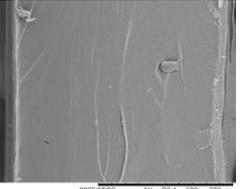
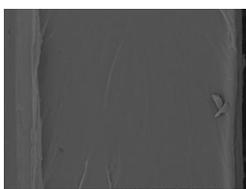
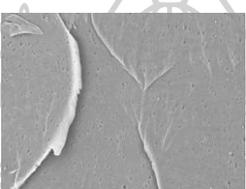
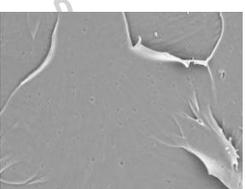
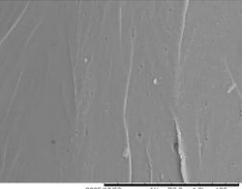
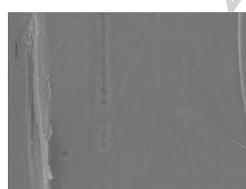
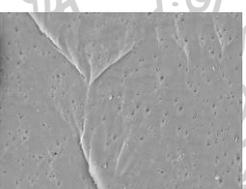
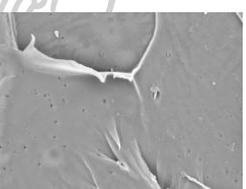
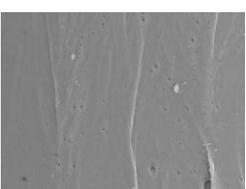
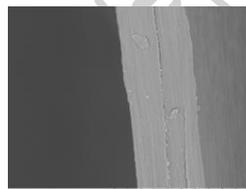
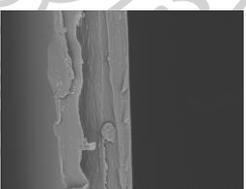
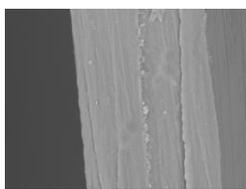
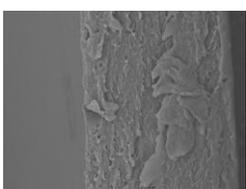
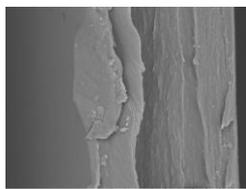
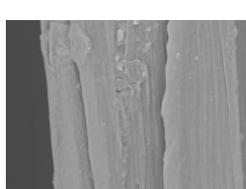
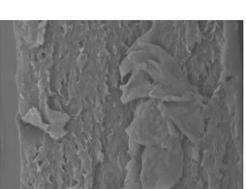
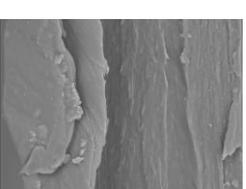
จากการวิเคราะห์ขนาดผลึกใน XRD pattern ของฟิล์มที่มีการเสริม ZnO NPs พบว่า ZnO NPs จาก APL (*Andrographis paniculata* leaves) และ GMP (*Garcinia mangostana* peels) สามารถกระจายตัวได้ภายในเมทริกซ์ของ PLA/PEG โดยเฉพาะในระบบ ZnO NPs GMP ที่มีการกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอ ช่วยลดการเกิดการรวมตัวของอนุภาค (Agglomeration) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดจุดเปราะในฟิล์ม การกระจายตัวที่ดีของ ZnO NPs จึงมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรง ความคงตัวทางโครงสร้าง และเสถียรภาพเชิงกลของฟิล์ม ทำให้ฟิล์มที่ได้มีสมบัติที่ดีขึ้น

4.2.5.1. การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

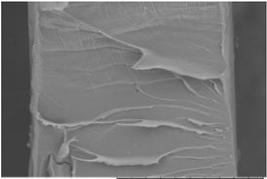
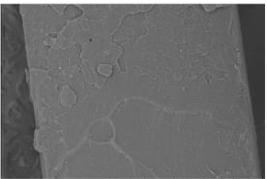
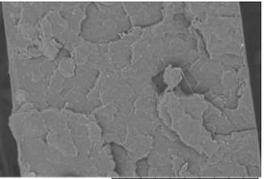
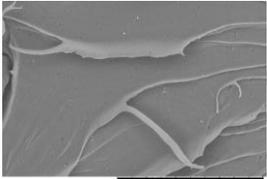
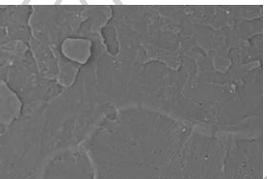
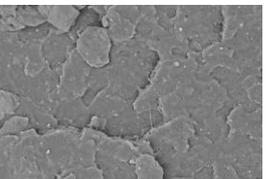
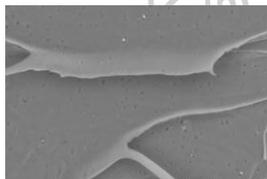
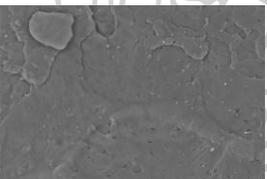
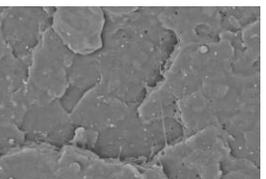
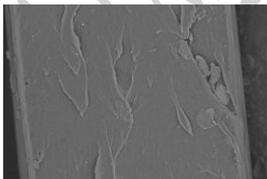
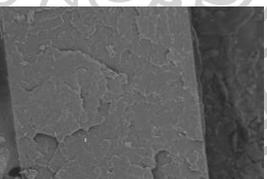
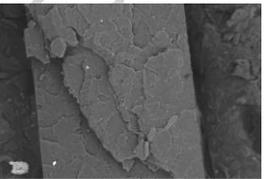
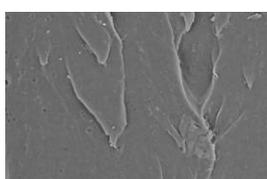
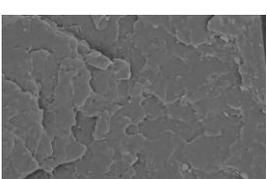
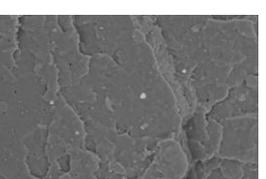
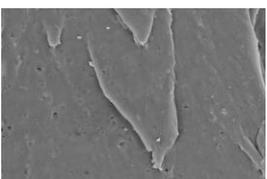
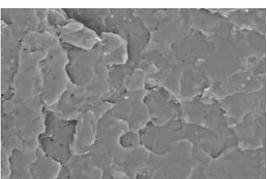
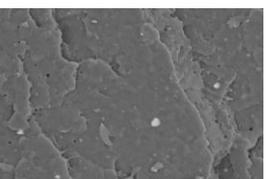
การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ที่ผ่านการทดสอบการดึงยึด ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) ที่พลังงาน 15 kV ที่กำลังขยาย 500x ,1000x และ 1500x โหมด SE ซึ่งตัวอย่างจะถูกเคลือบด้วยธาตุ Au ก่อนนำไปทดสอบ เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการแตกหักของชิ้นงานตัวอย่างจะแสดงในตารางที่ 4.12 และ 4.13



ตารางที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่ผ่านการทดสอบการดึงยึด ใช้สภาวะการทดสอบที่พลังงาน 15 kV
ที่กำลังขยาย 500x, 1000x และ 1500x ตามลำดับ

Magnification	Neat PLA	PLA/PEG (96:4)	PLA/PEG (92:8)	PLA/PEG (90:10)
500X				
1000X				
1500X				
Magnification	PLA/PEG (88:12)	PLA/PEG (84:16)	PLA/PEG (80:20)	
500X				
1000X				
1500X				

ตารางที่ 4.13 สันฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ที่ผ่านการทดสอบการดึงยืด ใช้สภาวะการทดสอบที่พลังงาน 15 kV ที่กำลังขยาย 500x, 1000x และ 1500x ตามลำดับ

Magnification	PLA/PEG/ZnO NPs APL (89.5:10:0.5)	PLA/PEG/ZnO NPs APL (89:9.5:1.5)	PLA/PEG/ZnO NPs APL (88:9.5:2.5)
500X			
1000X			
1500X			
Magnification	PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89.5:10:0.5)	PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89:9.5:1.5)	PLA/PEG/ZnO NPs GMP (88:9.5:2.5)
500X			
1000X			
1500X			

จากการศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบและความเข้ากันได้ของฟิล์ม PLA/PEG และ PLA/PEG/ZnO NPs ที่มีอัตราส่วนต่าง ๆ ได้แก่ PLA/PEG (100:0, 96:4, 92:8, 90:10, 88:12, 84:16, 80:20 %wt) และ PLA/PEG/ZnO NPs (89.5/10/0.5, 89/9.5/1.5, 88/9.5/2.5 %wt) ภายใต้สภาวะการทดสอบที่พลังงาน 15 kV ที่กำลังขยาย 500x, 1000x และ 1500x ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.33 พบลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่บ่งบอกถึงความแตกต่างด้านโครงสร้างและการกระจายตัวของสารเติมแต่งในแต่ละสูตรได้อย่างชัดเจน

สำหรับ ฟิล์ม Neat PLA (PLA/PEG 100:0) พบว่าพื้นผิวมีลักษณะเรียบเนียน (Smooth surface) โดยไม่พบการแยกเฟสหรือรูพรุนใด ๆ แสดงให้เห็นถึงความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้าง (Homogeneous phase) และการยึดเหนี่ยวระหว่างโซ่พอลิเมอร์ที่แน่นหนา ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลที่มีความแข็งแรงแต่เปราะ เนื่องจากไม่มีสาร Plasticizer ช่วยลดแรงยึดเหนี่ยวภายใน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gao, H. และคณะ [59] ที่อธิบายว่าพื้นผิวแตกหักมีลักษณะเรียบ ไม่มีความขรุขระหรือร่องรอยการดึงยืดอย่างมีนัยสำคัญ บ่งชี้ว่าฟิล์มแตกหักโดยไม่มีการเสียรูปพลาสติกมาก่อน (Absence of plastic deformation)

เมื่อมีการเติม PEG ในสัดส่วนต่ำ เช่น PLA/PEG (96:4) และ (92:8) พบว่าพื้นผิวยังคงมีลักษณะเรียบ แต่เริ่มปรากฏร่องรอยของการแยกตัวเล็กน้อย (Micro-phase separation) บางบริเวณ แสดงถึงการเริ่มแทรกตัวของ PEG ในเมทริกซ์ของ PLA ซึ่งช่วยเพิ่มการเคลื่อนที่ของโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยไม่กระทบต่อโครงสร้างมากนัก

ในสูตร PLA/PEG (90:10) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด พบว่าพื้นผิวฟิล์มยังคงมีความเรียบและต่อเนื่องดี แสดงถึง การกระจายตัวของ PEG ที่สม่ำเสมอภายในเมทริกซ์ของ PLA ทำให้เกิดความสมดุลระหว่างความยืดหยุ่นและความแข็งแรงเชิงกลสูงสุด ลักษณะนี้บ่งชี้ว่าการเติม PEG ในระดับดังกล่าวสามารถช่วยปรับปรุงโครงสร้างของฟิล์มได้โดยไม่ก่อให้เกิดการแยกเฟส

อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ PEG สูงขึ้น เช่นในสูตร PLA/PEG (88:12), (84:16) และ (80:20) พบการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวอย่างชัดเจน โดยฟิล์มเริ่มมีลักษณะ หยาบ (Rough surface) และปรากฏรอยแตก ร่องช่องว่าง อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นผลจากการไม่เข้ากันระหว่างเฟสของ PLA และ PEG ที่มากเกินไป ทำให้เกิดบริเวณที่มีการรวมตัวของ PEG หรือช่องว่างในเนื้อฟิล์ม ส่งผลให้ความเป็นเนื้อเดียวกันลดลงและโครงสร้างโดยรวมไม่เสถียร ทั้งยังสอดคล้องกับสมบัติเชิงกล

ที่ความแข็งแรงลดลงแต่ความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bijarimi, M. และคณะ[60] ที่อธิบายว่าเกิดการแยกเฟสระหว่าง PLA (เมทริกซ์) และ PEG (เฟสที่กระจายตัว) เนื่องจาก PLA และ PEG มีความเข้ากันได้ไม่สมบูรณ์ (Immiscibility) โดยเฉพาะที่อุณหภูมิหลอมเหลว นอกจากนี้ จะเห็นเป็นช่องว่าง (Voids) หรือ รูพรุน (Porous structure) ชัดเจนบนเมทริกซ์ PLA ช่องว่างเหล่านี้คือตำแหน่งที่ PEG เคยกระจายตัวอยู่

ในตารางที่ 4.13 ของฟิล์ม PLA/PEG/ZnO NPs ที่มีการเติม ZnO NPs ในอัตราส่วน 0.5% (89.5/10/0.5) พบว่า PLA/PEG/ZnO NPs APL (89.5/10/0.5) พบว่า ZnO NPs APL สามารถกระจายตัวได้ดีภายในเมทริกซ์ของฟิล์ม โดยไม่พบการเกาะกลุ่มหรือรวมตัวของอนุภาคอย่างชัดเจน ทำให้พื้นผิวของฟิล์มยังคงเรียบเนียนและสม่ำเสมอ ทั้งในระดับกำลังขยาย 500x, 1000x และ 1500x ซึ่งแสดงถึงการเข้ากันได้ดีระหว่าง ZnO NPs กับเมทริกซ์พอลิเมอร์ PLA/PEG การกระจายตัวในลักษณะนี้ช่วยให้ ZnO NPs APL ทำหน้าที่เป็นตัวเสริมแรง (Reinforcing filler) ที่เพิ่มความแข็งแรงของฟิล์มได้โดยไม่ทำลายความต่อเนื่องของโครงสร้าง

อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO NPs APL เป็น 1.5% (PLA/PEG/ZnO NPs APL 89/9.5/1.5) เริ่มพบการเกาะกลุ่มของอนุภาค ZnO NPs APL บางส่วน โดยเฉพาะในระดับกำลังขยายสูง (1000x และ 1500x) ซึ่งปรากฏเป็นจุดขาวและพื้นผิวที่ไม่เรียบ บ่งบอกถึงการกระจายตัวที่เริ่มไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้พื้นผิวของฟิล์มเริ่มมีความหยาบมากขึ้น

ในสูตรที่มีการเติม ZnO NPs สูงสุดคือ 2.5% (PLA/PEG/ZnO NPs APL 88/9.5/2.5) พบการ รวมตัวของอนุภาค ZnO NPs (Agglomeration) อย่างชัดเจนในระดับจุลภาค โดยพื้นผิวฟิล์มมีลักษณะ ขรุขระและไม่สม่ำเสมอ ปรากฏจุดหนาแน่นของอนุภาคจำนวนมาก ซึ่งบ่งชี้ว่าการกระจายตัวที่ไม่ดีของ ZnO NPs APL เกิดการรวมตัวของอนุภาคในลักษณะนี้อาจทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงเชิงกลเพิ่มขึ้นจากการเสริมแรงเฉพาะจุด แต่ในขณะเดียวกัน อาจเพิ่มความเปราะของวัสดุ เนื่องจากจุดรวมตัวของอนุภาคกลายเป็นบริเวณสะสมความเค้น (Stress concentration) ที่ทำให้ฟิล์มแตกหักได้ง่ายขึ้นและมีสีที่ขุ่นขึ้นอย่างมาก

สำหรับฟิล์มในระบบ ZnO NPs GMP พบว่าอนุภาค ZnO NPs GMP มีการกระจายตัวที่ดีกว่า ZnO NPs APL อย่างเห็นได้ชัด โดยในสูตร PLA/PEG/ZnO NPs GMP (89.5/10/0.5) พื้นผิวฟิล์มยังคง เรียบและต่อเนื่อง คล้ายคลึงกับสูตร APL ที่ 0.5% แต่ที่ความขยายสูง (1000x–1500x) พบเพียงร่องรอยเล็กน้อยของจุดกระจาย ZnO NPs GMP ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเมทริกซ์พอลิเมอร์

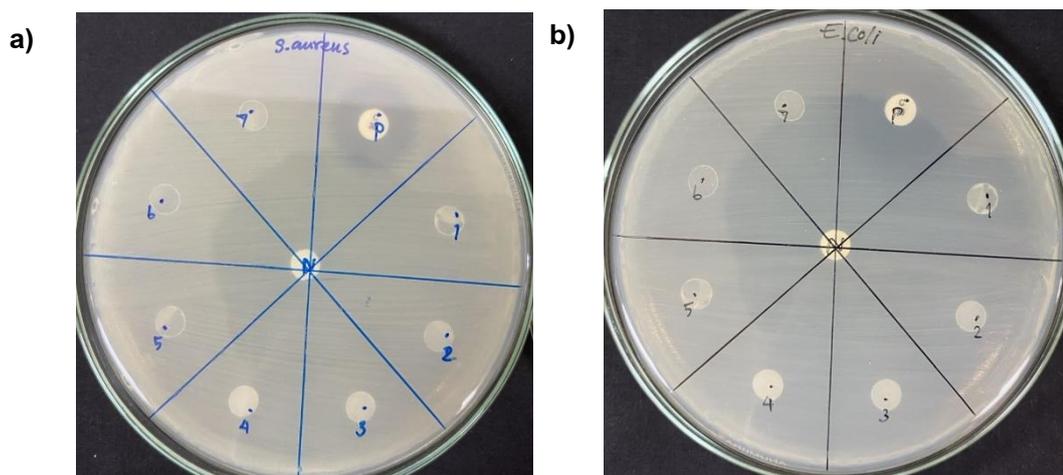
เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO NPs GMP เป็น 1.5% (PLA/PEG/ZnO NPs 89/9.5/1.5) พบว่าอนุภาค ZnO NPs GMP ยังคงกระจายตัวได้ดีโดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มใหญ่ พื้นผิวฟิล์มยังคงมีความเรียบและสม่ำเสมอมากกว่าระบบ APL ในอัตราส่วนเดียวกัน แสดงถึงความเข้ากันได้ที่ดีของ ZnO NPs GMP กับเมทริกซ์ PLA/PEG ซึ่งช่วยให้ฟิล์มมีโครงสร้างที่แน่นและคงรูปมากขึ้น

ในขณะที่สูตร PLA/PEG/ZnO NPs (88/9.5/2.5) พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดี แม้ว่าจะเริ่มมี ร่องรอยของการรวมตัวเล็กน้อย แต่ไม่มากเท่ากับ ZnO NPs APL พื้นผิวยังคงมีความต่อเนื่องและความสม่ำเสมอในระดับหนึ่ง แสดงให้เห็นว่า ZnO NPs GMP มีความสามารถในการกระจายตัวและยึดเกาะกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ได้และยังคงความใสของฟิล์มที่ดีกว่า ZnO NPs APL สอดคล้องกับงานวิจัยของ Oivanen, M., et al. และคณะ [51] ที่สามารถสนับสนุนได้ว่าสำหรับนาโนคอมโพสิตที่มีอนุภาคนาโนขนาดเล็กมากและกระจายตัวไม่เกิดการรวมตัวกันเกาะกลุ่มกัน

4.2.6. การศึกษาด้านเชื้อจุลชีพของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติก

แอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

การทดสอบการต้านเชื้อจุลชีพของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ด้วยวิธี Disc diffusion method จากแบคทีเรียแกรมบวก (G+) *Staphylococcus aureus* ATCC 6538 และแบคทีเรียแกรมลบ (G-) *Escherichia coli* TISTR 073 โดยใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM E2180 โดยใช้ตัวควบคุมเป็น *Chloramphenicol* จะทำการเตรียมตัวอย่างชิ้นงานฟิล์มสูตรที่ PLA/PEG ที่อัตราส่วน 90:10 PLA/PEG/ZnO NPs ที่อัตราส่วน 89.5/10/0.5, 89/9.5/1.5 และ 88/ 9.5/2.5 ขนาดประมาณ 6 มิลลิเมตร จะแสดงดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 การต้านเชื้อจุลชีพของฟิล์ม (1) PLA/PEG (90:10) และฟิล์มผสม PLA/PEG/ZnO NPs ชนิด (2-4) APL และ (5-7) GMP ที่มีปริมาณอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ 0.5 ,1.5 และ 2.5% ตามลำดับ ต่อเชื้อ a) *S. aureus* และ b) *E. coli*

จากรูปที่ 4.34 พบว่าผลการทดสอบการต้านเชื้อบนผิวฟิล์ม PLA/PEG (90:10) และ PLA/PEG/ZnO NPs ที่ อัตราส่วน (89.5:10:0.5), (89:9.5:1.5) และ (88:9.5:2.5) จากผลการทดสอบการต้านเชื้อจุลชีพของฟิล์ม PLA/PEG (90:10) และฟิล์มผสม PLA/PEG/ZnO NPs ที่มีปริมาณอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในรูปแบบต่างๆ ต่อเชื้อ *S. aureus* และ *E. coli* แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างชัดเจนในประสิทธิภาพการต้านเชื้อจุลชีพของฟิล์มแต่ละประเภท

การทดสอบการต้านเชื้อ *S. aureus*

จากรูป 4.34 a) โดยเริ่มจากฟิล์ม PLA/PEG (90:10) หมายเลข 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นฟิล์มใสในตอนเริ่มต้น แต่เมื่อทำการทดสอบการต้านเชื้อในระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง จะพบว่าฟิล์มมีความขุ่นขึ้นหลังจากการทดสอบ แสดงว่าฟิล์ม PLA/PEG (90:10) นี้ไม่ได้แสดงการยับยั้งเชื้อที่มีประสิทธิภาพมากนักเมื่อเทียบกับฟิล์มที่มีการผสม ZnO NPs โดยฟิล์ม PLA/PEG/ZnO NPs APL โดยใช้สารสกัดจากใบฟ้าทะลายโจร (หมายเลข 2-4) ซึ่งมีการเพิ่มอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 0.5%, 1.5% และ 2.5% ตามลำดับ กลับแสดงผลที่ดีกว่าโดยมีความขุ่นของฟิล์มที่ไม่เพิ่มขึ้นมากหลังจากการทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการต้านเชื้อจุลชีพที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และการต้านเชื้อที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวฟิล์มนั้นมีความคงทนและมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นกว่า PLA/PEG (90:10) ที่ไม่มีการผสม ZnO NPs เลย

ในขณะที่ฟิล์ม PLA/PEG/ZnO NPs GMP โดยใช้สารสกัดจากเปลือกมังคุด (หมายเลข 5-7) ซึ่งมีการเพิ่ม ZnO NPs ในปริมาณเดียวกัน 0.5%, 1.5%, และ 2.5% พบว่า ฟิล์มชนิดนี้ซึ่งเดิมมีความใสอยู่แล้วยังคงความใสอยู่หลังการทดสอบ ซึ่งบ่งบอกถึงการต้านเชื้อทั้ง *S. aureus* ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การทดสอบการต้านเชื้อ *E. coli*

จากรูปที่ 4.34 b) โดยเริ่มจากฟิล์ม PLA/PEG (90:10) หมายเลข 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นฟิล์มใสในตอนเริ่มต้น แต่เมื่อทำการทดสอบการต้านเชื้อในระยะเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง จะพบว่าฟิล์มมีความขุ่นขึ้นหลังจากการทดสอบ แสดงว่าฟิล์ม PLA/PEG (90:10) นี้ไม่ได้แสดงการยับยั้งเชื้อที่มีประสิทธิภาพมากนักเมื่อเทียบกับฟิล์มที่มีการผสม ZnO NPs โดยฟิล์ม PLA/PEG/ZnO NPs APL โดยใช้สารสกัดจากใบฟ้าทะลายโจร (หมายเลข 2-4) ซึ่งมีการเพิ่มอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ในปริมาณ 0.5%, 1.5% และ 2.5% ตามลำดับ กลับแสดงผลที่ดีกว่าโดยมีความขุ่นของฟิล์มที่ไม่เพิ่มขึ้นมากหลังจากการทดสอบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการต้านเชื้อจุลชีพที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และการต้านเชื้อที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวฟิล์มนั้นมีความคงทนและมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นกว่า PLA/PEG (90:10) ที่ไม่มีการผสม ZnO NPs เลย

ในขณะที่ฟิล์ม PLA/PEG/ZnO NPs GMP โดยใช้สารสกัดจากเปลือกมังคุด (หมายเลข 5-7) ซึ่งมีการเพิ่ม ZnO NPs ในปริมาณเดียวกัน 0.5%, 1.5%, และ 2.5% พบว่า ฟิล์มชนิดนี้ซึ่งเดิมมีความใสอยู่แล้วยังคงความใสอยู่หลังการทดสอบ ซึ่งบ่งบอกถึงการต้านเชื้อทั้ง *E. coli* ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แต่เมื่อสังเกตลักษณะของฟิล์ม PLA/PEG/ZnO NPs APL โดยใช้สารสกัดจากใบฟ้าทะลายโจร ที่ทำการทดสอบต้านเชื้อ *S. aureus* และ *E. coli* พบว่าฟิล์ม PLA/PEG/ZnO NPs APL ที่ทดสอบการต้านเชื้อ *S. aureus* จะมีความขุ่นที่เพิ่มขึ้นมากกว่าที่ทดสอบการต้านเชื้อ *E. coli* แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีการต้านเชื้อ *E. coli* ได้ดีกว่าเชื้อ *S. aureus* บนผิวฟิล์ม

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของฟิล์ม PLA/PEG/ZnO NPs GMP โดยใช้สารสกัดจากเปลือกมังคุดซึ่งเป็นฟิล์มที่มีความใสมากกว่าเนื่องจากการกระจายอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่มีรูปผลึกเป็นแท่งมีพื้นที่ผิวมากกว่าและไม่จับตัวกันเป็นกลุ่มทำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีกว่าฟิล์ม PLA/PEG/ZnO NPs APL โดยใช้สารสกัดจากใบฟ้าทะลายโจร พบว่าฟิล์ม PLA/PEG/ZnO NPs GMP ที่ทำการทดสอบการต้านเชื้อ *E. coli* จะคงความใสที่เหมือนเดิมโดยไม่มีเชื้อมาเจริญเติบโตที่

ผิวเมื่อสิ้นสุดการทดสอบที่ 24 ชั่วโมง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rahul Goyal [43] และคณะ อธิบายไว้ว่า ZnO NPs แบบ Nanorods มีประสิทธิภาพในการต้าน *E. coli* เนื่องจากปลายแหลม เพิ่มพื้นที่สัมผัสกับเมมเบรนแบคทีเรีย ทำให้สามารถเหนี่ยวนำปฏิกิริยาระหว่างไอออน ZnO NPs กับไอออนในเมมเบรนได้ การเคลื่อนที่ของแบคทีเรียไปพร้อมกับ ZnO NPs ช่วยเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกับปลายแหลม (Tip) ซึ่งทำให้เกิดผลกระทบต่อโครงสร้างผนังเซลล์และเมมเบรน นอกจากนี้ ยังมีกลไกจากการปล่อย Zn^{2+} และ ROS ที่ทำลายโครงสร้างเมมเบรนและกระตุ้น Oxidative stress ทำให้เซลล์แบคทีเรียเสียหายและตาย



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์แบบแอคทีฟ (Active packaging film) โดยจะแบ่งเป็น 2 ตอน ตอนที่ 1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จากสารสกัดสมุนไพร และตอนที่ 2 การศึกษาฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

5.1.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยใช้สารสกัดจากสมุนไพร

ตอนที่ 1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ด้วยกระบวนการสังเคราะห์เชิงชีวภาพ (Green synthesis) โดยใช้สารสกัดจากสมุนไพรใบฟ้าทะลายโจรและเปลือกมังคุด ที่ใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำและเอทานอล อัตราส่วนที่ 75:25 ซึ่งสารสกัดสมุนไพรจะทำหน้าที่เป็นสารรีดิวซ์ช่วยเปลี่ยน Zinc acetate dihydrate ได้เป็น ZnO NPs จากสมุนไพรใบฟ้าทะลายโจร (ZnO NPs APL) และ ZnO NPs จากเปลือกมังคุด (ZnO NPs GMP) และนำมาศึกษาสมบัติต่าง ๆ เช่น สมบัติทางเคมี ลักษณะสัณฐานวิทยา และการต้านจุลชีพ

การศึกษากายการสกัดจากสมุนไพรฟ้าทะลายโจรหรือเปลือกมังคุด พบว่าจากผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่า อัตราส่วนของตัวทำละลาย เอทานอล:น้ำ ที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds) จากสมุนไพรทั้ง ใบฟ้าทะลายโจร และ เปลือกมังคุด คือ เอทานอล 75% เนื่องจากให้ทั้ง ปริมาณสารสกัดและค่าการดูดกลืนแสงสูง มีประสิทธิภาพในการสกัดสารฟีนอลิกและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง และยังสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาการระเหยของเอทานอลและการเกิดเจลจากน้ำที่มากเกินไปได้ นอกจากนี้สารสกัดที่ได้ยังมีหมู่ฟังก์ชันสำคัญ เช่น O-H, C=O และ C-O ซึ่งบ่งบอกถึงการมีสารฟีนอลิกที่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) ในกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ทางชีวภาพ (Green synthesis) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

และการสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์โดยใช้สารสกัดจากสมุนไพร พบว่าการสังเคราะห์ ZnO NPs จากสารสกัดสมุนไพรทั้งสองชนิดสามารถเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งสองชนิดมีโครงสร้างผลึกแบบ Wurtzite (27–29 นาโนเมตร) และแสดงหมู่ฟังก์ชัน O-H, C=O, C-H และ Zn-O จาก FTIR ซึ่งยืนยันการเกิดพันธะ Zn-O อย่างชัดเจน โดย ZnO NPs APL จากใบฟ้าทะลาย

โโจร พบว่าอนุภาคเป็นรูปทรงกลม (Spherical shape) ขนาดเล็ก มีการเกาะกันเป็นกลุ่ม ขนาดอนุภาคเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 368.91 ± 99.35 นาโนเมตร และปริมาณ Zn สูงกว่า ขณะที่ ZnO NPs GMP จากเปลือกมังคุด มีอนุภาคเป็นรูปทรงแท่งเหลี่ยมขนาดใหญ่ ขนาดอนุภาคตามแนวยาวเฉลี่ยประมาณ 2479.86 ± 687.16 นาโนเมตร และตามแนวขวางเฉลี่ยประมาณ 669.13 ± 96.38 นาโนเมตร มีประสิทธิภาพในการ ด้านเชื้อจุลชีพสูงกว่า โดยเฉพาะต่อ *E. coli* เนื่องจาก ZnO NPs GMP ที่มีรูปทรงแบบแท่งเหลี่ยม (Nanorods) มีพื้นที่สัมผัสมาก ทำให้สามารถสัมผัสและทำลายเมมเบรนของ *E. coli* ได้ดีขึ้น พร้อมกระตุ้น Oxidative stress ส่งผลให้แบคทีเรียเสียหายและตาย

จากความแตกต่างขององค์ประกอบจากสารสกัดสมุนไพร ทำให้ได้ ZnO NPs ที่มีรูปร่างและขนาดแตกต่างกัน แสดงให้เห็นได้ชัดจากภาพ SEM และ TEM จากสารประกอบฟีนอลในใบฟ้าทะลายโโจร ที่มี พันธะเดี่ยว (Single bond) ทำหน้าที่เป็น ตัวรีดิวซ์ ส่งผลให้ ZnO NPs เติบโตในลักษณะ ไอโซทรอปิก ทำให้ได้ ZnO NPs ขนาดเล็กและสม่ำเสมอในรูปทรงกลม (Spherical shape) เนื่องจากไม่มีโครงสร้างที่บังคับทิศทางการเติบโตของผลึก ในขณะที่ ฟลาโวนอยด์ในเปลือกมังคุด ที่มี พันธะคู่ (Double bond) ทำให้การเติบโตของ ZnO NPs เป็นแบบ แอนิโซทรอปิก (Anisotropic growth) และเกิดการ Ladder-like structure ส่งผลให้ได้อนุภาคขนาดใหญ่และรูปทรงแท่งเหลี่ยม (Nanorods) ทั้งสองสารประกอบทำหน้าที่เป็น สารรีดิวซ์และคงตัว (Reducing & Stabilizing agent) ช่วยให้การสังเคราะห์ ZnO NPs มีลักษณะและขนาดที่แตกต่างตามชนิดของสารสกัดที่ใช้

5.1.2 การศึกษาฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

ตอนที่ 2 การศึกษาฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) การเตรียมจะใช้กระบวนการ Cast film extruder เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) กระบวนการขึ้นรูปฟิล์มประกอบด้วยสองขั้นตอน คือ ขั้นแรกเตรียม Masterbatch ด้วยเครื่อง Twin-screw extruder ทำการเตรียม PLA/PEG ที่ 100:0, 96:4, 92:8, 90:10, 88:12, 84:16 และ 80:20 และ Masterbatch PLA/PEG/ZnO NPs ที่ 79.2/19.8/1, 77.6/19.4/3 และ 76.0/19.0/5 ตามลำดับ จากนั้นนำ Masterbatch ที่ได้มาผสมกับ Neat PLA ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:1 แล้วทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่อง Cast Film Extruder จะได้ฟิล์มในอัตราส่วน PLA/PEG/ZnO NPs ที่

89.5/10/0.5, 89/9.5/1.5 และ 88/9.5/2.5 %wt ตามลำดับ จากการเตรียมฟิล์มดังกล่าวนำมาศึกษาเพื่อวิเคราะห์ผลของการเติม ZnO NPs ต่อสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์ม ได้แก่ สมบัติทางเคมี สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล ลักษณะสัญญาณวิทยา และสมบัติการต้านจุลชีพ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการกระจายตัวของอนุภาค ZnO NPs และผลต่อสมบัติโดยรวมของฟิล์มบรรจุภัณฑ์เชิงแอคทีฟที่พัฒนาได้

การศึกษาดัชนีการไหล (MFR) พบว่า การเติม PEG ลงใน PLA ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ โดยสูตร PLA/PEG (80:20) ให้ค่า MFR สูงสุดที่ 27.10 g/10 min เนื่องจาก PEG ทำหน้าที่เป็น Plasticizer ช่วยลดความหนืดของการหลอม ในขณะที่การเติม ZnO NPs มีผลต่อการเพิ่มการไหลขึ้นในระดับหนึ่ง แต่หากเติมมากเกินไปจะทำให้การขึ้นรูปฟิล์มยากขึ้น การทำ Master batch จึงเป็นวิธีที่เหมาะสม ช่วยให้ ZnO NPs และ PEG กระจายตัวสม่ำเสมอ ทำให้ค่า MFR ลดลงอยู่ในระดับที่เหมาะสม ประมาณ 10–13 g/10 min ส่งผลให้วัสดุสามารถ ขึ้นรูปฟิล์มได้ง่ายและมีความเสถียรสูงขึ้น

การศึกษาสมบัติทางเคมีของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จากผลการศึกษาพบว่า การเติม PEG ช่วยเพิ่มความเป็นเนื้อเดียวของฟิล์ม PLA, ทำให้การส่องผ่านแสงและสมบัติ Hydrophilic สูงขึ้นจากโครงสร้างที่ยืดหยุ่นมากขึ้น ขณะที่การเติม ZnO NPs โดยเฉพาะ ZnO NPs APL ช่วยเพิ่มความ Hydrophobic และความทนทานต่อความชื้นของฟิล์ม ผล FTIR ยืนยันการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่าง PEG-PLA และพีคของพันธะ Zn-O แสดงถึงการกระจายตัวของ ZnO NPs ที่สมบูรณ์ นอกจากนี้ ZnO NPs ยังช่วยลดการบวมของฟิล์มและลดการซึมผ่านของไอน้ำจากการทำหน้าที่เป็นเกราะกั้นและสร้างเส้นทางคดเคี้ยวในการแพร่ของไอน้ำ

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จากผลการทดสอบพบว่า การเติม PEG ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวจากความร้อนของฟิล์มลดลงตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น แสดงถึงการลดลงของเสถียรภาพทางความร้อน ขณะที่การเติม ZnO NPs GMP โดยเฉพาะที่ 1.5 %wt ช่วยเพิ่มเสถียรภาพได้ดีที่สุดจากการกระจายตัวที่ดี ผล DSC แสดงว่า PEG ช่วยลดค่า T_g และ T_{cc} แต่เพิ่มค่าการตกผลึก (X_c) สูงสุดราว 31% แสดงบทบาททั้งเป็น Plasticizer นอกจากนี้ยังเอื้อใน

การตกผลึกได้มากขึ้น ส่วน ZnO NPs GMP ที่เหมาะสมช่วยเพิ่มความเป็นผลึกโดยไม่ส่งผลค่า T_m โดยรวม PEG และ ZnO NPs ที่เหมาะสมช่วยให้ฟิล์มมีความเสถียร ยืดหยุ่น และตกผลึกดี

การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) การเติม PEG ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและความแข็งแรงของฟิล์มได้ดีที่สุดที่สัดส่วน 10% ส่วน ZnO NPs โดยเฉพาะ 1.5 %wt ZnO NPs GMP ช่วยเสริมแรงให้ฟิล์มแข็งและเหนียวขึ้นจากการกระจายตัวที่ดีของอนุภาค สำหรับการทดสอบแรงฉีกขาด พบว่า PLA/PEG (90:10) ให้ค่าต้านแรงฉีกขาดสูงสุดทั้งแนว MD และ TD ขณะที่ 0.5 %wt ZnO NPs APL ช่วยเพิ่มความเหนียวของฟิล์มได้มากที่สุด แต่เมื่อเติมมากเกินไปค่าลดลงจากการรวมตัวของอนุภาค แสดงว่า การกระจายตัวของ ZnO NPs มีผลสำคัญต่อความแข็งแรงของฟิล์ม

การศึกษาสัณฐานวิทยาของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) พบว่า การเติม PEG ช่วยเพิ่มความโปร่งใสและความยืดหยุ่นของฟิล์ม PLA ได้โดยไม่เปลี่ยนสีอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการเติม ZnO NPs ทำให้ฟิล์มขุ่นขึ้นจากการกระเจิงแสง โดยเฉพาะเมื่อปริมาณอนุภาคสูงเกินไป ผล XRD แสดงว่า PLA/PEG มีโครงสร้าง Amorphous สูง ขณะที่การเติม ZnO NPs ทำให้เกิดพิกของโครงสร้างผลึก ZnO (Wurtzite) บ่งชี้ถึงการกระจายตัวและเสริมความแข็งแรงของฟิล์ม ผล SEM ยืนยันว่า ZnO NPs โดยเฉพาะชนิด GMP กระจายตัวได้ดี ช่วยให้ฟิล์มมีพื้นผิวเรียบ โปร่งใส และคงรูปได้ดีกว่าระบบที่ใช้ ZnO NPs APL

และการศึกษาด้านเชื้อจุลชีพของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จากผลการทดสอบพบว่าฟิล์ม PLA/PEG (90:10) ไม่มีประสิทธิภาพในการต้านเชื้ออย่างชัดเจน ขณะที่การเติม ZnO NPs ทั้งจาก APL และ GMP ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการต้านเชื้อ *S. aureus* และ *E. coli* ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะฟิล์มที่ใช้ ZnO NPs GMP ซึ่งมีการกระจายตัวของอนุภาคดีและคงความใสหลังการทดสอบ แสดงถึงการต้านเชื้อได้ดีกว่า ZnO NPs APL ทั้งนี้ ฟิล์มที่มี ZnO NPs GMP รูปแท่ง แสดงการต้าน *E. coli* ได้ดีกว่า *S. aureus* เนื่องจากเกิดกลไกการทำลายเชิงกายภาพ (Mechanical damage) โดย ZnO NPs แบบ Nanorods ต้าน *E. coli* ได้ดีขึ้นเพราะปลายแหลมเพิ่มพื้นที่สัมผัสกับเมมเบรนแบคทีเรีย และเหนียวนำปฏิกริยาระหว่างไอออน ZnO NPs กับไอออนในเมมเบรน การเคลื่อนที่ของ

แบคทีเรียเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกับปลายแหลม ซึ่งทำให้เกิดการทำลายโครงสร้างเมมเบรนและกระตุ้น Oxidative stress ส่งผลให้เซลล์แบคทีเรียเสียหายและตาย

ดังนั้น จากงานวิจัยนี้การใช้สารสกัดสมุนไพรทั้งสองชนิดสามารถสังเคราะห์ ZnO NPs ได้สำเร็จ โดยให้ลักษณะอนุภาคที่แตกต่างกัน ZnO NPs APL จากใบฟ้าทะลายโจรมีรูปร่างทรงกลม ส่วน ZnO NPs GMP จากเปลือกมังคุดมีรูปร่างทรงแท่ง ซึ่งความแตกต่างของรูปร่างนี้เป็นข้อดีเนื่องจากสามารถควบคุมหรือออกแบบรูปร่างของอนุภาค เพื่อปรับสมบัติให้เหมาะกับการใช้งานเฉพาะด้านได้ โดยเฉพาะด้านการต้านเชื้อจุลชีพ ในขณะที่ฟิล์ม PLA/PEG การเติม PEG ที่ทำหน้าที่เป็น Plasticizer ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์ม และเมื่อเสริมด้วย ZnO NPs GMP จะได้ฟิล์มที่ใสกระจายตัวดี และมีสมบัติการต้านเชื้อสูง เหมาะสำหรับบรรจุภัณฑ์แบบแอคทีฟที่ต้องการความโปร่งใสและป้องกันจุลชีพ ส่วนฟิล์มที่ใช้ ZnO NPs APL ซึ่งมีความทึบแสงมากกว่า เหมาะกับบรรจุภัณฑ์แอคทีฟที่ต้องการป้องกันแสงและยับยั้งเชื้อ ในผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อแสง

5.2. ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 การประยุกต์ใช้กับสมุนไพร หรือผลไม้ชนิดอื่น เพื่อศึกษาขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ที่หลากหลายมากขึ้น
- 5.2.2 การพัฒนาในอนาคตของ ZnO NPs ควรศึกษาการควบคุมขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ให้เฉพาะเจาะจงมากขึ้น
- 5.2.3 การประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหารจริง ควรนำฟิล์ม PLA/PEG/ZnO NPs ที่ได้ไปทดสอบในสภาวะการใช้งานจริง เช่น การห่อหุ้มอาหารสดหรืออาหารแปรรูป เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการยืดอายุการเก็บรักษา การต้านเชื้อในสภาวะชื้น และการทนต่อแสงหรืออุณหภูมิ
- 5.2.4 การประเมินความปลอดภัย (Safety Assessment) เนื่องจาก ZnO NPs มีขนาดระดับนาโน ควรมีการศึกษาการแพร่ของ Zn^{2+} จากฟิล์มลงสู่อาหาร รวมถึงการประเมินเพื่อยืนยันความปลอดภัยในการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์อาหารและทางการแพทย์

รายการอ้างอิง

1. Nanotechnology. 2014; Available from:
<https://www.faq108.co.th/common/topic/nano.php>.
2. Athanasoulia, I.-G. and P.A. Tarantili, Preparation and characterization of polyethylene glycol/poly(L-lactic acid) blends. 2017. 89(1): p. 141-152.
3. Hernandez-Izquierdo, V.M., et al., Thermal Transitions and Extrusion of Glycerol-Plasticized Whey Protein Mixtures. *Journal of food science*, 2008. 73: p. E169-75.
4. Zinc oxide nanoparticle 2008; Available from: <http://www.nanomaterials.co.th>.
5. Das, B., et al., Acylated 5,7,2',6'-oxygenated flavone glycosides from *Andrographis alata*. *Phytochemistry*, 2006. 67(10): p. 978-983.
6. Albuquerque, B.R., et al. Insights into the Chemical Composition and In Vitro Bioactive Properties of Mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) Pericarp. *Foods*, 2023. 12, DOI: 10.3390/foods12050994.
7. Datta, R. and M. Henry, Lactic Acid: Recent Advances in Products, Processes and Technologies A Review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2006. 81: p. 1119-1129.
8. Auras, R., B. Harte, and S. Selke, An Overview of Polylactides as Packaging Materials. *Macromolecular bioscience*, 2004. 4: p. 835-64.
9. Garlotta, D., A Literature Review of Poly(Lactic Acid). *Journal of Polymers and the Environment*, 2001. 9: p. 63-84.
10. Conn, R.E., et al., Safety assessment of polylactide (PLA) for use as a food-contact polymer. *Food and Chemical Toxicology*, 1995. 33(4): p. 273-283.
11. Li, W., et al., Toward Understanding and Optimizing the Template-Guided Synthesis of Chiral Polyaniline Nanocomposites. *Macromolecules*, 2002. 35(27): p. 9975-9982.
12. Rodriguez, J., Thermo-sensitive actuator capabilities assessment of a composite material based on a two-way shape memory semicrystalline polymer. 2018.
13. Polyethylene glycol. 2002; Available from:
https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_glycol.

14. Product Polyethylene_glycol 2024; Available from:
<https://www.chemipan.com/a/th-th/244>.
15. Nanocomposite. 2006; Available from:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Nanocomposite>.
16. Pabbati, R., V.R. Kondakindi, and F. Shaik, Applications of Nanomaterials in Biomedical Engineering, in Nanotechnology for Advances in Medical Microbiology, N.R. Maddela, S. Chakraborty, and R. Prasad, Editors. 2021, Springer Nature Singapore: Singapore. p. 51-86.
17. Synthesis of Nanomaterials - Top - down Vs Bottom - Up Approaches. 2021; Available from:
https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fm.youtube.com%2Fwatch%3Fv%3DYhuUFLzJSsg&psig=AOvVaw0HVXo-xxUoa4Tg6NUbLr7_&ust=1716827909681000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBAQjRxqFwoTCMjLpr_gq4YDFQAAAAAdAAAAABAE.
18. Active-packaging. 2012; Available from:
<https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1887/active-packaging>.
19. จันทร์สมบูรณ์, ช., บรรจุภัณฑ์แอกทีฟ. 2020.
20. Mahamuni, P.P., et al., Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles by using polyol chemistry for their antimicrobial and antibiofilm activity. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 2019. 17: p. 71-80.
21. ความบกพร่องในโลหะออกไซด์. 2020; Available from: <https://www.thep-center.org/%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A1%E0%B8%9A%E0%B8%81%E0%B8%9E%E0%B8%A3%E0%B9%88%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%83%E0%B8%99%E0%B9%82%E0%B8%A5%E0%B8%AB%E0%B8%B0%E0%B8%AD%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B9%84%E0%B8%8B/>.
22. Nonato, R., et al., Solution parameters in the manufacture of ceramic ZnO nanofibers made by electrospinning. *Applied Physics A*, 2016. 122.
23. Mustapha, s., et al., Comparative study of crystallite size using Williamson-Hall and Debye-Scherrer plots for ZnO nanoparticles. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2019. 10: p. 045013.

24. Suresh, J., et al., Rambutan peels promoted biomimetic synthesis of bioinspired zinc oxide nanochains for biomedical applications. *Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy*, 2014. 137C: p. 250-258.
25. Phenolic compounds / สารประกอบฟีนอล. 2010; Available from: <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2585/phenolic-compound>.
26. ประวัติฟ้าทะลายโจร. 2009; Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%9F%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%97%E0%B8%B0%E0%B8%A5%E0%B8%B2%E0%B8%A2%E0%B9%82%E0%B8%88%E0%B8%A3>.
27. ชนโซติธรรมชาติ, สารประกอบฟ้าทะลายโจร. 2012.
28. ประวัติมังคุด. 2006; Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%A1%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%84%E0%B8%B8%E0%B8%94>.
29. ลักษณะมังคุด. 2024; Available from: <https://www.samunpri.com/fruit/%E0%B8%A1%E0%B8%B1%E0%B8%87%E0%B8%84%E0%B8%B8%E0%B8%94/>.
30. Megawati, et al., Mangosteen Peel Antioxidant Extraction and Its Use to Improve the Stability of Biodiesel B20 Oxidation, in *Valorisation of Agro-industrial Residues – Volume II: Non-Biological Approaches*, Z.A. Zakaria, et al., Editors. 2020, Springer International Publishing: Cham. p. 29-61.
31. Adaramola, F., et al., Antimicrobial and antioxidant activities of crude methanol extract and fractions of *Andrographis paniculata* leaf (Family: Acanthaceae) (Burm. f.) wall. Ex Nees. *Jordan Journal of Biological Sciences*, 2018. 11: p. 23-30.
32. Mussard, E., et al. Andrographolide, A Natural Antioxidant: An Update. *Antioxidants*, 2019. 8, DOI: 10.3390/antiox8120571.
33. Melia, S., et al., The characteristics of the pericarp of *garcinia mangostana* (mangosteen) extract as natural antioxidants in rendang. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019. 287: p. 012028.
34. Dappula, S.S., et al., Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using aqueous extract of *Andrographis alata*: Characterization, optimization and assessment of

- their antibacterial, antioxidant, antidiabetic and anti-Alzheimer's properties. *Journal of Molecular Structure*, 2023. 1273: p. 134264.
35. Jaithon, T., et al., Potential usage of biosynthesized zinc oxide nanoparticles from mangosteen peel ethanol extract to inhibit *Xanthomonas oryzae* and promote rice growth. *Heliyon*, 2024. 10(1): p. e24076.
 36. Shin, H., et al., Preparation and characterization of ductile PLA/PEG blend films for eco-friendly flexible packaging application. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022. 34: p. 100966.
 37. Yana, L., C. Yutong, and H. Qinghui, Antibacterial films based on polylactide and polybutylene adipate terephthalate loaded with zinc oxide or silver nanoparticles: Characterization and application in fresh noodles packaging. *Journal of Food Engineering*, 2023. 367: p. 111889.
 38. Do Dat, T., et al., Green synthesis of gold nanoparticles using *Andrographis paniculata* leave extract for lead ion detection, degradation of dyes, and bioactivities. *Biochemical Engineering Journal*, 2023. 200: p. 109103.
 39. Kurniawan, Y.S., M.R.G. Fahmi, and L. Yuliati, Isolation and Optical Properties of Natural Pigments from Purple Mangosteen Peels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. 833(1): p. 012018.
 40. Pillai, S. and R. Isaac, Comparative analysis of phytochemical constituents and antioxidant activities in leaf extracts of *Andrographis alata* (Vahl) Nees and *Andrographis echinodes* (L.) Nees. *Medicinal Plants - International Journal of Phytomedicines and Related Industries*, 2025. 17: p. 368-378.
 41. Raha, S. and M. Ahmaruzzaman, ZnO nanostructured materials and their potential applications: progress, challenges and perspectives. *Nanoscale Advances*, 2022. 4(8): p. 1868-1925.
 42. Jang, S., et al., K doping effect on structural and optical properties of ZnO nanorods grown on semipolar GaN films using a hydrothermal growth method. *Optical Materials Express*, 2015. 5: p. 1621-1627.
 43. Goyal, R., P. Roy, and P. Jeevanandam, Antibacterial activity studies of ZnO nanostructures with different morphologies against *E. coli* and *S. aureus*. *Applied Physics A*, 2023. 129.

44. Guo, J., et al., Effect of molecular weight of Poly(ethylene glycol) on plasticization of Poly(L-lactic acid). *Polymer*, 2021. 223: p. 123720.
45. Hadi, N., N. Saad, and D. Hai, RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF WASTE POLYPROPYLENE REINFORCED WITH ZINC OXIDE NANOPARTICLES. *The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering*, 2016. special volume: p. 700-712.
46. Rahman, M., et al., Polymer Nanocomposites with Optimized Nanoparticle Dispersion and Enhanced Functionalities for Industrial Applications. *Processes*, 2025. 13: p. 994.
47. Phuangthong, P., et al., The Effect of Polyethylene Glycol on the Non-Isothermal Crystallization of Poly(L-lactide) and Poly(D-lactide) Blends. *Polymers*, 2024. 16: p. 2129.
48. Gao, H., et al., Effects of Polyethylene Glycol (PEG) on the Structure and Properties of Flexible PEG/PLA Composite Films. *Journal of Applied Polymer Science*, 2025. 142.
49. Jing, Z., et al., Formation, structure and promoting crystallization capacity of stereocomplex crystallite network in the poly(lactide) blends based on linear PLLA and PDLA with different structures. *Polymer*, 2016. 92: p. 210-221.
50. Shanshool, H., et al., EFFECT OF ZINC OXIDE NANOPARTICLES CONCENTRATION ON OPTICAL PROPERTIES OF PMMA/ZNONANOCOMPOSITES THIN FILM. 2015.
51. Oivanen, M., et al., The effect of refractive index of fillers and polymer matrix on translucency and color matching of dental resin composite. *Biomater Investig Dent*, 2021. 8(1): p. 48-53.
52. Vannozzi, L., et al., Novel ultra-thin films based on a blend of PEG-b-PCL and PLLA and doped with ZnO nanoparticles. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020. XXXX.
53. Srisuwan, Y., et al., Preparation of Poly(L-lactide)-b-poly(ethylene glycol)-b-poly(L-lactide)/Zinc Oxide Nanocomposite Bioplastics for Potential Use as Flexible and Antibacterial Food Packaging. *Polymers*, 2024. 16: p. 1660.

54. Li, F.-J., et al., Effect of polyethylene glycol on the crystallization and impact properties of polylactide-based blends. *Polymers for Advanced Technologies*, 2015. 26.
55. Li, F.-J., et al., Tensile Properties of Polylactide/Poly(ethylene glycol) Blends. *Journal of Polymers and the Environment*, 2015. 23.
56. Shankar, S., L. Wang, and J.-W. Rhim, Incorporation of zinc oxide nanoparticles improved the mechanical, water vapor barrier, UV-light barrier, and antibacterial properties of PLA-based nanocomposite films. *Materials Science and Engineering: C*, 2018. 93.
57. Bumrungnok, K. and P. Threepopnatkul, Development of active PLA/PEG-blended film with grape seed extract for straw mushroom shelf life extension. *Macromolecular Research*, 2023. 31.
58. Kim, I., et al., Poly(Lactic Acid)/ZnO Bionanocomposite Films with Positively Charged ZnO as Potential Antimicrobial Food Packaging Materials. *Polymers*, 2019. 11: p. 1427.
59. Gao, H. and T. Qiang, Fracture Surface Morphology and Impact Strength of Cellulose/PLA Composites. *Materials*, 2017. 10: p. 624.
60. Bijarimi, M., et al., Poly(lactic acid) / Poly(ethylene glycol) blends: Mechanical, thermal and morphological properties. Vol. 1727. 2016. 020002.





ตารางที่ ก. 1 สารสกัดจากสมุนไพรที่ได้จาก *Andrographis paniculata leaves* โดยใช้ตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ ในปริมาณ 100 มิลลิลิตร

Solvent	ครั้งที่	ปริมาณสารสกัดที่ได้ (ml)
100%Ethanol	1	70.00
	2	73.00
	3	75.00
	4	79.00
	5	75.00
	Mean	74.40
	SD	3.29
75%Ethanol	1	82.00
	2	80.00
	3	79.00
	4	85.00
	5	84.00
	Mean	82.00
	SD	2.55
50%Ethanol	1	60.00
	2	65.00
	3	62.00
	4	62.00
	5	63.00
	Mean	62.40
	SD	1.82
25%Ethanol	1	65.00
	2	65.00
	3	66.00
	4	68.00
	5	65.00
	Mean	65.80
	SD	1.30
100%Water	1	69.00
	2	70.00
	3	69.00
	4	65.00
	5	67.00
	Mean	68.00
	SD	2.00

ตารางที่ ก. 2 สารสกัดจากสมุนไพรที่ได้จาก *Garcinia mangostana peels* โดยใช้ตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ ในปริมาณ 100 มิลลิลิตร

Solvent	ครั้งที่	ปริมาณสารสกัดที่ได้ (ml)
100%Ethanol	1	72.00
	2	69.00
	3	73.00
	4	73.00
	5	70.00
	Mean	71.40
	SD	1.82
75%Ethanol	1	85.00
	2	84.00
	3	82.00
	4	82.00
	5	84.00
	Mean	83.40
	SD	1.34
50%Ethanol	1	64.00
	2	62.00
	3	60.00
	4	62.00
	5	62.00
	Mean	62.00
	SD	1.41
25%Ethanol	1	66.00
	2	65.00
	3	66.00
	4	69.00
	5	67.00
	Mean	66.60
	SD	1.52
100%Water	1	70.00
	2	67.00
	3	70.00
	4	71.00
	5	70.00
	Mean	69.60
	SD	1.52

ตารางที่ ก. 3 ความเข้มข้นของสารสกัดสมุนไพรจาก *Andrographis paniculata leaves* ของตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ

Solvent (100 ml)	Dry weight of material (g)	Dry weight of material per solvent (g/ml)	Mean	SD
100%Ethanol	5	4.88E-05	1.06421	0.06
	10	9.77E-05	1.92393	0.087
	15	1.46E-04	2.43648	0.0766
75%Ethanol	5	4.88E-05	0.36232	0.054
	10	9.77E-05	0.68385	0.0125
	15	1.46E-04	1.1162	0.0125
50%Ethanol	5	4.88E-05	0.07889	0.011
	10	9.77E-05	0.11244	0.025
	15	1.46E-04	0.17398	0.025
25%Ethanol	5	4.88E-05	0.36232	0.015
	10	9.77E-05	0.68385	0.02
	15	1.46E-04	1.1162	0.02
100%Water	5	4.88E-05	0.15215	0.02
	10	9.77E-05	0.39543	0.01
	15	1.46E-04	0.53966	0.01

ตารางที่ ก. 4 ความเข้มข้นของสารสกัดสมุนไพรจาก *Garcinia mangostana peels* ของตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ

Solvent	Dry weight of material (g)	Dry weight of material per solvent (g/ml)	Mean	SD
100%Ethanol	5	4.88E-05	0.30968	0.014
	10	9.77E-05	0.74413	0.015
	15	1.46E-04	1.46988	0.015
75%Ethanol	5	4.88E-05	0.36534	0.01
	10	9.77E-05	0.83224	0.025
	15	1.46E-04	2.40352	0.0125
50%Ethanol	5	4.88E-05	0.34447	0.0125
	10	9.77E-05	0.62456	0.0145
	15	1.46E-04	0.79956	0.025
25%Ethanol	5	4.88E-05	0.20093	0.0125
	10	9.77E-05	0.33701	0.0225
	15	1.46E-04	0.43217	0.025
100%Water	5	4.88E-05	0.08626	0.015
	10	9.77E-05	0.16045	0.025
	15	1.46E-04	0.23146	0.0125

ตารางที่ ก. 1 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกจาก *Andrographis paniculata* leaves ของตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ

Sample	100% Ethanol	75% Ethanol	50% Ethanol	25% Ethanol	100%Water
1	20.00	12.50	6.34	2.04	2.99
2	19.78	12.80	6.40	2.13	2.93
3	20.32	12.34	6.24	2.06	3.09
4	19.94	12.59	6.23	2.07	2.88
5	19.52	11.98	6.09	2.02	2.88
Mean	19.92	12.44	6.26	2.06	2.95
SD	0.29	0.31	0.12	0.04	0.09

ตารางที่ ก. 2 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกจาก *Garcinia mangostana* peels ของตัวทำละลายผสมเอทานอลและน้ำ

Sample	100% Ethanol	75% Ethanol	50% Ethanol	25% Ethanol	100%Water
1	100.62	154.24	199.29	158.76	117.28
2	99.92	150.13	197.19	165.50	113.91
3	98.75	153.39	194.50	155.61	116.13
4	100.89	160.45	190.85	153.29	121.58
5	102.20	149.29	189.60	157.71	113.43
Mean	100.48	153.50	194.29	158.17	116.46
SD	1.27	4.42	4.10	4.60	3.27

ตารางที่ ก. 3 การทดสอบการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากสมุนไพร *Andrographis paniculate leaves*

Extracting solvent	1	2	3	4	5	Mean	SD
100%Ethanol	77.39	77.46	77.32	77.39	77.41	77.39	0.05
75% Ethanol	64.38	64.44	64.43	64.51	64.27	64.41	0.09
50% Ethanol	28.51	28.71	28.67	28.41	28.68	28.60	0.13
25% Ethanol	4.54	4.92	4.34	4.19	4.29	4.46	0.29
100%Water	5.19	5.03	5.20	5.35	4.75	5.10	0.23

ตารางที่ ก. 4 การทดสอบการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากสมุนไพร *Garcinia mangostana peels*

Extracting solvent	1	2	3	4	5	Mean	SD
100%Ethanol	75.62	75.69	75.68	75.57	75.60	75.63	0.05
75% Ethanol	80.03	80.07	79.97	80.07	79.96	80.02	0.05
50% Ethanol	85.53	85.56	85.60	85.55	85.50	85.55	0.04
25% Ethanol	83.02	83.06	82.96	83.00	82.95	83.00	0.04
100%Water	76.81	76.79	76.87	76.91	76.81	76.84	0.05

ตารางที่ ก. 9 % yield ZnO NPs จากสารสกัดสมุนไพรรจาก *Andrographis paniculata leaves*

Sample	Extract by 75%Ethanol (ml)	Zinc acetate dihydrate (g)	ZnO NPs (g)	%Yeild
1	100.00	2.00	1.00	50.00
2	100.00	2.00	1.04	52.00
3	100.00	2.00	1.01	50.50

ตารางที่ ก. 10 % yield ZnO NPs จากสารสกัดสมุนไพรรจาก *Garcinia mangostana peels*

Sample	Extract by 75%Ethanol (ml)	Zinc acetate dihydrate (g)	ZnO NPs (g)	%Yeild
1	100.00	2.00	1.50	75.00
2	100.00	2.00	1.55	77.50
3	100.00	2.00	1.53	76.50

ตารางที่ ก. 11 MFR ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีน ไกลคอล(PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs)

อัตราส่วน	ครั้งที่	น้ำหนัก (g)	เวลา (s)	MFR (g/10min)	MFR เฉลี่ย	SD
PLA/PEG/ZnO APL (79:20:1)	1	2.172	71	18.35	18.13	0.22
	2	2.059	69	17.90		
	3	2.084	68	18.39		
	4	2.100	70	18.00		
	5	2.072	69	18.02		
PLA/PEG/ZnO APL (78:19:3)	1	2.027	50	24.32	23.76	2.75
	2	2.153	66	19.57		
	3	2.090	46	27.26		
	4	2.080	52	24.00		
	5	2.050	52	23.65		
PLA/PEG/ZnO APL (76:19:5)	1	1.710	46	22.30	24.87	1.87
	2	1.921	49	23.52		
	3	2.010	45	26.80		
	4	1.980	46	25.83		
	5	1.898	44	25.88		
PLA/PEG/ZnO GMP (79:20:1)	1	2.105	64	19.73	18.21	0.99
	2	2.075	69	18.04		
	3	2.103	68	18.56		
	4	2.093	72	17.44		
	5	2.017	70	17.29		
PLA/PEG/ZnO GMP (78:19:3)	1	2.059	59	20.94	24.29	2.18
	2	2.109	49	25.82		
	3	2.078	53	23.52		
	4	2.161	49	26.46		
	5	2.098	51	24.68		
PLA/PEG/ZnO GMP (76:19:5)	1	2.019	44	27.53	27.95	0.30
	2	1.989	43	27.75		
	3	2.015	43	28.12		
	4	1.978	42	28.26		
	5	1.968	42	28.11		
PLA/PEG/ZnO APL (89.5:10:0.5)	1	2.210	121	10.96	10.30	0.43
	2	1.979	117	10.15		
	3	1.976	113	10.49		
	4	2.009	120	10.05		
	5	1.959	119	9.88		

อัตราส่วน	ครั้งที่	น้ำหนัก (g)	เวลา (s)	MFR (g/10min)	MFR เฉลี่ย	SD
PLA/PEG/ZnO APL (89:9.5:1.5)	1	2.140	105	12.23	11.26	0.77
	2	2.015	103	11.74		
	3	1.906	112	10.21		
	4	2.060	111	11.14		
	5	1.997	109	10.99		
PLA/PEG/ZnO APL (88:9.5:2.5)	1	1.940	99	11.76	12.31	1.05
	2	2.167	102	12.75		
	3	2.106	107	11.81		
	4	2.207	95	13.94		
	5	1.943	103	11.32		
PLA/PEG/ZnO GMP (89.5:10:0.5)	1	1.981	119	9.99	11.00	0.76
	2	2.179	116	11.27		
	3	1.960	110	10.69		
	4	2.109	105	12.05		
	5	1.998	109	11.00		
PLA/PEG/ZnO GMP (89:9.5:1.5)	1	2.098	102	12.34	12.07	0.38
	2	2.009	101	11.93		
	3	1.986	102	11.68		
	4	2.160	103	12.58		
	5	2.143	109	11.80		
PLA/PEG/ZnO GMP (88:9.5:2.5)	1	2.154	90	14.36	13.18	0.81
	2	2.199	100	13.19		
	3	2.201	99	13.34		
	4	2.109	98	12.91		
	5	1.998	99	12.11		



ตารางที่ ก. 12 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์พอลิแล็กติกแอซิด (PLA)

No.	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	2468.67	48.3698	2.64040
2	1561.12	34.8809	2.96422
3	1531.17	36.3240	3.15997
4	1413.49	38.2214	3.46967
5	2248.18	54.0867	4.19486
6	2653.99	60.2312	3.06898
7	2267.93	48.5030	3.00694
8	2089.74	44.0586	2.81857
9	1795.82	36.2681	2.37386
10	2187.90	51.7385	3.90151
Mean	2021.80	45.2682	3.15990
S.D.	423.929	8.71539	0.55690

ตารางที่ ก. 12 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน (96:4)

No.	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	2071.57	50.2008	3.20750
2	1737.59	41.0311	2.90357
3	2898.24	76.9904	3.73058
4	3321.15	88.7542	3.94065
5	2096.54	49.8761	3.08773
6	4066.10	98.9531	3.78187
7	2631.66	60.1618	2.87115
8	2259.72	49.8321	2.77687
9	2464.54	55.1966	2.87247
10	3029.20	65.1735	2.63725
Mean	2657.63	63.6170	3.18096
S.D.	692.905	18.8962	0.46865

ตารางที่ ก. 13 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสม
พอลิแล็กติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน (92:8)

No.	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	2223.66	44.6615	2.53325
2	2280.57	48.4387	2.78339
3	2127.99	40.9874	2.26488
4	2161.50	42.6594	2.45579
5	2221.43	43.5722	2.37760
6	2333.95	45.3209	2.40940
7	2119.19	43.3255	2.46396
8	2376.41	51.4597	3.78125
9	2120.77	43.5453	2.84244
10	2150.41	37.9943	2.04577
Mean	2211.59	44.1965	2.59577
S.D.	92.5955	3.72576	0.47570

ตารางที่ ก. 14 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสม
พอลิแล็กติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน (90:10)

No.	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	3362.29	82.3574	3.40336
2	3844.46	100.644	3.68817
3	3190.61	80.8177	3.41740
4	2933.97	77.8765	4.37510
5	3351.59	89.6645	3.86905
6	3342.69	86.8677	3.66661
7	2855.15	80.0735	3.75662
8	4492.57	117.098	3.74367
9	3987.13	104.765	4.23674
10	3103.95	81.4499	3.73930
Mean	3446.44	90.1614	3.78960
S.D.	512.835	13.0665	0.31054

ตารางที่ ก. 15 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสม
พอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน (88:12)

No.	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	1475.49	34.1357	11.0258
2	2040.84	53.6773	11.9443
3	1815.58	45.4958	7.20953
4	1742.93	40.9689	3.83044
5	1468.20	40.2661	6.78123
6	1938.80	42.8023	2.86487
7	1529.38	45.5567	11.4387
8	2138.58	51.2820	14.2014
9	1113.64	30.1950	11.5300
10	1128.71	36.9258	7.48101
Mean	1639.22	42.1306	8.83073
S.D.	357.031	7.29445	3.75188

ตารางที่ ก. 16 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสม
พอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน (84:16)

No.	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	1554.04	76.4408	240.016
2	1670.08	64.9874	147.574
3	1735.26	42.6046	299.841
4	2396.95	55.5326	288.312
5	1876.37	45.5186	259.500
6	2326.16	54.3745	122.582
7	1601.84	52.9958	166.218
8	2618.72	55.5610	312.600
9	1221.39	51.3185	270.361
10	2030.93	43.9053	282.523
Mean	1903.17	54.3239	238.953
S.D.	436.123	10.2202	68.3605

ตารางที่ ก. 17 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสม
พอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน (80:20)

No.	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	1146.71	50.9000	81.4306
2	907.571	44.3060	58.2429
3	821.743	43.5185	56.8374
4	1124.48	46.8093	64.0609
5	1197.58	42.6525	29.8507
6	752.095	46.8137	41.0003
7	829.003	34.8735	50.3334
8	1748.83	47.1104	31.7283
9	1214.43	37.8604	35.8254
10	1020.59	48.6402	58.3029
Mean	1076.30	44.3485	50.7613
S.D.	289.828	4.90510	16.2799

ตารางที่ ก. 18 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสม
พอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จาก
ใบฟ้าทะลายโจรที่อัตราส่วน (89.5:10:0.5)

No.	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	6366.32	141.133	2.94538
2	6303.99	146.315	3.12379
3	6252.55	163.040	6.75790
4	5975.28	136.400	3.07137
5	6891.56	165.482	3.32779
6	5727.16	132.426	2.88417
7	5872.57	129.818	2.88339
8	7370.62	175.634	3.68851
9	5455.79	122.469	2.83123
10	7675.84	205.251	3.90249
Mean	6389.17	151.797	3.54160
S.D.	718.427	25.4700	1.18619

ตารางที่ ก. 19 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จากไบฟ้าทะเลทรายโจร์ที่อัตราส่วน (89:9.5:1.5)

No.	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	6389.35	132.137	2.52359
2	6294.37	154.970	2.99585
3	6389.62	149.477	2.91450
4	7023.16	181.093	3.39332
5	6388.53	155.426	2.97179
6	6972.08	161.103	2.95769
7	6552.38	148.987	2.83929
8	6576.43	150.183	2.94231
9	6977.39	168.888	3.04552
10	6844.21	168.202	3.31888
Mean	6640.75	157.047	2.99027
S.D.	285.297	13.5652	0.24119

ตารางที่ ก. 20 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จากไบฟ้าทะเลทรายโจร์ที่อัตราส่วน (88:9.5:2.5)

No.	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	6081.64	82.2961	1.64965
2	6195.88	146.154	2.96514
3	6460.23	161.170	3.17479
4	5885.48	136.498	2.86102
5	6264.78	149.279	3.07510
6	6413.16	145.868	2.87148
7	6175.27	136.823	2.76848
8	5982.69	138.120	2.86084
9	5833.80	133.179	3.06898
10	5973.20	134.826	2.94891
Mean	6126.61	136.421	2.82444
S.D.	213.391	20.8365	0.43061

ตารางที่ ก. 20 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสม พอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จาก เปลือกมังคุดที่อัตราส่วน (89.5:10:0.5)

No.	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	6097.83	141.186	3.12701
2	6229.06	150.836	3.36846
3	5302.48	121.402	3.54422
4	5310.15	118.239	2.98926
5	5436.52	118.381	2.92718
6	6139.46	120.346	2.38049
7	6067.87	144.948	3.84000
8	5921.94	140.795	3.42745
9	6289.76	149.991	3.23622
10	6463.32	155.850	3.46970
Mean	5925.84	136.197	3.23100
S.D.	423.708	14.9943	0.40393

ตารางที่ ก. 21 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสม พอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จาก เปลือกมังคุดที่อัตราส่วน (89:9.5:1.5)

No.	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	6418.60	150.838	3.19316
2	6270.94	156.260	3.74518
3	5973.55	140.402	4.15030
4	5782.58	141.655	3.46275
5	5961.13	140.231	3.07591
6	6471.68	142.144	4.19527
7	6406.23	130.537	2.67464
8	5638.02	126.568	2.91986
9	6126.45	142.829	3.05879
10	5950.35	137.534	3.02726
Mean	6099.95	140.900	3.35031
S.D.	285.813	8.59816	0.52214

ตารางที่ ก. 22 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสม พอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จาก เปลือกมังคุดที่อัตราส่วน (88:9.5:2.5)

No.	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	5003.99	103.964	3.67671
2	4652.35	87.2370	2.65422
3	4808.10	101.055	3.63639
4	4946.22	96.9622	2.41849
5	5053.91	101.949	2.57513
6	5144.94	104.760	2.67640
7	4960.52	99.1516	2.50652
8	5310.62	106.910	2.69361
9	4257.47	85.7083	2.76961
10	4497.88	89.1569	2.76688
Mean	4863.60	97.6854	2.83740
S.D.	316.224	7.68928	0.44551

ตารางที่ ก. 23 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว TD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์พอลิแลกติกแอซิด (PLA)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	6.09	69.74	0.09
2	6.91	69.74	0.10
3	6.40	72.07	0.09
4	8.97	75.90	0.12
5	7.22	79.44	0.09
6	6.05	77.32	0.08
7	8.45	77.24	0.11
8	8.13	80.52	0.10
9	8.19	75.44	0.11
10	7.60	70.32	0.11
Mean	7.40	74.77	0.10
S.D.	1.03	4.04	0.01

ตารางที่ ก. 24 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว TD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน (96:4)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	7.61	82.10	0.09
2	8.86	74.52	0.12
3	9.03	80.10	0.11
4	5.71	72.11	0.08
5	6.81	71.08	0.10
6	6.26	77.33	0.08
7	6.69	73.27	0.09
8	6.41	77.89	0.08
9	5.87	79.86	0.07
10	8.27	81.59	0.10
Mean	7.15	76.99	0.09
S.D.	1.22	4.01	0.01

ตารางที่ ก. 25 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว TD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน (92:8)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	13.17	80.71	0.16
2	13.44	87.19	0.15
3	13.17	84.56	0.16
4	11.81	76.12	0.16
5	13.03	79.10	0.16
6	10.78	77.29	0.14
7	11.48	77.25	0.15
8	10.83	73.61	0.15
9	10.89	79.66	0.14
10	12.55	83.41	0.15
Mean	12.12	79.89	0.15
S.D.	1.08	4.17	0.01

ตารางที่ ก. 26 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว TD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน (90:10)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	12.50	79.62	0.16
2	9.93	73.16	0.14
3	12.39	74.12	0.17
4	9.69	76.19	0.13
5	12.04	76.57	0.16
6	10.26	67.62	0.15
7	10.48	77.07	0.14
8	10.47	76.73	0.14
9	12.25	75.21	0.16
10	10.05	70.26	0.14
Mean	11.01	74.66	0.15
S.D.	1.14	3.53	0.01

ตารางที่ ก. 27 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว TD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน (88:12)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	4.46	75.71	0.06
2	2.04	43.39	0.05
3	5.19	83.67	0.06
4	5.03	76.00	0.07
5	5.50	82.44	0.07
6	6.54	77.27	0.08
7	4.96	72.13	0.07
8	5.44	78.60	0.07
9	6.98	84.47	0.08
10	7.94	76.47	0.10
Mean	5.41	75.02	0.07
S.D.	1.59	11.78	0.02

ตารางที่ ก. 28 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว TD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน (84:16)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	6.76	78.77	0.09
2	4.32	51.48	0.08
3	7.77	80.60	0.10
4	5.25	76.10	0.07
5	6.40	80.59	0.08
6	7.22	77.27	0.09
7	7.87	77.24	0.10
8	5.21	82.21	0.06
9	5.25	84.46	0.06
10	2.58	41.21	0.06
Mean	5.86	72.99	0.08
S.D.	1.66	14.47	0.01

ตารางที่ ก. 29 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว TD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน (80:20)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	1.56	16.34	0.10
2	1.86	21.06	0.09
3	1.76	19.49	0.09
4	1.82	17.05	0.11
5	1.36	16.05	0.08
6	1.41	22.34	0.06
7	1.90	22.19	0.09
8	1.77	22.43	0.08
9	1.09	17.36	0.06
10	1.62	17.68	0.09
Mean	1.62	19.20	0.08
S.D.	0.26	2.61	0.01

ตารางที่ ก. 30 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว TD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จากไบโฟ้าทะเลลายโจรที่อัตราส่วน (89.5:10:0.5)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	10.78	71.82	0.15
2	7.95	67.21	0.12
3	7.87	67.94	0.12
4	6.88	63.89	0.11
5	6.70	65.87	0.10
6	5.76	56.86	0.10
7	9.25	75.29	0.12
8	9.08	81.89	0.11
9	6.63	64.71	0.10
10	7.05	57.39	0.12
Mean	7.80	67.29	0.12
S.D.	1.52	7.64	0.01

ตารางที่ ก. 31 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว TD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จากไบโฟ้าทะเลลายโจรที่อัตราส่วน (89:9.5:1.5)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	6.78	74.00	0.09
2	6.02	64.01	0.09
3	4.79	58.55	0.08
4	4.60	42.05	0.11
5	5.47	73.73	0.07
6	6.17	62.31	0.10
7	6.84	76.53	0.09
8	6.25	74.95	0.08
9	6.94	84.46	0.08
10	6.58	83.28	0.08
Mean	6.04	69.39	0.09
S.D.	0.84	12.85	0.01

ตารางที่ ก. 32 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว TD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จากไบฟ้าทะเลทรายโจรที่อัตราส่วน (88:9.5:2.5)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	4.33	48.38	0.09
2	4.44	45.78	0.10
3	2.78	29.61	0.09
4	5.46	76.11	0.07
5	3.56	48.76	0.07
6	3.70	33.98	0.11
7	3.11	29.93	0.10
8	4.30	50.45	0.09
9	3.37	54.95	0.06
10	5.05	58.93	0.09
Mean	4.01	47.69	0.09
S.D.	0.86	14.26	0.01

ตารางที่ ก. 32 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว TD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จากเปลือกมังคุดที่อัตราส่วน (89.5:10:0.5)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	2.66	48.13	0.06
2	2.49	26.07	0.10
3	2.04	41.09	0.05
4	4.35	71.57	0.06
5	3.69	83.58	0.04
6	3.69	52.47	0.07
7	3.62	67.14	0.05
8	4.39	64.12	0.07
9	3.96	84.48	0.05
10	3.30	62.65	0.05
Mean	3.42	60.13	0.06
S.D.	0.79	18.47	0.02

ตารางที่ ก. 33 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว TD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จากเปลือกมังคุดที่อัตราส่วน (89:9.5:1.5)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	2.46	56.49	0.04
2	3.21	54.73	0.06
3	2.01	50.54	0.04
4	2.91	76.19	0.04
5	1.62	57.99	0.03
6	1.61	53.99	0.03
7	1.89	53.88	0.04
8	1.79	57.77	0.03
9	2.21	51.11	0.04
10	1.33	31.46	0.04
Mean	2.10	54.42	0.04
S.D.	0.60	10.83	0.01

ตารางที่ ก. 34 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว TD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จากเปลือกมังคุดที่อัตราส่วน (88:9.5:2.5)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	4.39	48.70	0.09
2	4.19	48.81	0.09
3	3.67	33.83	0.11
4	3.92	44.69	0.09
5	4.84	44.77	0.11
6	3.77	44.79	0.08
7	3.37	44.45	0.08
8	3.75	44.89	0.08
9	2.71	46.48	0.06
10	3.42	43.52	0.08
Mean	3.80	44.49	0.09
S.D.	0.59	4.15	0.01

ตารางที่ ก. 35 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว MD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบ
พอลิเมอร์พอลิแลกติกแอซิด (PLA)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	0.862	92.280	0.009
2	1.345	84.619	0.016
3	1.574	86.395	0.018
4	1.171	73.597	0.016
5	0.925	82.550	0.011
6	1.643	75.261	0.022
7	0.632	74.410	0.008
8	1.686	80.760	0.021
9	0.713	81.570	0.009
10	1.185	79.750	0.015
Mean	1.174	81.119	0.015
S.D.	0.386	5.820	0.005

ตารางที่ ก. 36 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว MD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน (96:4)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	2.360	49.470	0.048
2	1.970	72.430	0.027
3	2.177	51.360	0.042
4	1.260	71.130	0.018
5	2.680	45.220	0.059
6	1.511	74.120	0.020
7	2.500	41.630	0.060
8	2.660	44.270	0.060
9	1.380	75.670	0.018
10	2.630	45.610	0.058
Mean	2.113	57.091	0.041
S.D.	0.553	14.278	0.018

ตารางที่ ก. 37 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว MD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบ
พอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน (92:8)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	1.970	53.450	0.037
2	2.140	51.870	0.041
3	1.770	56.250	0.031
4	2.580	69.620	0.037
5	1.820	65.420	0.028
6	1.480	52.670	0.028
7	2.150	68.600	0.031
8	1.890	53.010	0.036
9	1.780	66.310	0.027
10	2.210	65.060	0.034
Mean	1.979	60.226	0.033
S.D.	0.305	7.352	0.005

ตารางที่ ก. 38 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว MD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบ
พอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน (90:10)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	5.620	41.630	0.135
2	5.840	45.340	0.129
3	7.140	52.430	0.136
4	5.760	46.890	0.123
5	5.500	42.520	0.129
6	6.710	51.470	0.130
7	7.300	43.160	0.169
8	4.200	39.540	0.106
9	6.520	52.180	0.125
10	6.220	45.020	0.138
Mean	6.081	46.018	0.132
S.D.	0.911	4.627	0.016

ตารางที่ ก. 39 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว MD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบ
พอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน (88:12)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	2.550	61.840	0.041
2	0.910	79.740	0.011
3	1.280	65.050	0.020
4	1.350	63.320	0.021
5	0.500	80.820	0.006
6	3.120	71.250	0.044
7	1.670	76.960	0.022
8	1.220	82.670	0.015
9	2.010	68.570	0.029
10	2.040	59.600	0.034
Mean	1.665	70.982	0.024
S.D.	0.784	8.555	0.013

ตารางที่ ก. 40 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว MD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบ
พอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน (84:16)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	2.590	76.450	0.034
2	2.140	53.490	0.040
3	3.080	57.130	0.054
4	1.780	64.490	0.028
5	2.690	74.630	0.036
6	2.160	74.400	0.029
7	2.060	58.790	0.035
8	1.710	33.150	0.052
9	2.830	72.900	0.039
10	2.410	68.119	0.035
Mean	2.345	63.355	0.038
S.D.	0.452	13.354	0.009

ตารางที่ ก. 41 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว MD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบ
พอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน (80:20)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	3.630	64.380	0.056
2	2.710	75.680	0.036
3	2.970	43.060	0.069
4	1.650	58.260	0.028
5	2.760	72.090	0.038
6	2.860	45.670	0.063
7	2.790	40.670	0.069
8	2.560	31.730	0.081
9	2.440	43.760	0.056
10	2.860	47.380	0.060
Mean	2.723	52.268	0.056
S.D.	0.493	14.547	0.017

ตารางที่ ก. 42 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว MD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบ
พอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์
(ZnO NPs) จากใบฟ้าทะลายโจรที่อัตราส่วน (89.5:10:0.5)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	4.790	42.450	0.113
2	4.580	44.010	0.104
3	6.050	49.750	0.122
4	6.120	46.160	0.133
5	4.660	41.410	0.113
6	6.380	42.470	0.150
7	5.510	49.360	0.112
8	4.750	43.990	0.108
9	4.990	39.350	0.127
10	4.960	44.920	0.110
Mean	5.279	44.387	0.119
S.D.	0.679	3.315	0.014

ตารางที่ ก. 43 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว MD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบ
พอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์
(ZnO NPs) จากใบฟ้าทะลายโจรที่อัตราส่วน (89:9.5:1.5)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	2.400	50.640	0.047
2	2.220	64.710	0.034
3	3.070	53.700	0.057
4	1.280	69.130	0.019
5	3.660	63.600	0.058
6	2.660	50.360	0.053
7	1.070	60.880	0.018
8	2.690	56.650	0.047
9	2.170	66.610	0.033
10	3.880	42.840	0.091
Mean	2.510	57.912	0.046
S.D.	0.905	8.468	0.022

ตารางที่ ก. 44 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว MD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบ
พอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์
(ZnO NPs) จากใบฟ้าทะลายโจรที่อัตราส่วน (88:9.5:2.5)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	1.470	78.720	0.019
2	1.990	72.840	0.027
3	1.460	76.040	0.019
4	1.108	65.880	0.017
5	1.938	79.450	0.024
6	1.140	72.500	0.016
7	1.100	69.800	0.016
8	2.889	57.000	0.051
9	1.606	57.660	0.028
10	1.207	70.560	0.017
Mean	1.591	70.045	0.023
S.D.	0.560	7.851	0.011

ตารางที่ ก. 44 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว MD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จากเปลือกมังคุดที่อัตราส่วน (89.5:10:0.5)

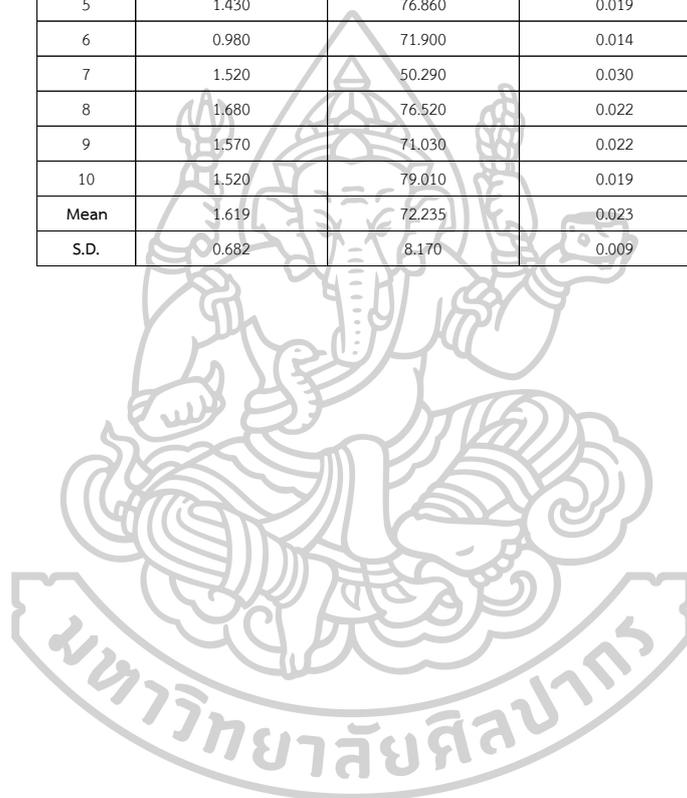
No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	3.750	67.720	0.055
2	1.160	64.390	0.018
3	1.255	63.680	0.020
4	2.640	76.110	0.035
5	1.170	72.650	0.016
6	1.110	68.514	0.016
7	1.490	72.380	0.021
8	1.370	60.660	0.023
9	2.490	54.960	0.045
10	1.110	73.260	0.015
Mean	1.755	67.432	0.026
S.D.	0.901	6.557	0.014

ตารางที่ ก. 45 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว MD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จากเปลือกมังคุดที่อัตราส่วน (89:9.5:1.5)

No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	2.200	62.720	0.035
2	1.700	63.390	0.027
3	1.550	63.680	0.024
4	1.630	71.120	0.023
5	1.320	74.550	0.018
6	1.410	69.540	0.020
7	1.500	70.310	0.021
8	1.470	60.660	0.024
9	2.090	53.600	0.039
10	1.520	73.400	0.021
Mean	1.639	66.297	0.025
S.D.	0.288	6.579	0.007

ตารางที่ ก. 46 ผลการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดแนว MD ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) จากเปลือกมังคุดที่อัตราส่วน (88:9.5:2.5)

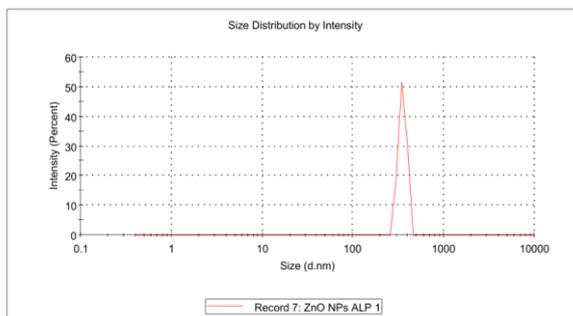
No.	Force (N)	Disp. (mm)	Tear Strength (N/mm)
1	1.740	75.480	0.023
2	3.400	75.490	0.045
3	0.911	75.120	0.012
4	1.440	70.650	0.020
5	1.430	76.860	0.019
6	0.980	71.900	0.014
7	1.520	50.290	0.030
8	1.680	76.520	0.022
9	1.570	71.030	0.022
10	1.520	79.010	0.019
Mean	1.619	72.235	0.023
S.D.	0.682	8.170	0.009



Results

	Size (d.nm):	% Intensity:	St Dev (d.n...)
Z-Average (d.nm): 1016	Peak 1: 349.8	100.0	34.90
Pdl: 0.747	Peak 2: 0.000	0.0	0.000
Intercept: 0.948	Peak 3: 0.000	0.0	0.000

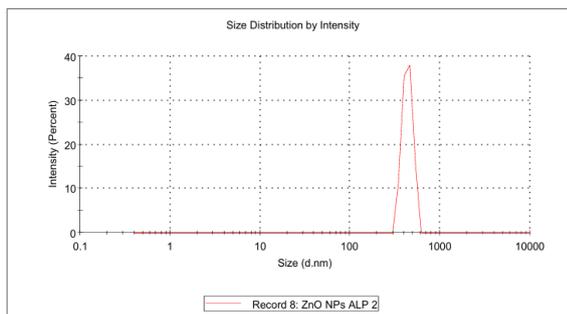
Result quality : Refer to quality report



Results

	Size (d.nm):	% Intensity:	St Dev (d.n...)
Z-Average (d.nm): 907.5	Peak 1: 434.6	100.0	56.03
Pdl: 0.616	Peak 2: 0.000	0.0	0.000
Intercept: 0.923	Peak 3: 0.000	0.0	0.000

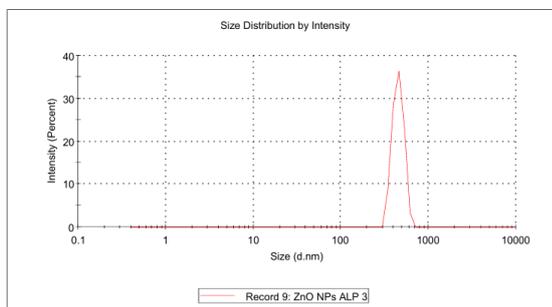
Result quality : Refer to quality report



Results

	Size (d.nm):	% Intensity:	St Dev (d.n...)
Z-Average (d.nm): 843.7	Peak 1: 452.3	100.0	65.55
Pdl: 0.577	Peak 2: 0.000	0.0	0.000
Intercept: 0.911	Peak 3: 0.000	0.0	0.000

Result quality : Refer to quality report

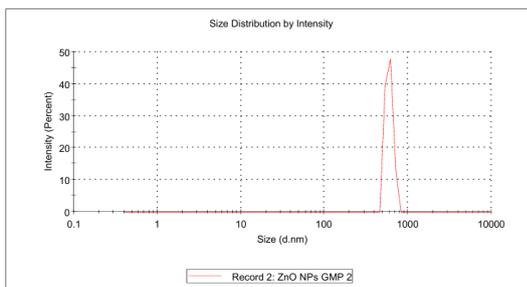


รูปที่ ก. 1 ผล DLS ขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสมุนไพร
Andrographis paniculate leaves

Results

	Size (d.nm):	% Intensity:	St Dev (d.nm):
Z-Average (d.nm): 1999	Peak 1: 594.3	100.0	59.71
Pdi: 0.932	Peak 2: 0.000	0.0	0.000
Intercept: 0.832	Peak 3: 0.000	0.0	0.000

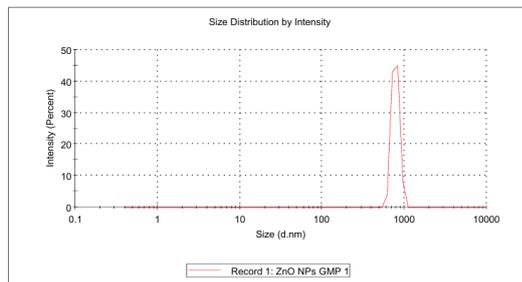
Result quality : Refer to quality report



Results

	Size (d.nm):	% Intensity:	St Dev (d.nm):
Z-Average (d.nm): 1916	Peak 1: 778.9	100.0	80.35
Pdi: 0.649	Peak 2: 0.000	0.0	0.000
Intercept: 0.890	Peak 3: 0.000	0.0	0.000

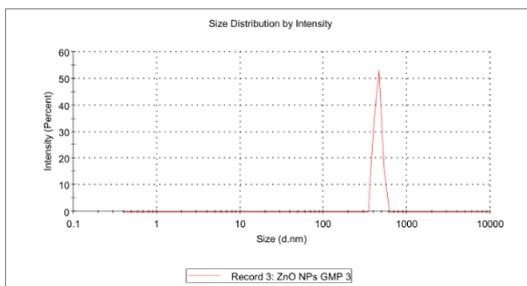
Result quality : Refer to quality report



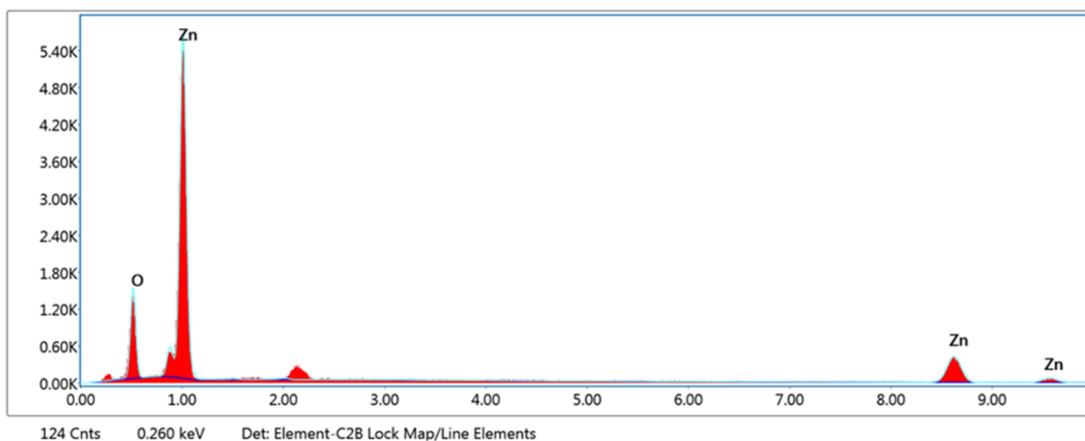
Results

	Size (d.nm):	% Intensity:	St Dev (d.nm):
Z-Average (d.nm): 1563	Peak 1: 449.9	100.0	44.45
Pdi: 0.880	Peak 2: 0.000	0.0	0.000
Intercept: 0.940	Peak 3: 0.000	0.0	0.000

Result quality : Refer to quality report



รูปที่ ก. 2 ผล DLS ขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสมุนไพร *Garcinia mangostana peels*

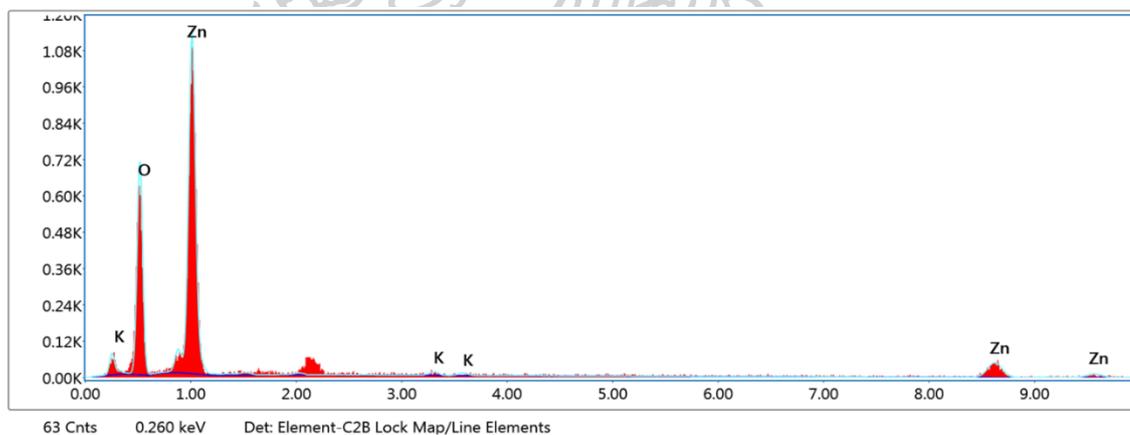


Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
O K	15.74	43.29	484.95	8.65	0.0787	1.2717	0.3931	1.0000
ZnK	84.26	56.71	357.60	4.93	0.7913	0.9359	1.0017	1.0019

รูปที่ ก. 3 ผล EDX ขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสมุนไพร

Andrographis paniculate leaves

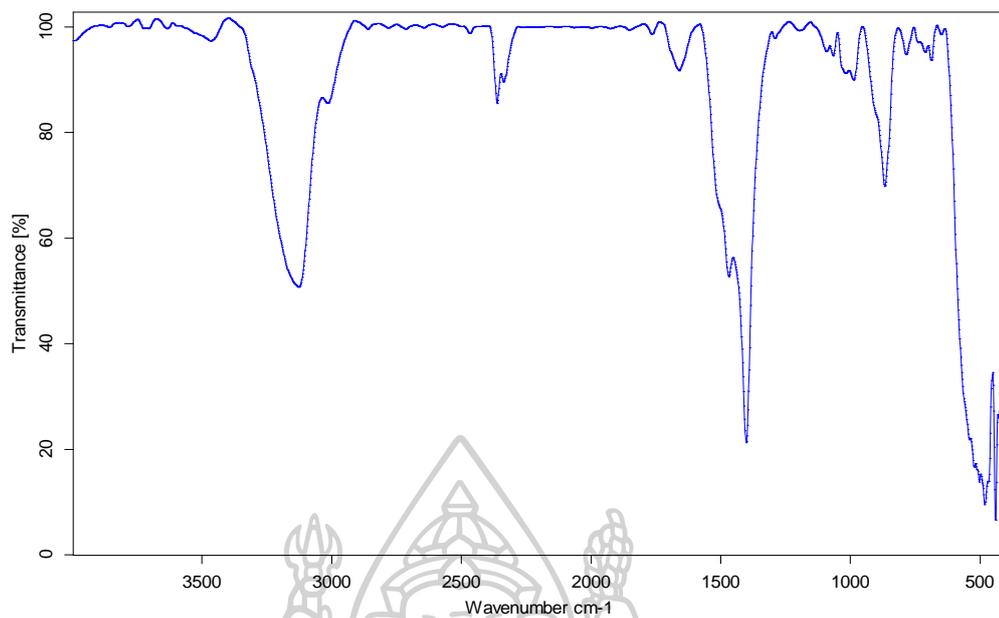


Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
O K	38.84	71.89	236.52	8.22	0.2137	1.1807	0.4660	1.0000
K K	1.32	1.00	6.91	34.16	0.0123	0.9936	0.9212	1.0164
ZnK	59.84	27.11	41.83	8.29	0.5159	0.8529	1.0037	1.0070

รูปที่ ก. 4 ผล EDX ขนาดของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากสมุนไพร

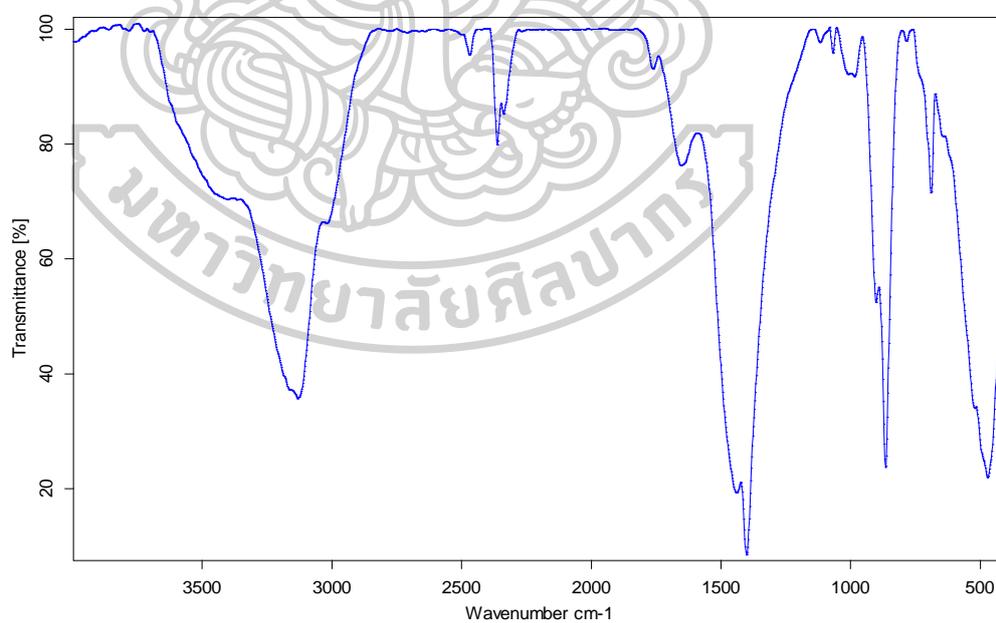
Garcinia mangostana peels



E:\sittikom\ZnO NPs\ZnO NPs APL.0	ZnO NPs APL	Powder	26/09/2025
-----------------------------------	-------------	--------	------------

Page 1/1

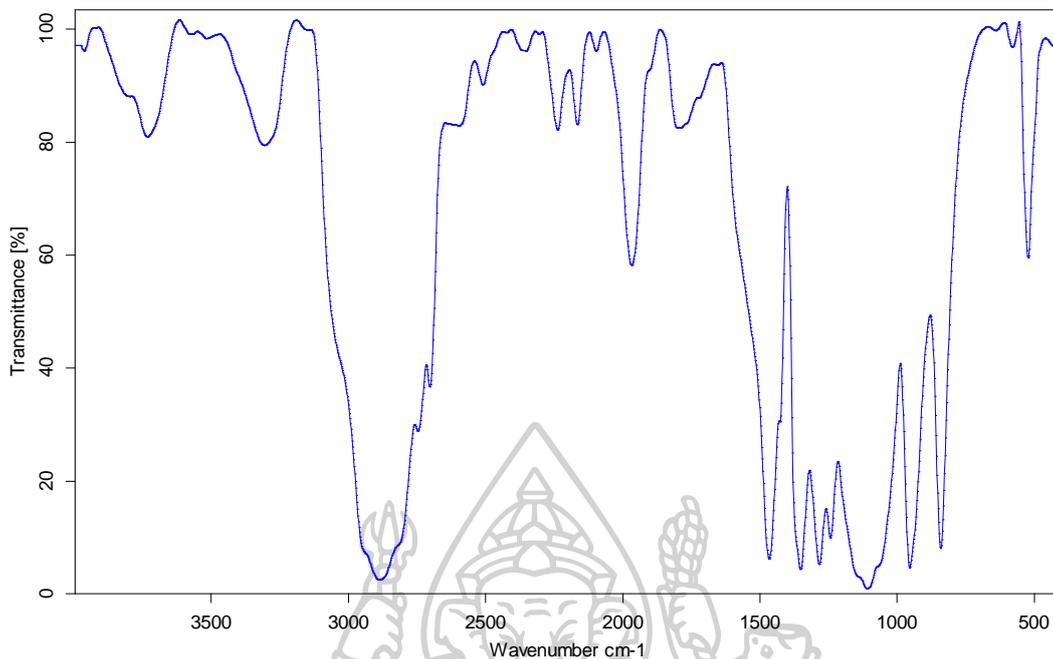
รูปที่ ก. 5 FTIR-spectra ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ที่ได้จากสมุนไพร *Andrographis paniculate leaves*



E:\sittikom\ZnO NPs\ZnO NPs GMP.0	ZnO NPs GMP	Powder	26/09/2025
-----------------------------------	-------------	--------	------------

Page 1/1

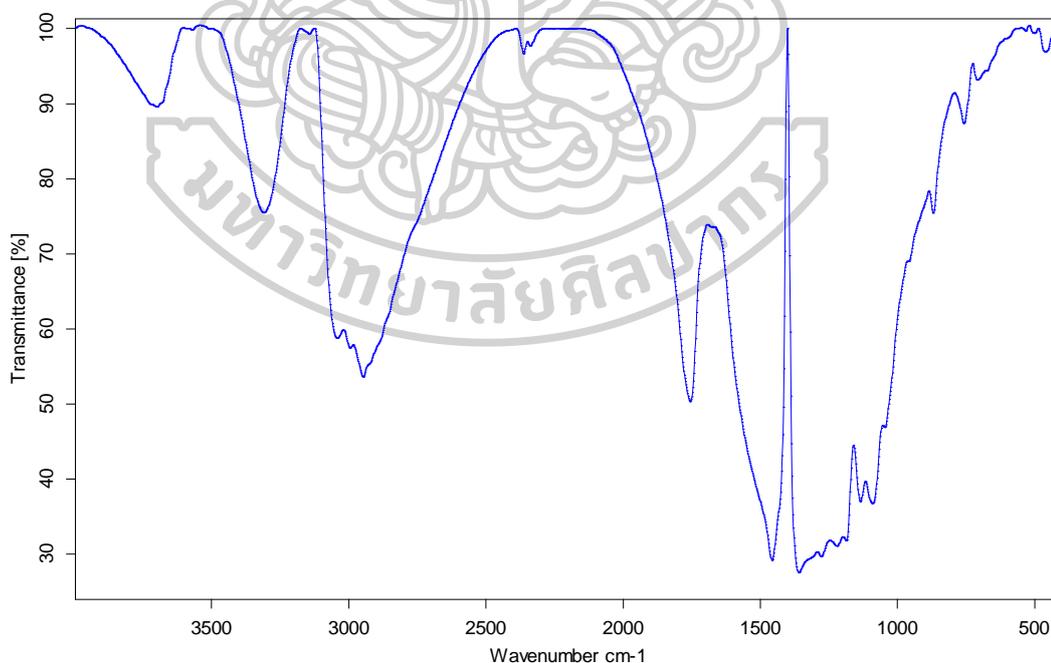
รูปที่ ก. 6 FTIR-spectra ของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NPs) ที่ได้จากสมุนไพร *Garcinia mangostana peels*



E:\sittikom\Film 3\PEG.0 PEG Powder 03/10/2025

Page 1/1

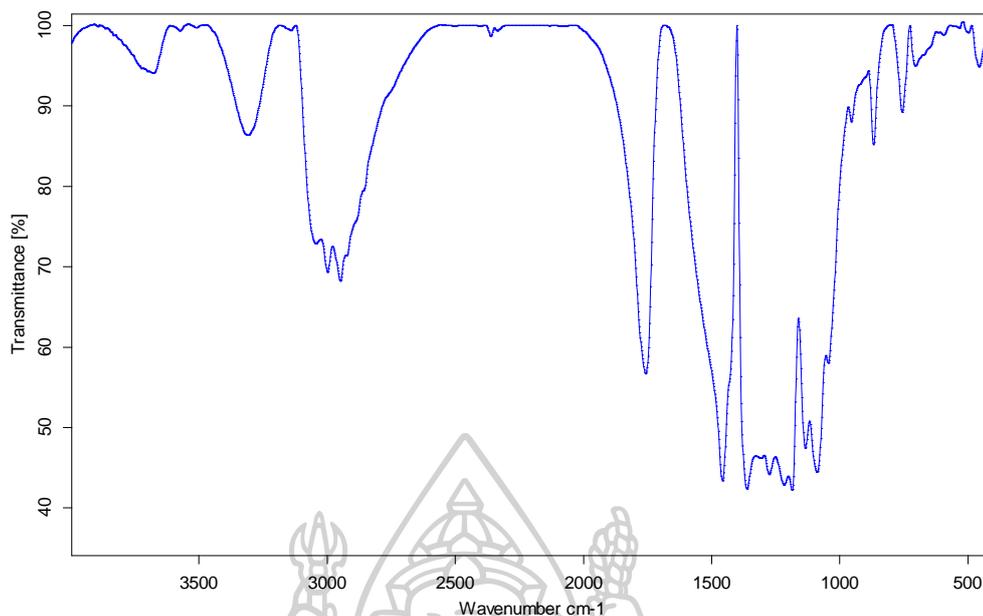
รูปที่ ก. 7 FTIR-spectra ของพอลิเอธิลีนไกลคอล (PEG)



E:\sittikom\Film 3\PLA 2.3 PLA 2 Powder 03/10/2025

Page 1/1

รูปที่ ก. 8 FTIR-spectra ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA)



E:\sittikom\Film 3\PLA 96.0

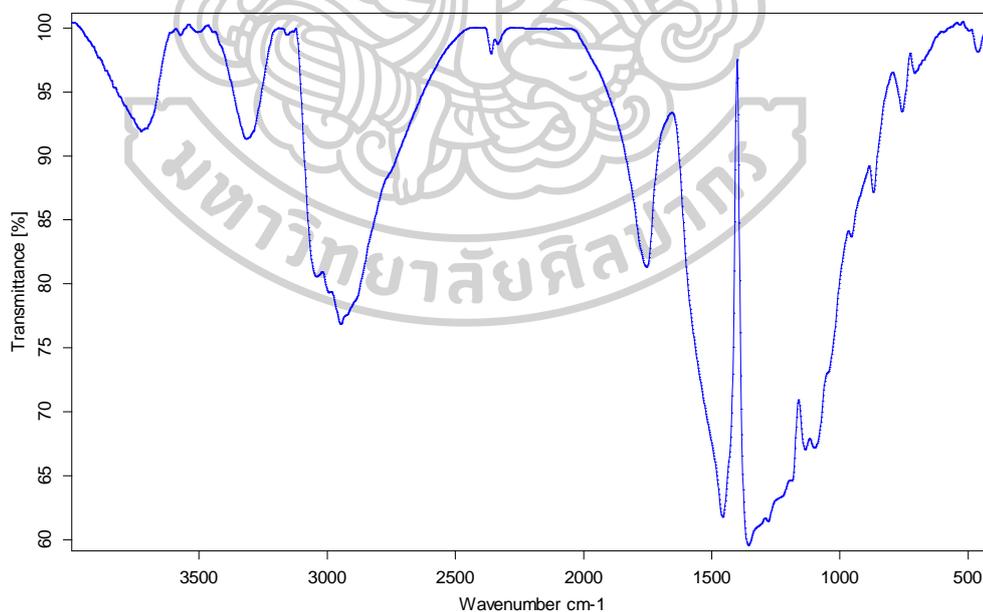
PLA 96

Powder

03/10/2025

Page 1/1

รูปที่ ก. 9 FTIR-spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 96:4



E:\sittikom\Film 3\PLA 92.0

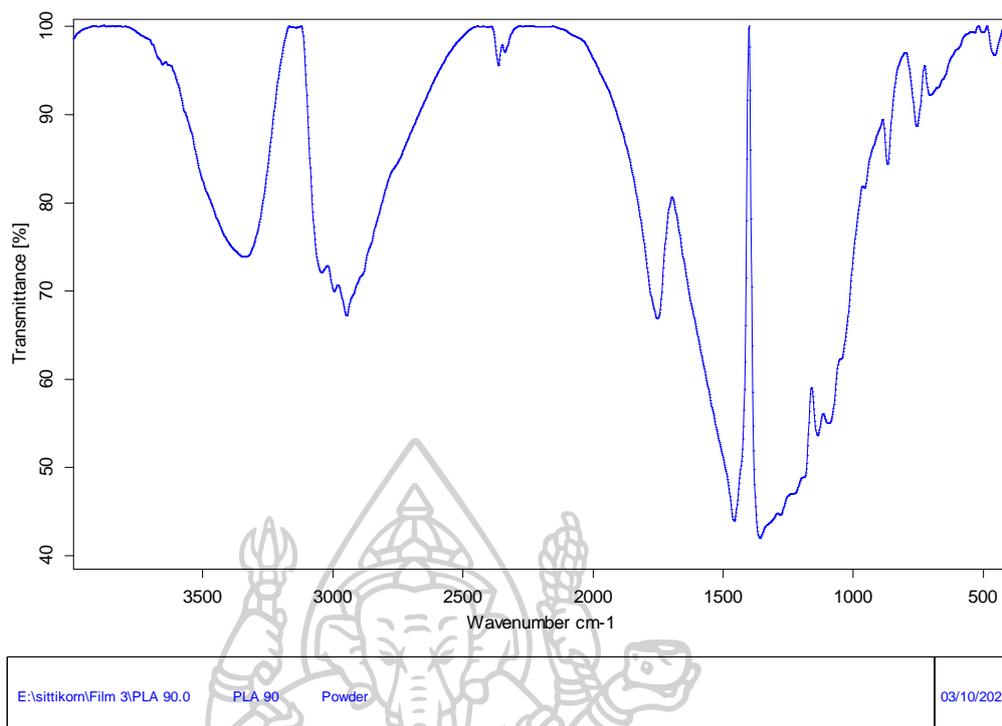
PLA 92

Powder

03/10/2025

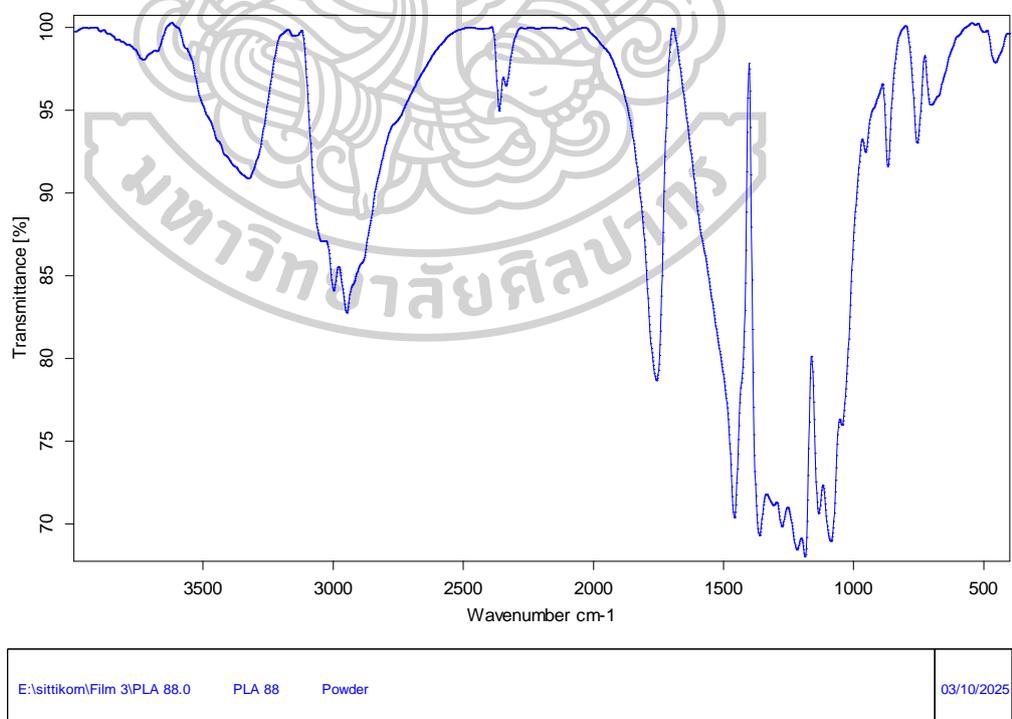
Page 1/1

รูปที่ ก. 10 FTIR-spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 92:8



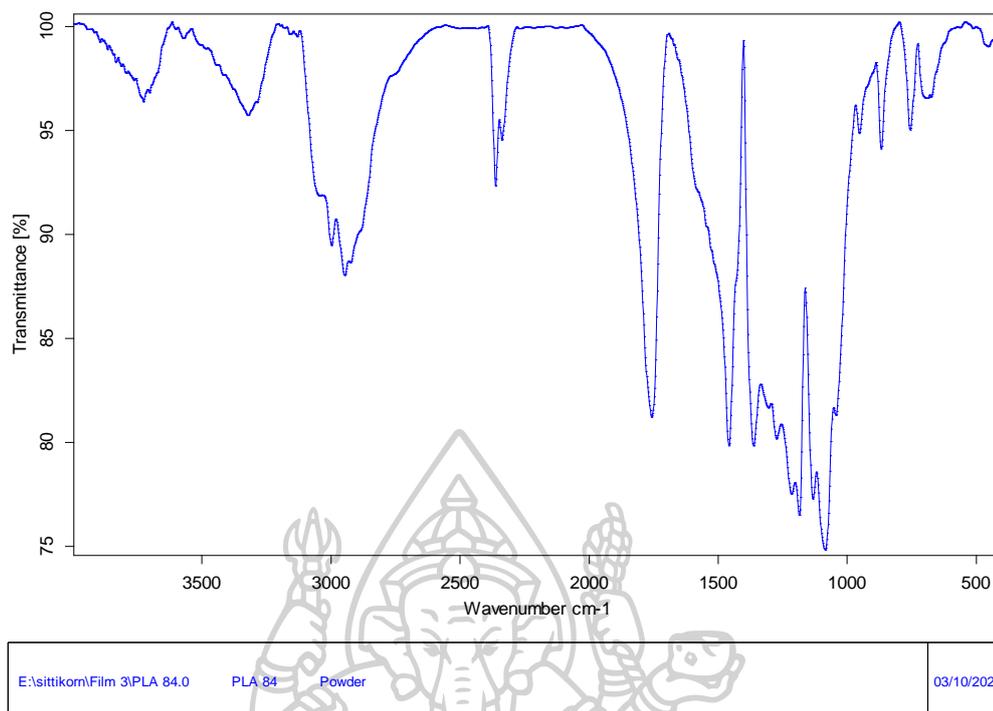
Page 1/1

รูปที่ ก. 11 FTIR-spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 90:10



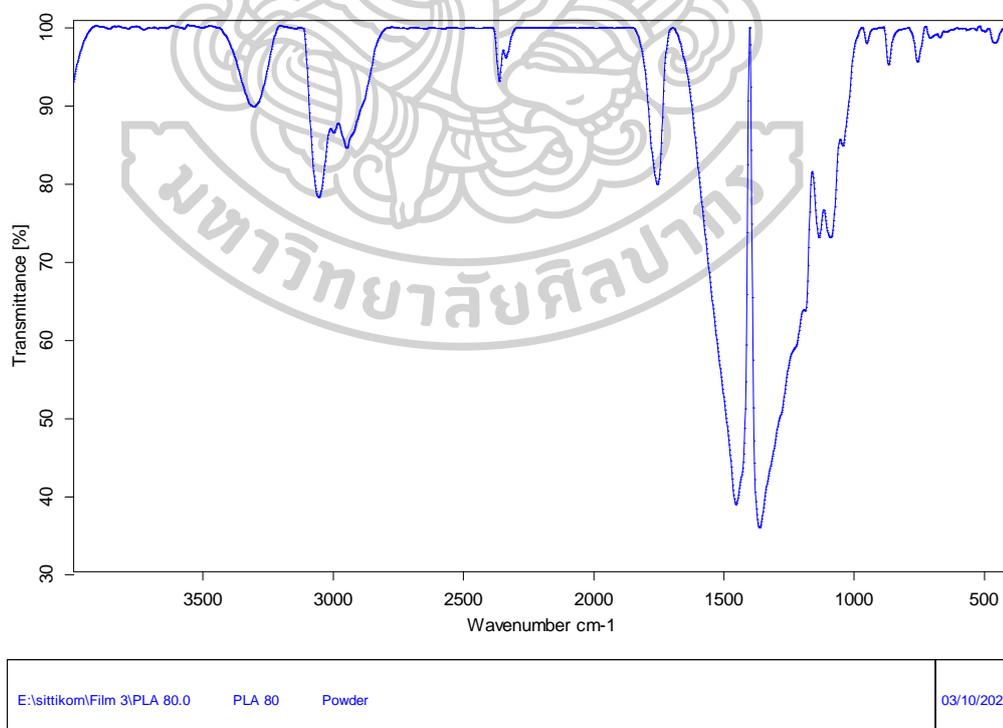
Page 1/1

รูปที่ ก. 12 FTIR-spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 88:12



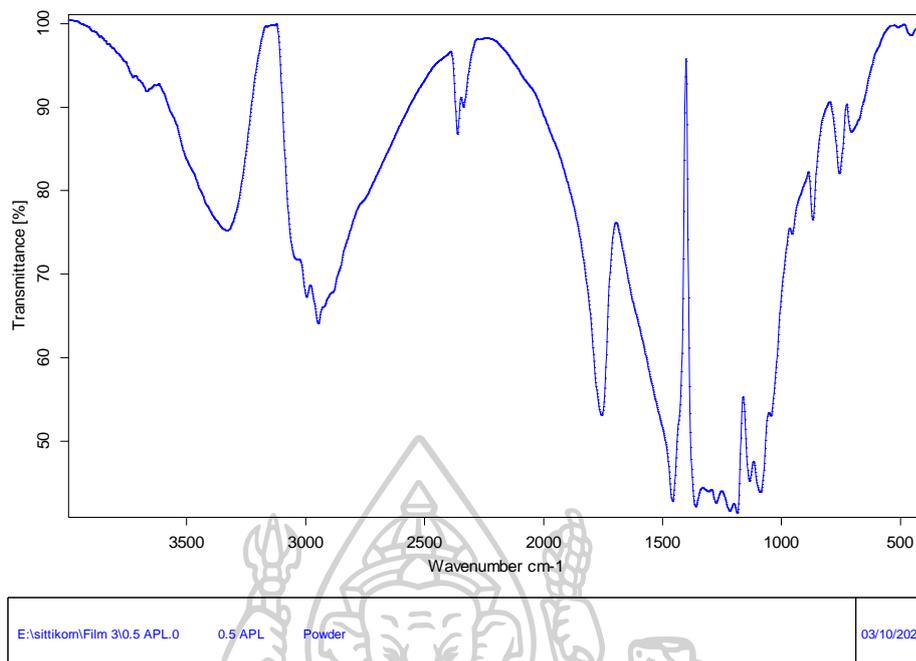
Page 1/1

รูปที่ ก. 13 FTIR-spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 84:16



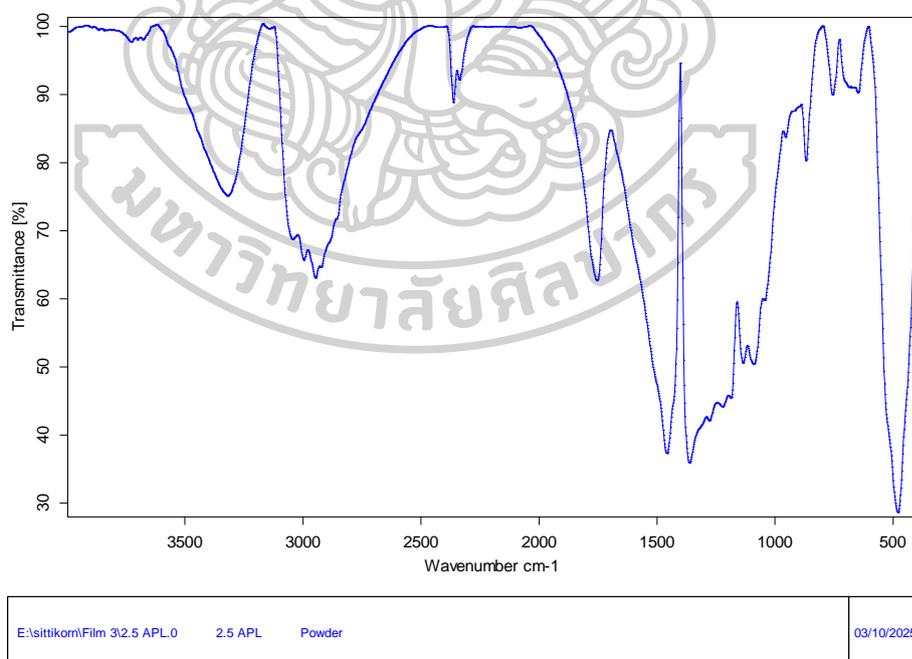
Page 1/1

รูปที่ ก. 14 FTIR-spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 80:20



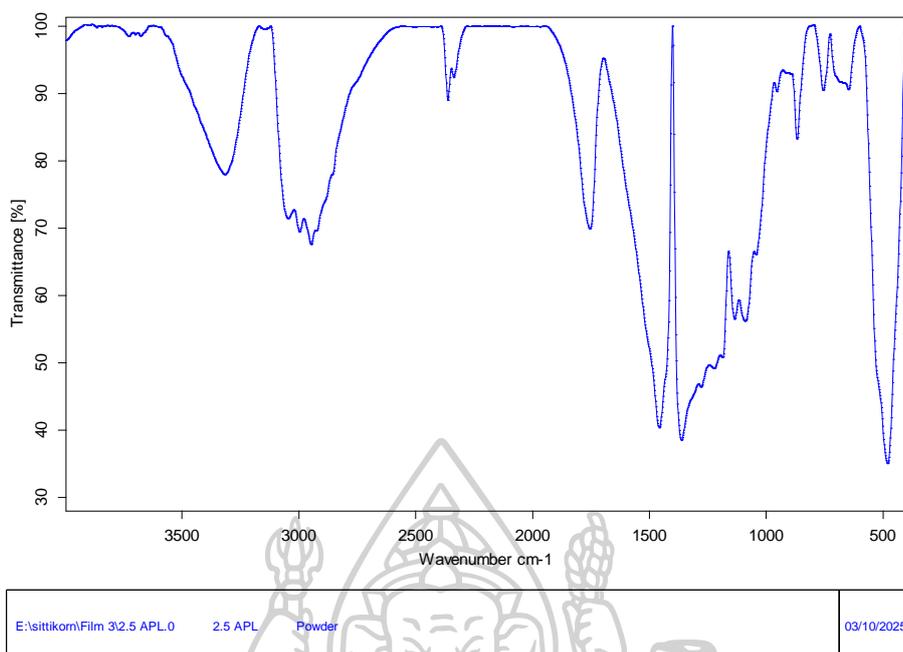
Page 1/1

รูปที่ ก. 15 FTIR-spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (PLA/PEG/ZnO NPs APL) ที่อัตราส่วน 89.5:10:0.5



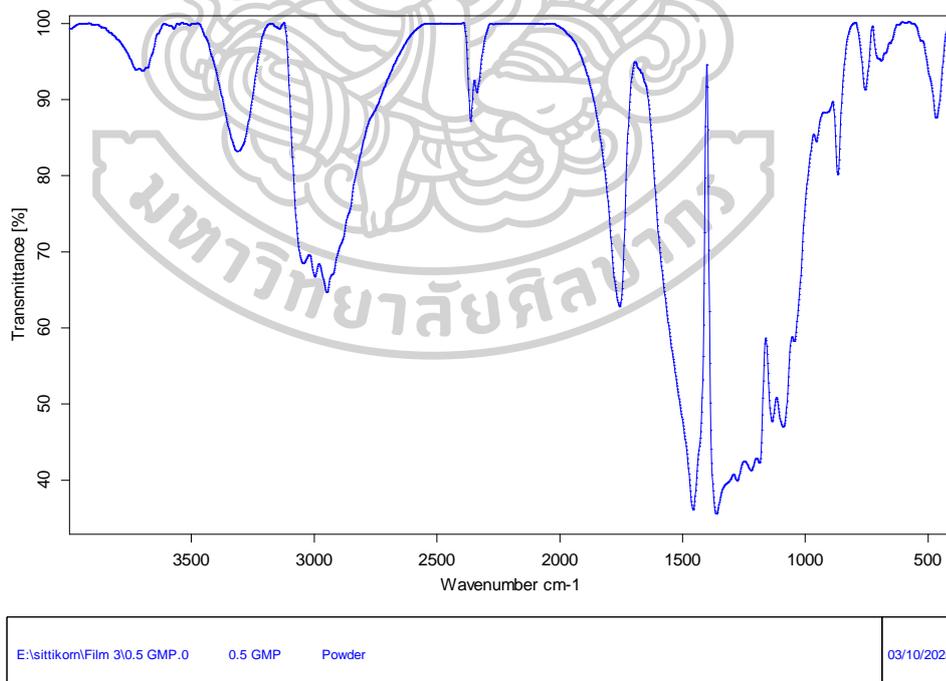
Page 1/1

รูปที่ ก. 16 FTIR-spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (PLA/PEG/ZnO NPs APL) ที่อัตราส่วน 89:9.5:1.5



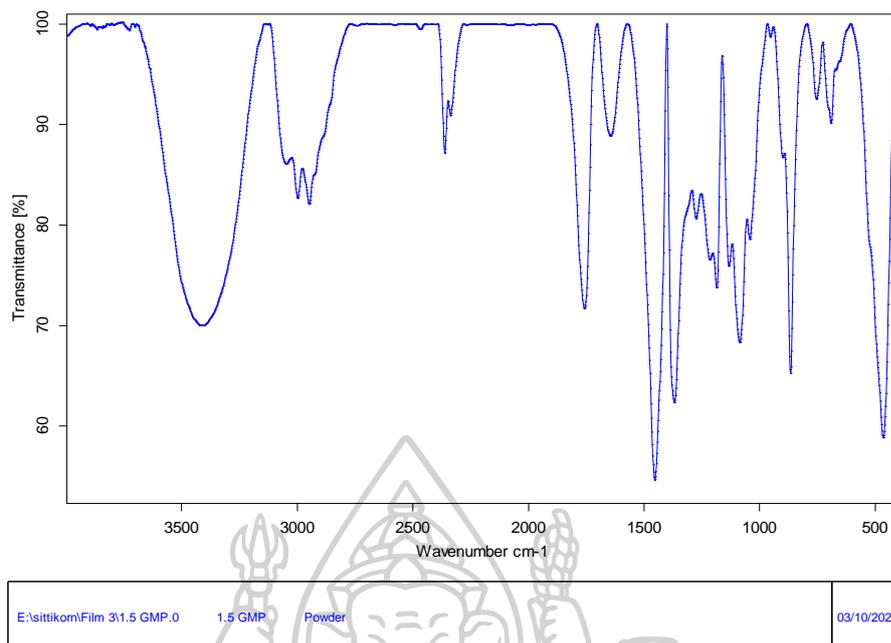
Page 1/1

รูปที่ ก. 17 FTIR-spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (PLA/PEG/ZnO NPs APL) ที่อัตราส่วน 88:9.5:2.5



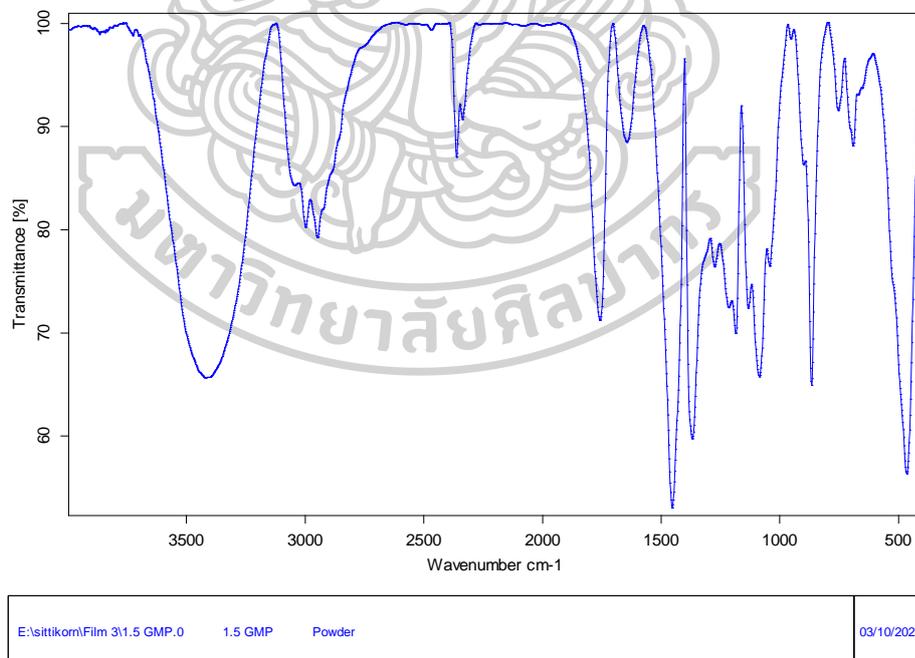
Page 1/1

รูปที่ ก. 18 FTIR-spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (PLA/PEG/ZnO NPs GMP) ที่อัตราส่วน 89.5:10:0.5



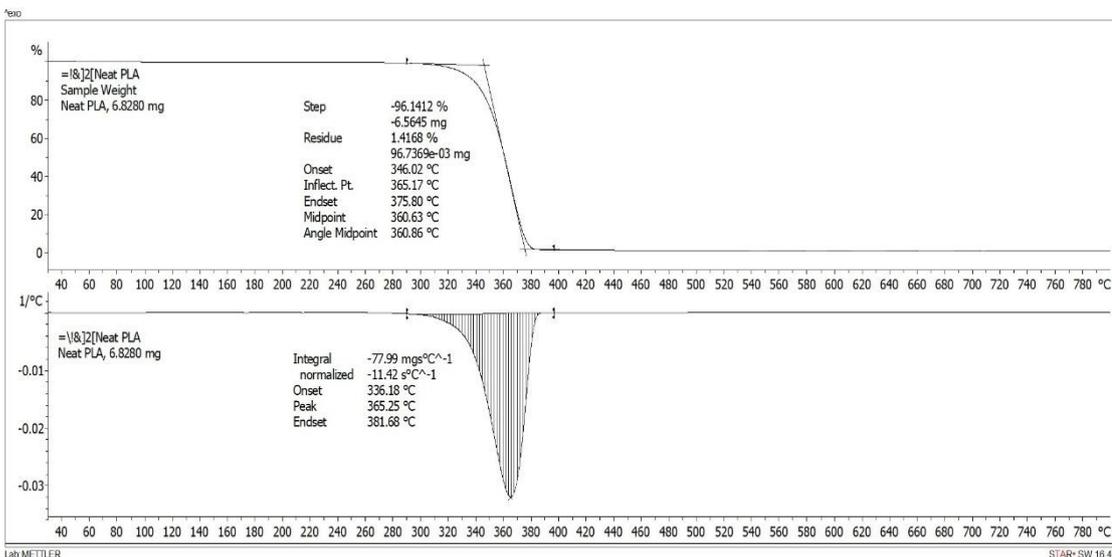
Page 1/1

รูปที่ ก. 19 FTIR-spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (PLA/PEG/ZnO NPs GMP) ที่อัตราส่วน 89:9.5:1.5

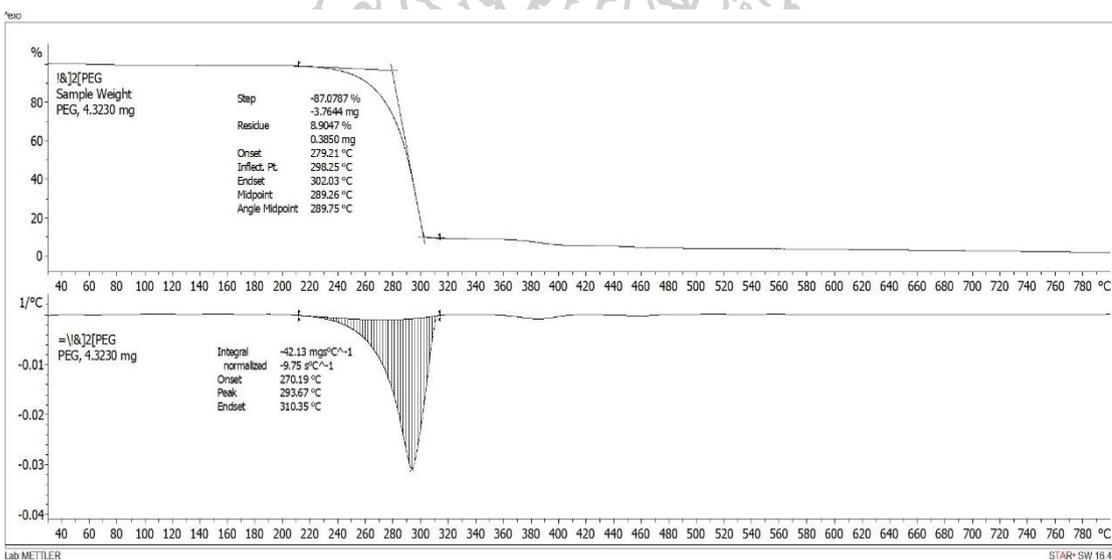


Page 1/1

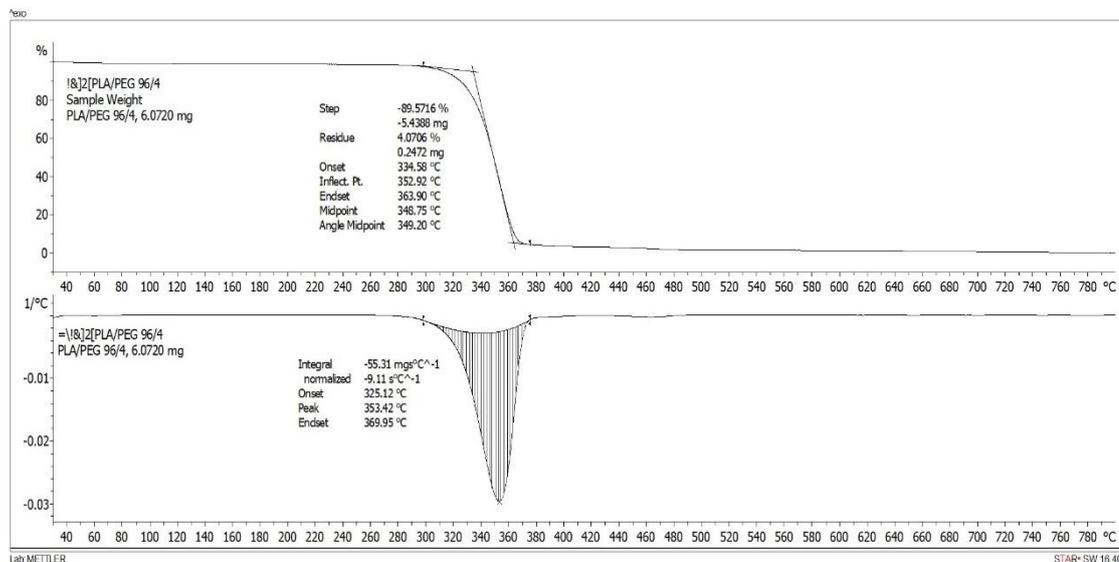
รูปที่ ก. 20 FTIR-spectra ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (PLA/PEG/ZnO NPs GMP) ที่อัตราส่วน 88:9.5:2.5



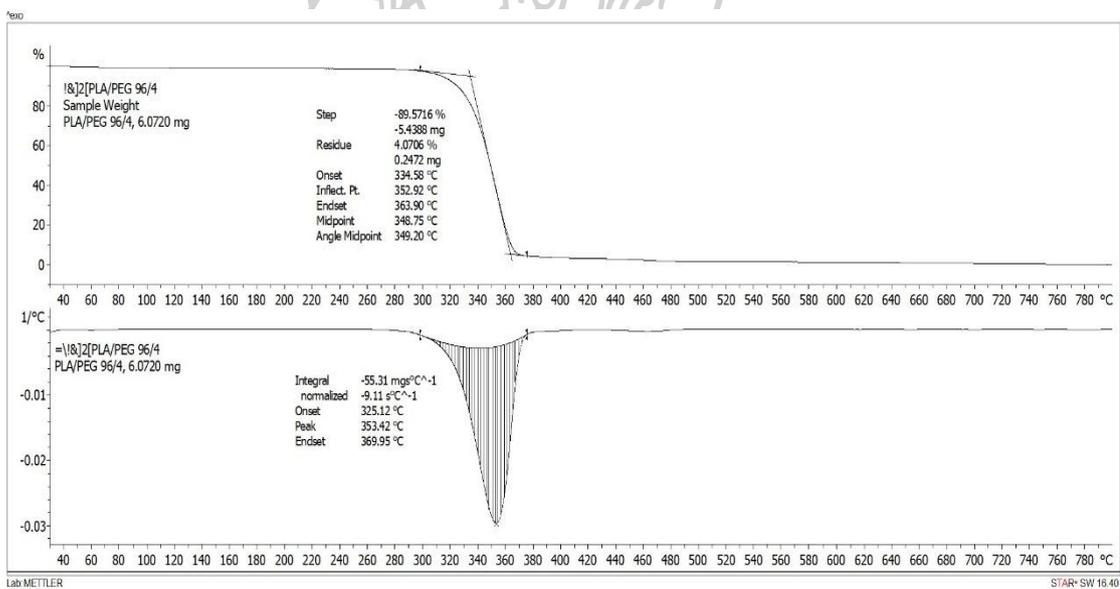
รูปที่ ก. 21 TGA thermogram ของพอลิแลกติกแอซิด (PLA)



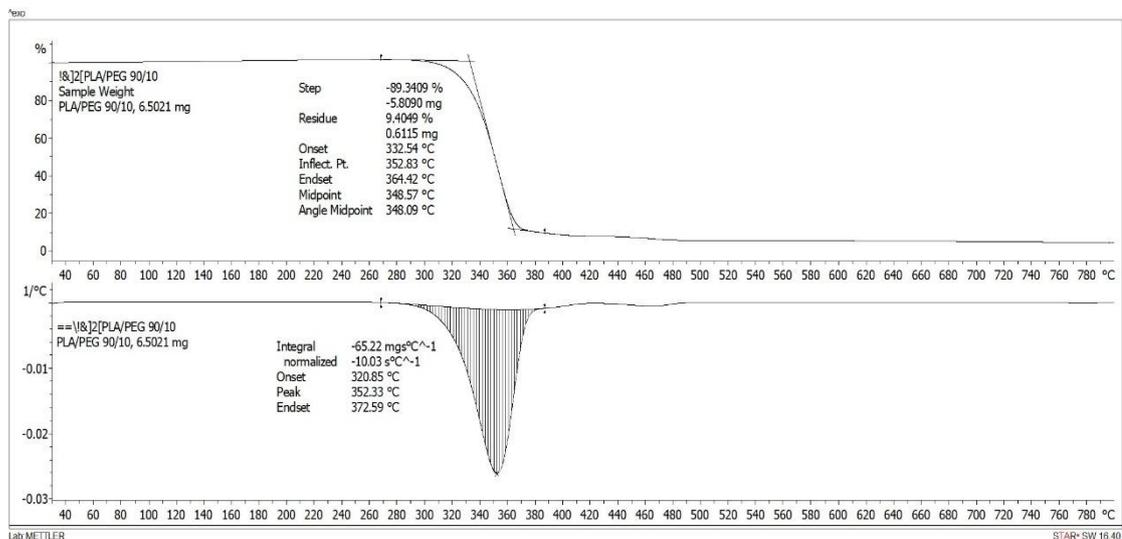
รูปที่ ก. 22 TGA thermogram ของพอลิเอทิลีนไกลคอล (PEG)



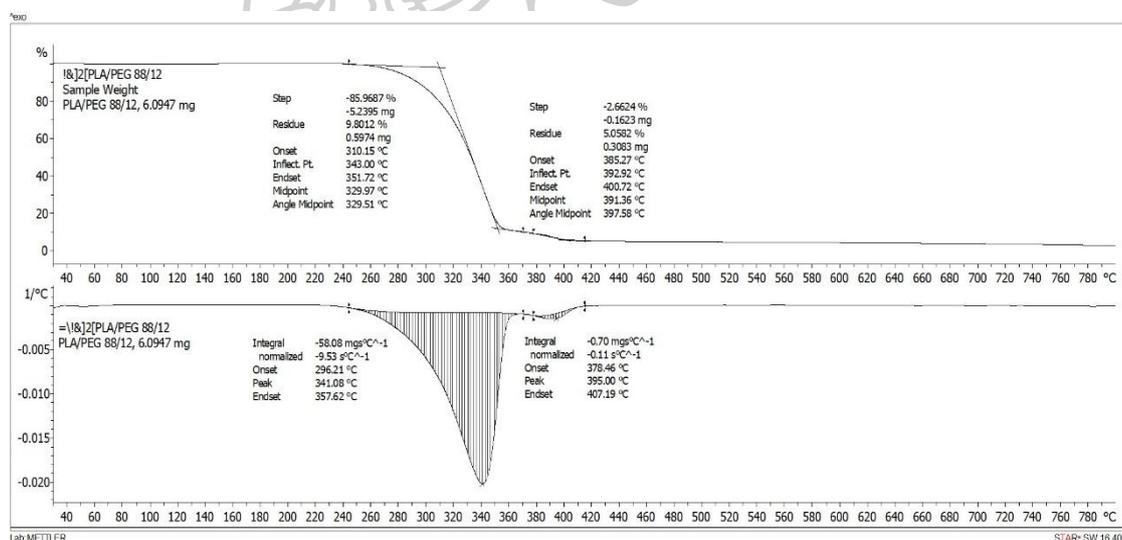
รูปที่ ก. 23 TGA thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 96:4



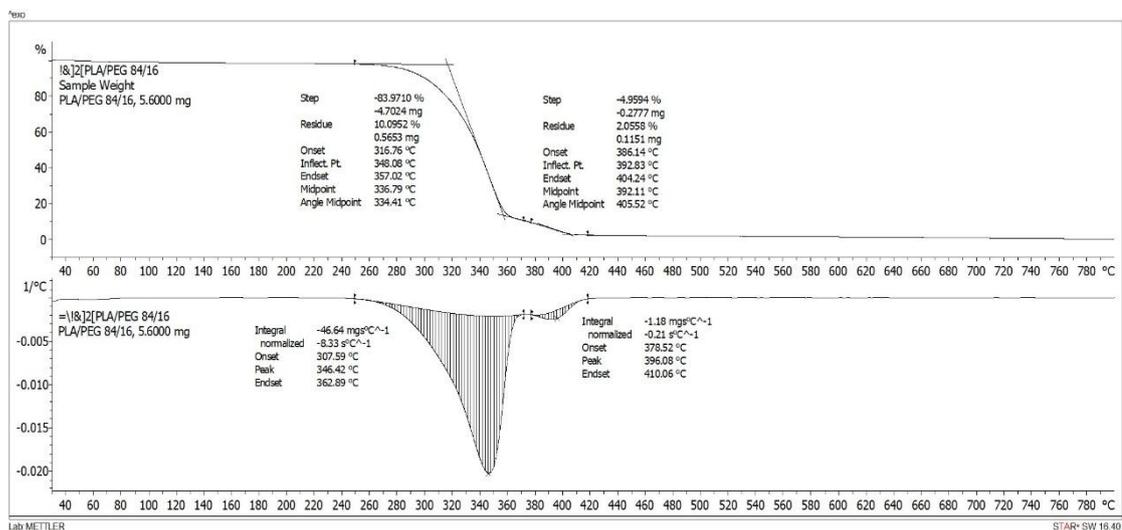
รูปที่ ก. 24 TGA thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 92:8



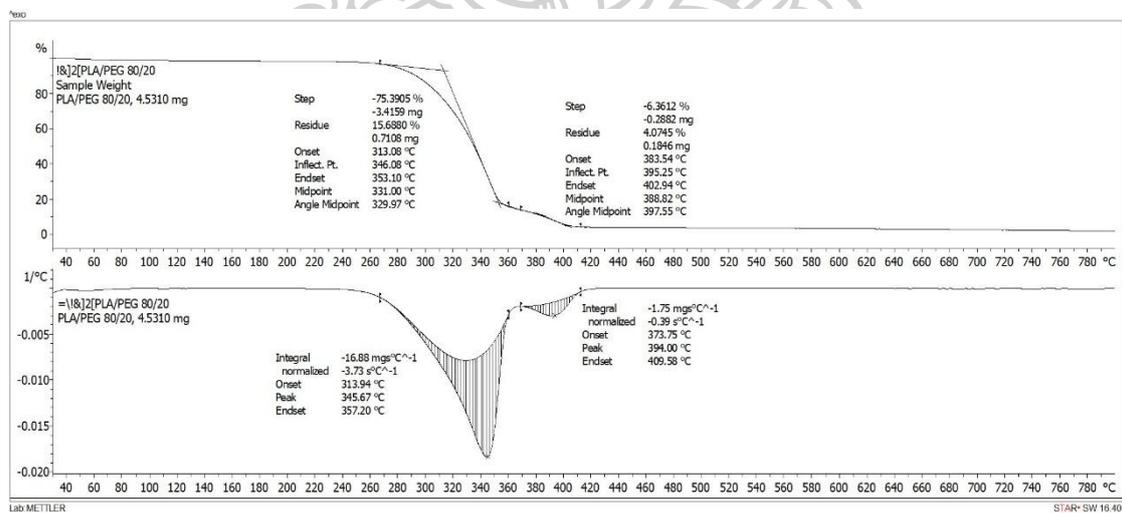
รูปที่ ก. 25 TGA thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 90:10



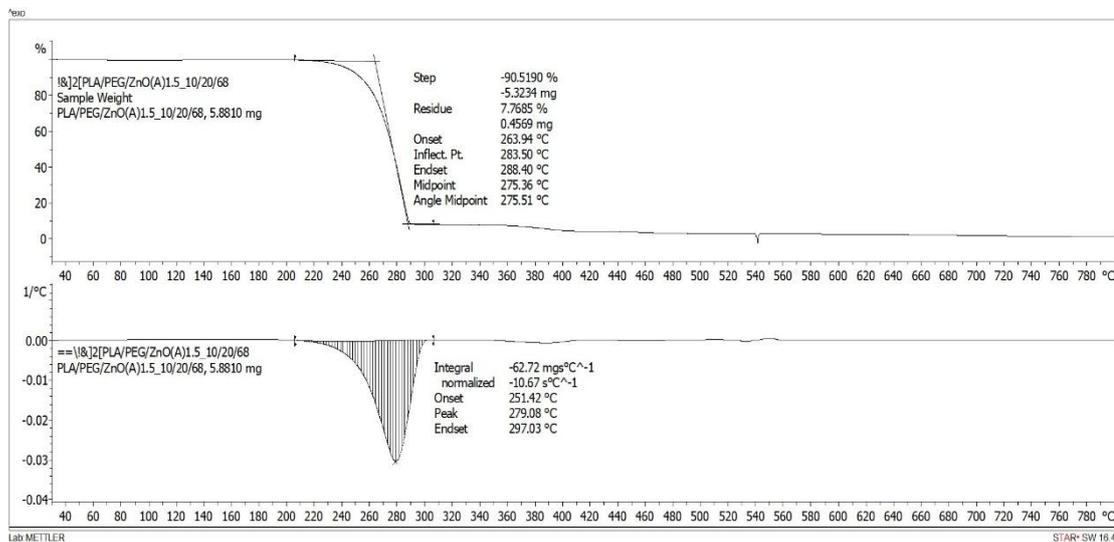
รูปที่ ก. 26 TGA thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 88:12



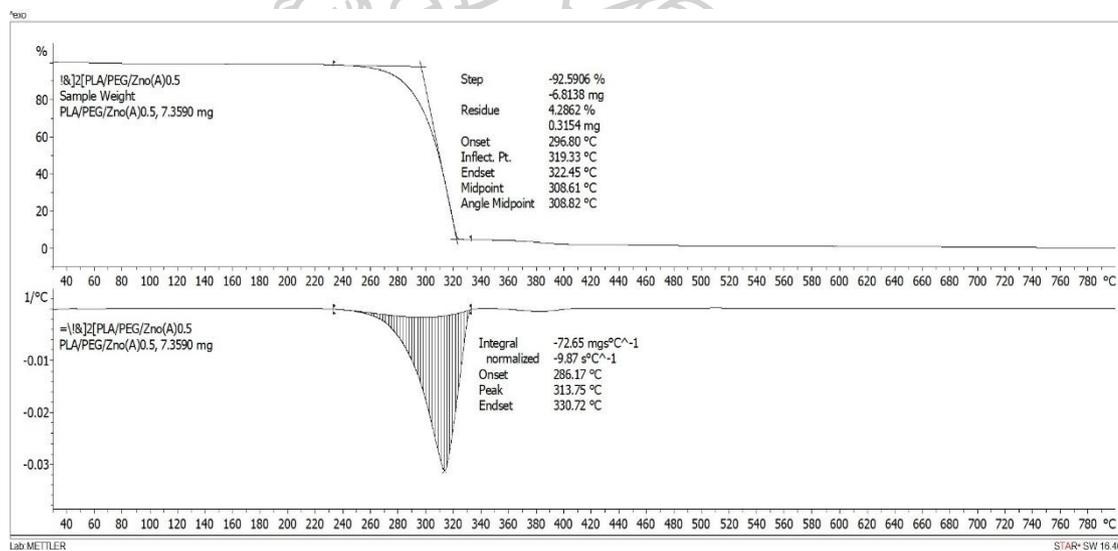
รูปที่ ก. 27 TGA thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 84:16



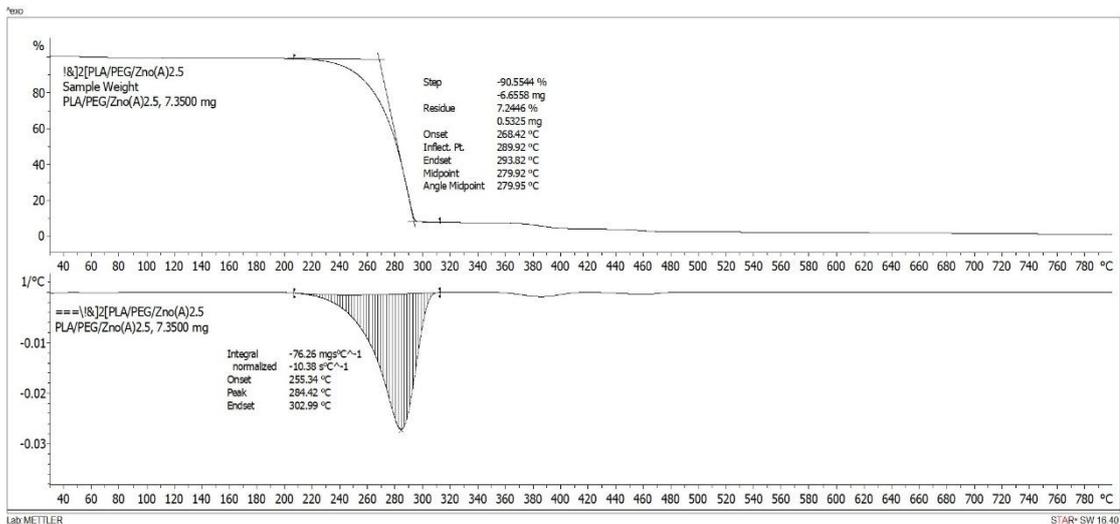
รูปที่ ก. 28 TGA thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 80:20



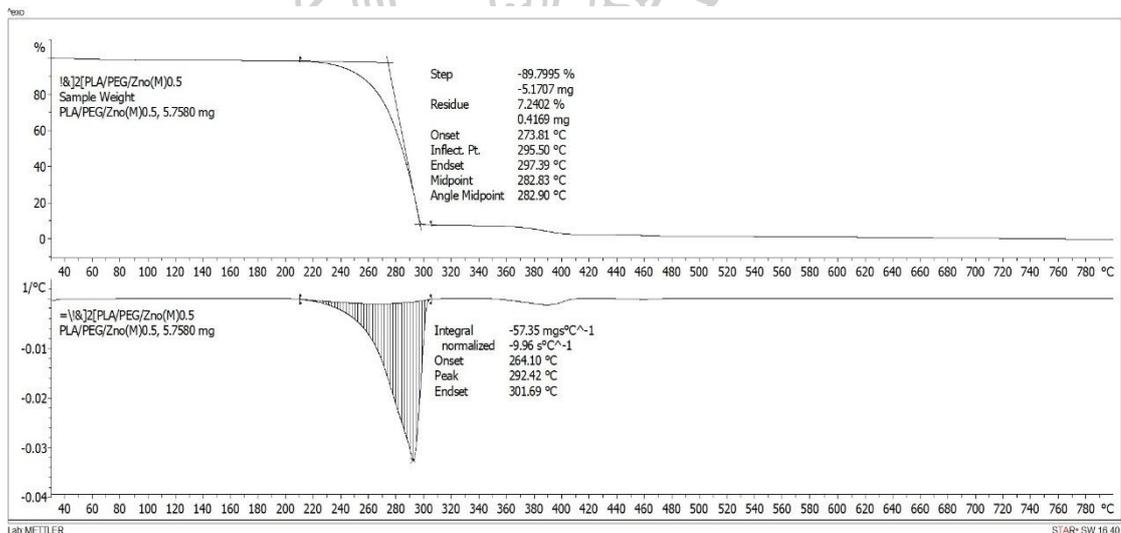
รูปที่ ก. 29 TGA thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (PLA/PEG/ZnO NPs APL) ที่อัตราส่วน 89.5:10:0.5



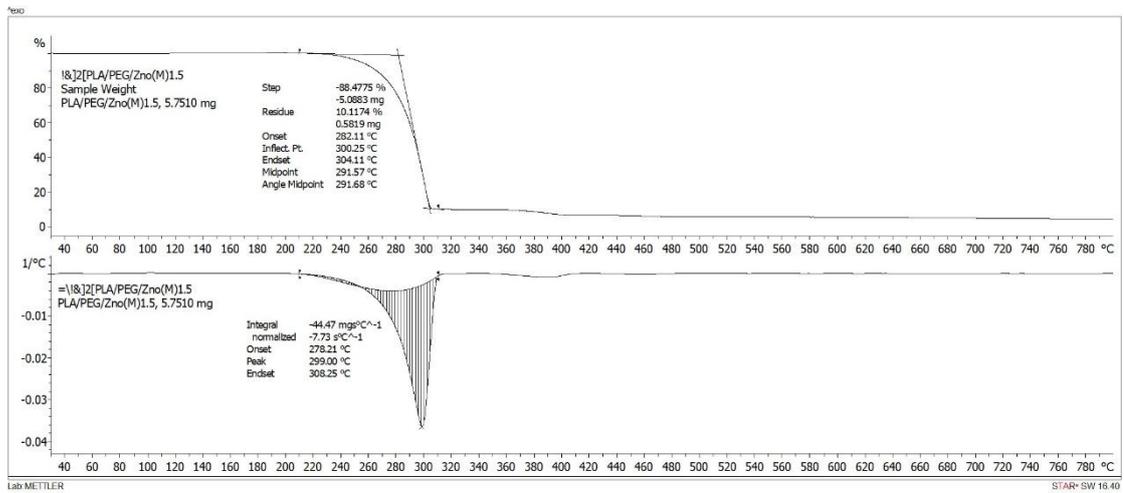
รูปที่ ก. 30 TGA thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอทิลีนไกลคอล และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (PLA/PEG/ZnO NPs APL) ที่อัตราส่วน 89:9.5:1.5



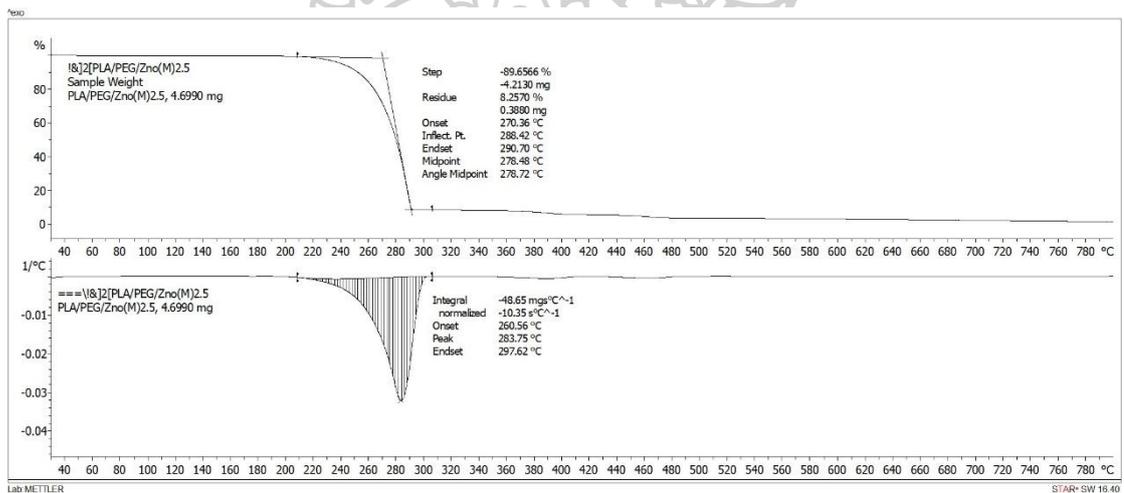
รูปที่ ก. 31 TGA thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอธิลีนไกลคอล และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (PLA/PEG/ZnO NPs APL) ที่อัตราส่วน
88:9.5:2.5



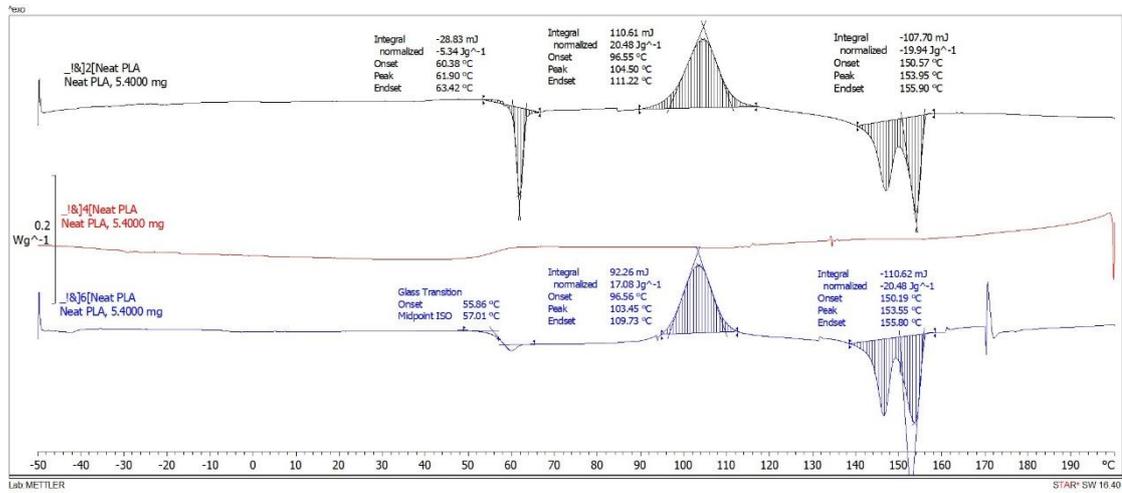
รูปที่ ก. 32 TGA thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอธิลีนไกลคอล และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (PLA/PEG/ZnO NPs GMP) ที่อัตราส่วน
89.5:10:0.5



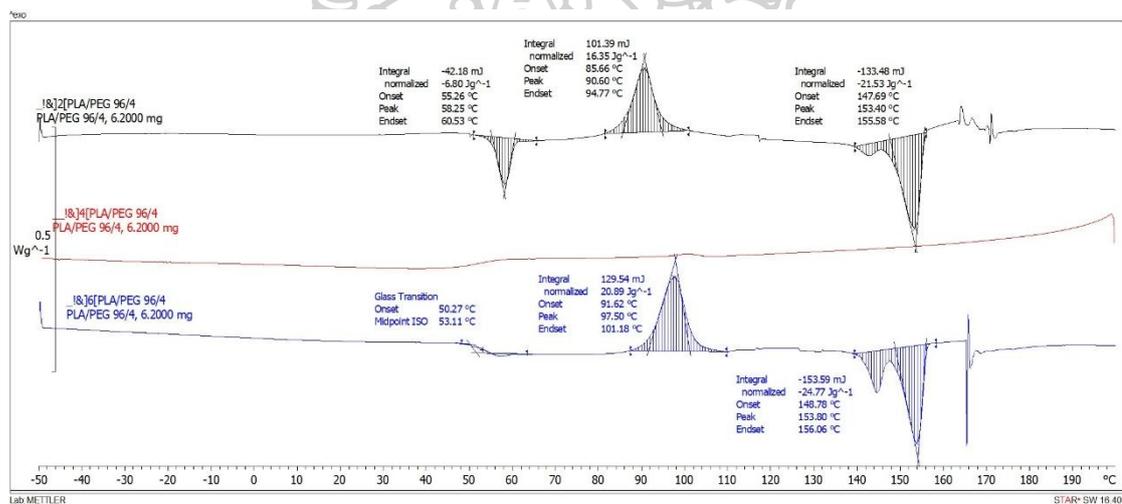
รูปที่ ก. 33 TGA thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (PLA/PEG/ZnO NPs GMP) ที่อัตราส่วน 89:9.5:1.5



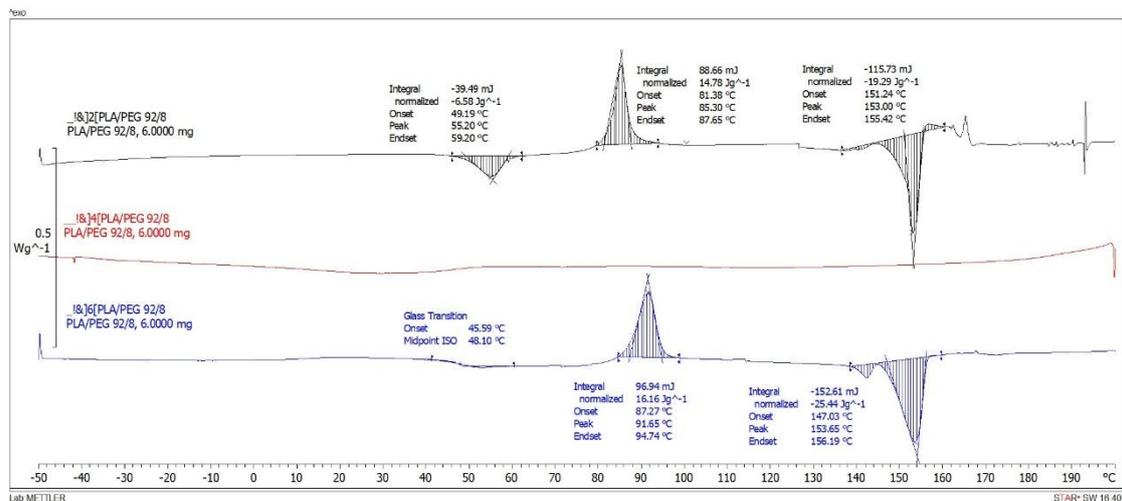
รูปที่ ก. 34 TGA thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล และอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (PLA/PEG/ZnO NPs GMP) ที่อัตราส่วน 88:9.5:2.5



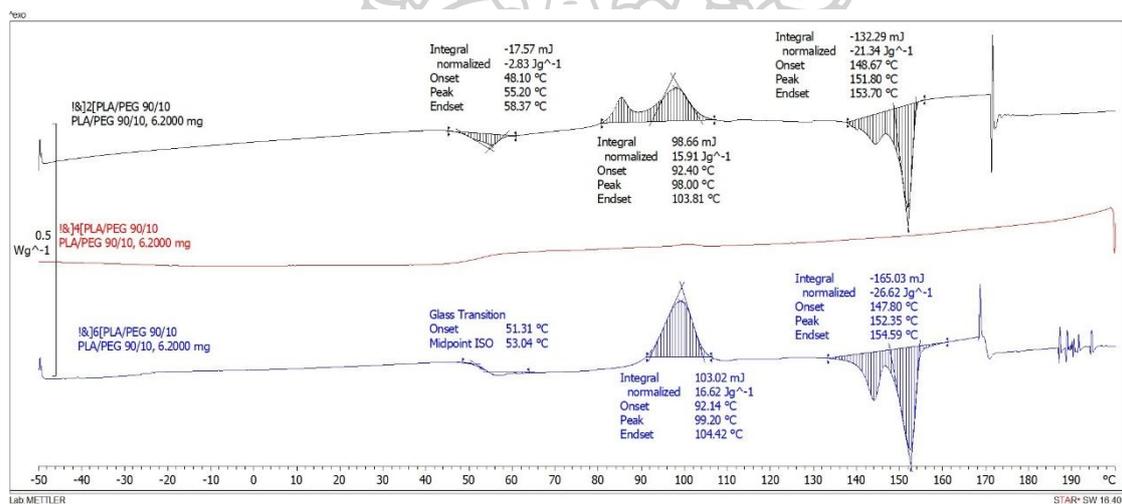
รูปที่ ก. 35 DSC thermogram ของพอลิแลกติกแอซิด (PLA)



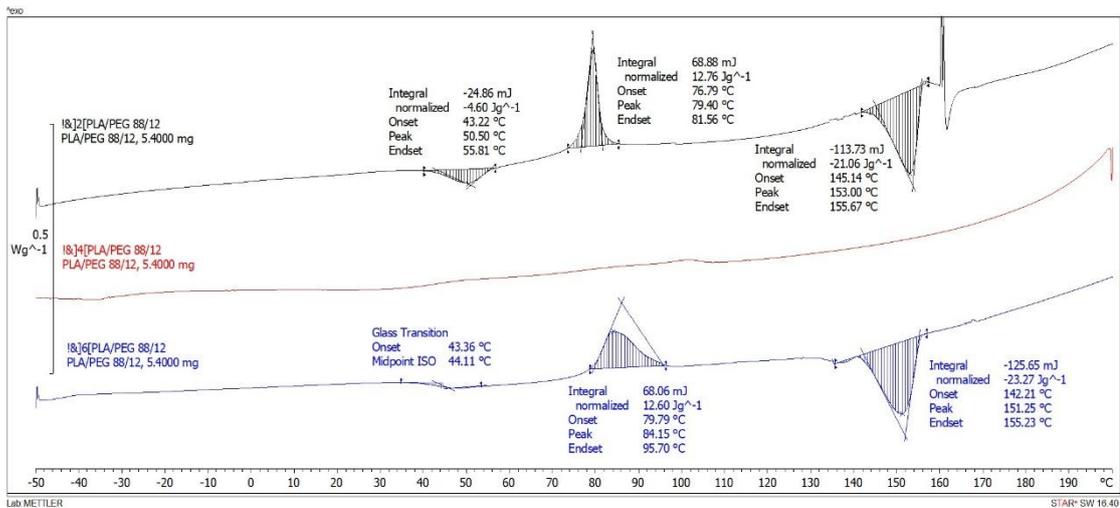
รูปที่ ก. 36 DSC thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 96:4



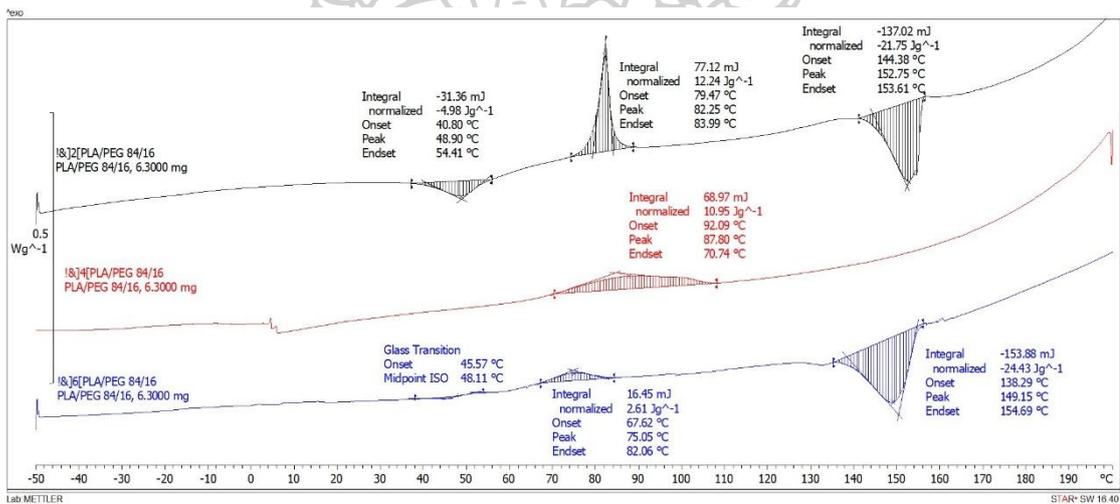
รูปที่ ก. 37 DSC thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 92:8



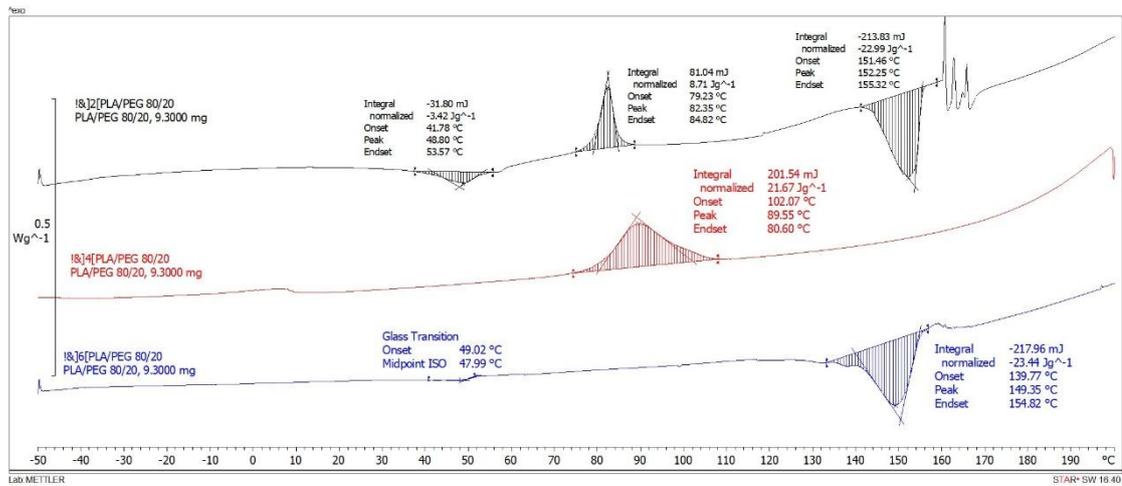
รูปที่ ก. 38 DSC thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 90:10



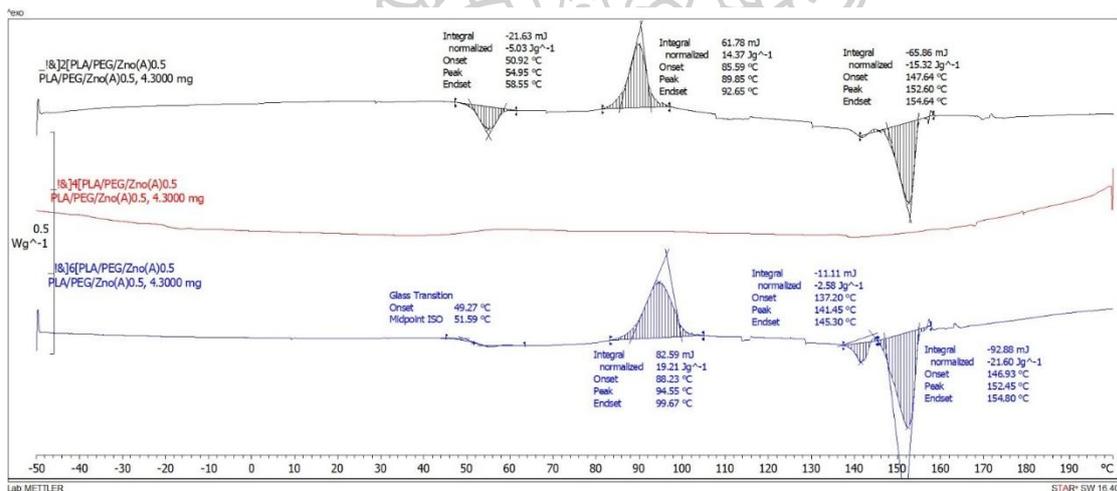
รูปที่ ก. 39 DSC thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 88:12



รูปที่ ก. 40 DSC thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 84:16

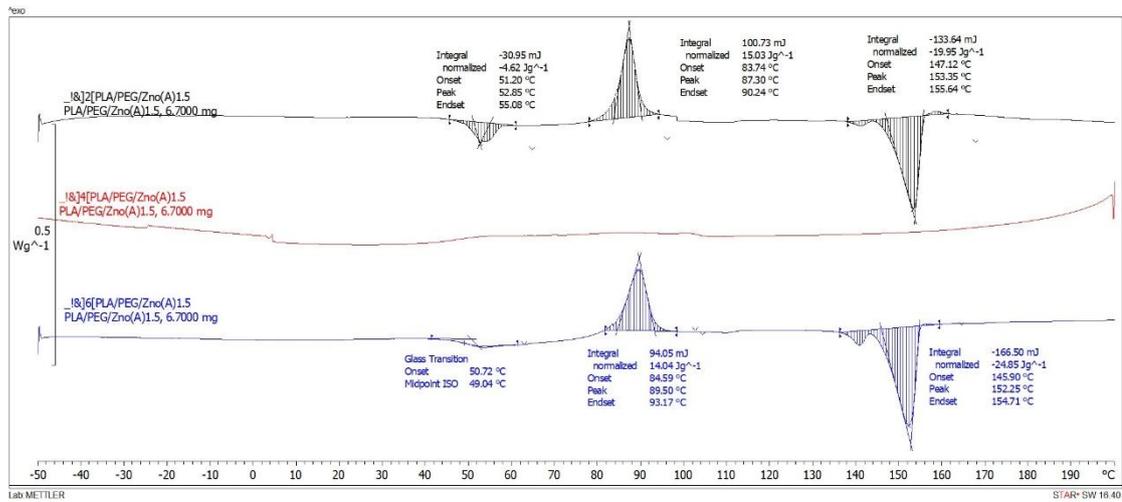


รูปที่ ก. 41 DSC thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 80:20

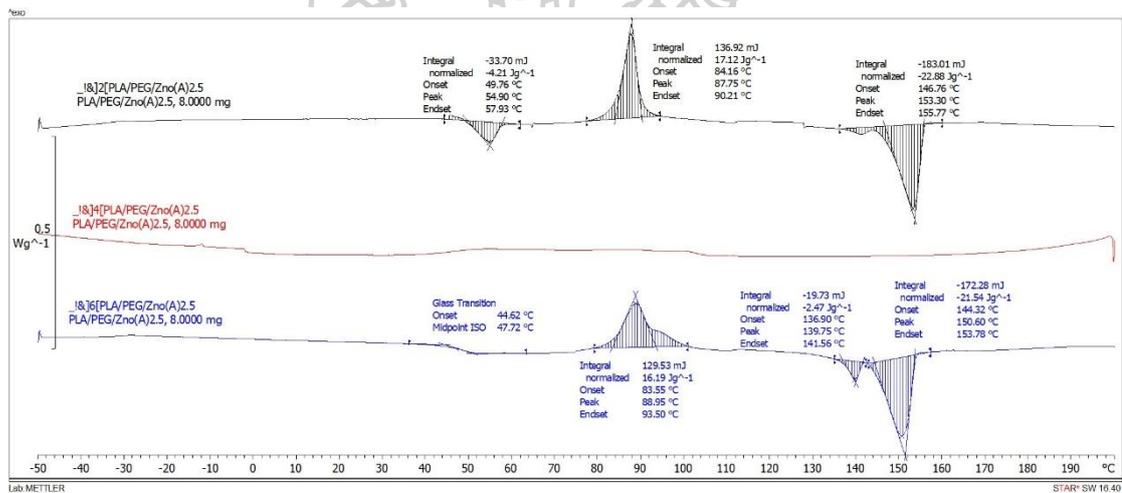


รูปที่ ก. 42 DSC thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอลและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (PLA/PEG/ZnO NPs APL) ที่อัตราส่วน 89.5:10:0.5

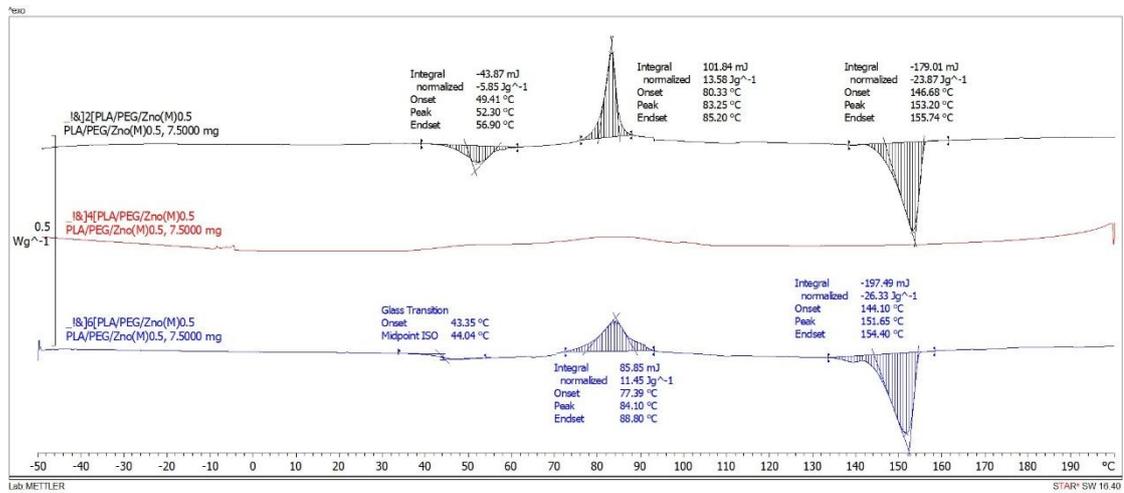
89.5:10:0.5



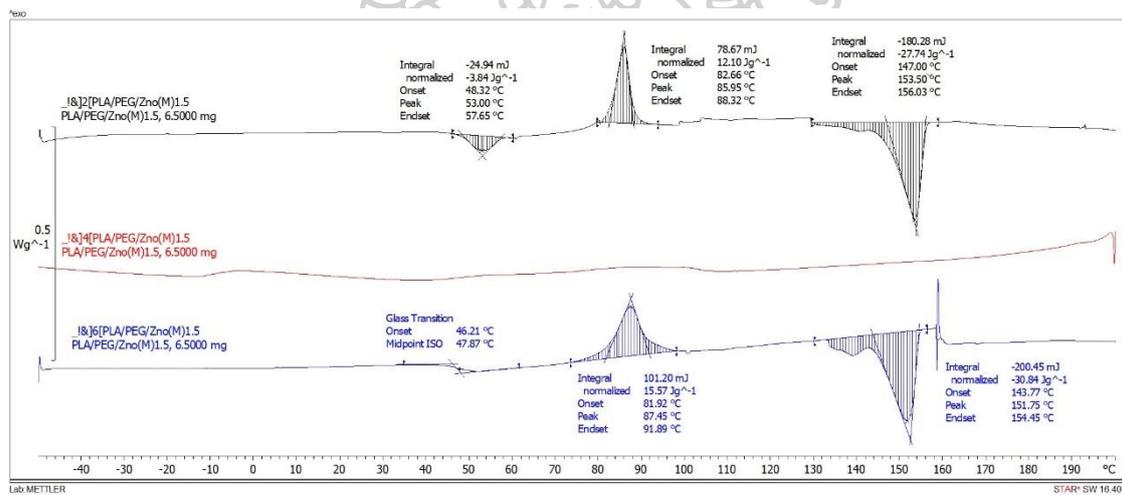
รูปที่ ก. 43 DSC thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอลและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (PLA/PEG/ZnO NPs APL) ที่อัตราส่วน 89:9.5:1.5



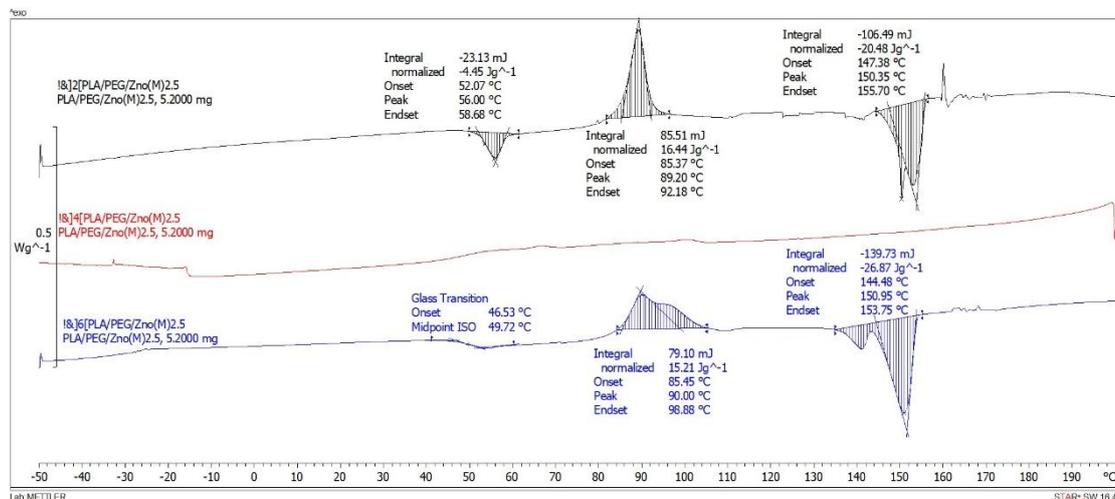
รูปที่ ก. 44 DSC thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/พอลิเอธิลีนไกลคอลและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (PLA/PEG/ZnO NPs APL) ที่อัตราส่วน 88:9.5:2.5



รูปที่ ก. 45 DSC thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอทิลีนไกลคอลและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (PLA/PEG/ZnO NPs GMP) ที่อัตราส่วน
89.5:10:0.5



รูปที่ ก. 46 DSC thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอทิลีนไกลคอลและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (PLA/PEG/ZnO NPs GMP) ที่อัตราส่วน
89:9.5:1.5



รูปที่ ก. 47 DSC thermogram ของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด/
พอลิเอธิลีนไกลคอลและอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (PLA/PEG/ZnO NPs APL) ที่อัตราส่วน
88:9.5:2.5





ภาคผนวก ข.
ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณหาปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสม

$$\%x_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{W_{PLA} \times \Delta H_m^\circ} \times 100 \%$$

ตารางที่ ข. 1 สมบัติทางความร้อนและปริมาณผลึกของฟิล์มวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิเมอร์ผสม พอลิแลกติกแอซิดและพอลิเอทิลีนไกลคอล (PLA/PEG) ที่อัตราส่วน 96:4

Sample	T _g (°C)	T _g (°C)	T _m (°C)	T _m (°C)	T _m (°C)	T _{cc} (°C)	ΔH _{cc} (J/g)	ΔH _m (J/g)	X _c (%)
	PLA	PEG	PLA	PEG	PEG				
			1	2					
PLA/PEG (96:4)	53.11	-	144.28	153.80	-	97.50	20.98	24.77	4.22

ΔH_m° มี heat of fusion ของ completely crystalline ของ PLA มีค่า 93.7 J/g

$$\%x_c = \frac{24.77 - 20.98}{\frac{96}{100} \times 93.6} \times 100 \% = 4.22 \%$$

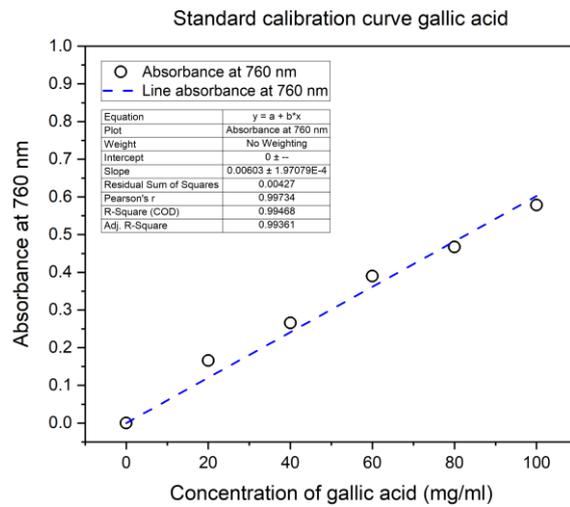
2. การคำนวณหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของสารสกัดสมุนไพร

หาค่าการดูดกลืน (Absorbance): วัดค่าการดูดกลืนที่ 760 nm ของตัวอย่างที่ต้องการหาค่าฟีนอล ใช้สมการจากกราฟ: ใช้สมการที่ได้จากกราฟในรูปแบบ $y = a + b \cdot x$ ซึ่งเป็นสมการของเส้นตรงในกราฟ โดยที่:

y คือ ค่าการดูดกลืน (Absorbance)

x คือ ความเข้มข้นของกรดทาลิก (Concentration of gallic acid)

a และ b คือ ค่าของจุดตัดแกน Y และความชันที่ได้จากกราฟ



รูปที่ ข. 1 Standard calibration curve gallic acid

$$y = 0.006x + 0$$

ตารางที่ ข. 2 การดูดกลืนแสงของสารสกัดสมุนไพรรูปใบฟ้าทะลายโจรที่ 760 nm

Sample	Absorbance at 760 nm
100% Ethanol	0.09377

$$x = \frac{0.09377}{0.006} = 15.6283 \text{ mg GAE/ml}$$

จากนั้นนำไปคำนวณหาความเข้มข้นที่แท้จริง

$$\text{TPC} = \frac{C \times V \times \text{DF}}{M \times 1000}$$

C (Concentration) คือ ความเข้มข้นของสารสกัดเทียบกรดกาแล็ก (Concentration of gallic acid)

V (Volume) คือ ปริมาณของสารละลายที่ใช้ในการทดสอบซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิลิตร

DF (Dilution Factor) คือ ตัวคูณที่ใช้สำหรับการปรับขนาดหรือการเจือจางของสารละลายที่ใช้ในการทดลอง

m (Mass of Sample) คือ มวลของตัวอย่างพืชหรือสารที่ต้องการทดสอบ

TPC (Total Phenolic Content) คือ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในตัวอย่าง ในหน่วย mg GAE/g dry weight

โดยในการทดสอบนี้จะใช้

C (Concentration) = 15.6283 mg GAE/ml

V (Volume) = 100 ml

DF (Dilution Factor) = 64

m (Mass of sample) = 5 g dry weight

$$\text{TPC} = \frac{15.6283 \times 100 \times 64}{5 \times 1000} = 20.00 \text{ mg GAE/g dry weight}$$

3. การคำนวณหาการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดสมุนไพร

$$\% \text{DPPH Radical Scavenging} = \left[\frac{A_{\text{control}} - A_{\text{sample}}}{A_{\text{control}}} \right] \times 100$$

A_{control} คือ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของ DPPH ที่ไม่มีตัวอย่าง (control) หรือการทดลองที่ไม่มีสารสกัด

A_{sample} คือ ค่าการดูดกลืนแสงของ DPPH ที่มีตัวอย่าง (sample) หรือสารสกัดที่ทดสอบ

% DPPH Radical Scavenging คือ เปอร์เซ็นต์ของการยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH ที่เกิดจากตัวอย่างที่ทดสอบ

ตารางที่ ข. 2 การดูดกลืนแสงของสารสกัดสมุนไพรใบฟ้าทะลายโจรที่ 515 nm

DPPH Control	100% Ethanol
0.65746	0.14865

$$\% \text{DPPH Radical} = \left[\frac{0.65746 - 0.14865}{0.65746} \right] \times 100 = 77.39\%$$

ภาคผนวก ค.

การนำเสนอผล



The International Conference on The 31st PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and The 16th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology (PPC & PETROMAT Symposium 2025) to be held on June 26, 2025 at Mandarin Managed by Centre Point Hotel.

TRANSFORMATION TOWARDS A SUSTAINABLE TOMORROW

PPC & PETROMAT SYMPOSIUM 2025
International Conference

The 31st PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and
The 16th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology

With

The 9th SKY Symposium (SKY 2025)

and

Workshop on Water 2025

25 - 27 June 2025
at Mandarin Hotel Bangkok and
The Petroleum and Petrochemical College, Thailand

www.ppc.chula.ac.th/ppcsymposium



***The 31st PPC Symposium on Petroleum,
Petrochemicals, and Polymers
and
The 16th Research Symposium
on Petrochemical and Materials Technology
(PPC & PETROMAT SYMPOSIUM 2025)
9th SKY Symposium (SKY 2025)
with
Workshop on Water 2025***

Co-organized by

***The Petroleum and Petrochemical College,
Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology,
Thailand Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry,
Metallurgy and Materials Science Research Institute
Chulalongkorn University
and Shinshu University***

at

***Mandarin Hotel Managed by Centre Point
Bangkok, Thailand***

***June 25-27, 2025
8.00 – 17.00***

BIOSYNTHESIZED ZINC OXIDE NANOPARTICLES BY HYDROALCOHOLIC PLANT EXTRACTS FOR PLA/PEG BIOCOMPOSITES

Sittikorn Bawthong^{a,b}, Nattakarn Hongsriphan^{a,b}, Pajara Patanathabutr^{a,b}

^a Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology Silpakorn University
^b Center of Excellence on Petrochemical and Material Technology, Chulalongkorn University

Keywords: Green synthesis, Zinc oxide nanoparticles, PLA/PEG biocomposites, Active food packaging

ABSTRACT

The development of sustainable nanocomposite materials incorporating biofunctional nanomaterials has attracted significant interest for environmentally friendly applications, particularly in antimicrobial packaging. Zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) are especially promising due to their inherent antimicrobial and UV-blocking properties. This study focused on the green synthesis of ZnO-NPs using hydroalcoholic extracts of *Andrographis paniculata* leaves and *Garcinia mangostana* peels, both rich in phytochemicals that serve as natural reducing and stabilizing agents. Total phenolic content (TPC) analysis revealed substantially higher concentrations in *Garcinia mangostana* peel (153 mg GAE/g) compared to *Andrographis paniculata* leaves (13 mg GAE/g), with an optimal ethanol–water extraction ratio of 75:25 (v/v). Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) confirmed the presence of phenolic compounds involved in ZnO-NPs formation. X-ray diffraction (XRD) verified the crystalline wurtzite structure of ZnO, while scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) were used to assess nanoparticle morphology, size, and elemental composition. The biosynthesized ZnO-NPs were subsequently incorporated into polylactic acid (PLA)/polyethylene glycol (PEG) composites (80:20 w/w) master batch to evaluate their performance in biodegradable films. These results highlight the potential of phytomediated ZnO-NPs as multifunctional nanofillers for active food packaging applications.

* Bawthong_S@su.ac.th

INTRODUCTION

Nanotechnology enables the creation of nanocomposite films with enhanced gas barrier and antimicrobial properties for sustainable food packaging, while blending biodegradable polylactic acid (PLA) with polyethylene glycol (PEG) improves its flexibility and processability. Zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) are added to PLA/PEG films to enhance antibacterial activity, UV protection, gas barrier properties, and mechanical strength, while green synthesis using plant extracts offers an eco-friendly alternative to conventional chemical methods. *Andrographis paniculata* leaves and *Garcinia mangostana* peel, rich in phenolics and flavonoids, serve as eco-friendly plant extracts that act as natural reducing and stabilizing agents for the green synthesis of biocompatible ZnO nanoparticles suitable for food-related applications. This study aims to synthesize green ZnO-NPs and incorporate them into PLA/PEG blends to produce biodegradable active packaging films.

EXPERIMENTAL

A. Materials

Both *Andrographis paniculate* leaves (APL) and *Garcinia mangostana* peels (GMP) were sourced from local cultivators in Uthai Thani and Chanthaburi provinces of Thailand, respectively. Zinc acetate dihydrate (99.5%) and polyethylene glycol (PEG 6000, lab grade) were purchased from KemAus. Polylactic acid (PLA 4043D) were purchased from SMART BIO PLASTIC Co., Ltd. The total phenolic content was analyzed using the Folin–Ciocalteu reagent and gallic acid monohydrate (98%) were supplied by CTi & SCIENCE Co., Ltd. Sodium hydroxide (99% AR. grade), 95% ethanol (Solvent grade), and deionized water were used as solvents.

B. Plant extracts preparation

Both plants were washed, dried at 50 °C for 6 hours, and ground into powder. A total of 5 g of dried plant powder was extracted with 100 mL of 75% ethanol (ethanol:water = 75:25, v/v), which was selected based on prior evaluation of extraction efficiency. The extraction was performed at a solid-to-solvent ratio of 1:20 (w/v) by stirring at 70 °C for 2 hours. After cooling, the mixture was vacuum filtered, and the crude extract was stored at 4 °C for further experiments. Based on the total phenolic content (TPC), the phenolic concentration in the extract was estimated to be approximately 0.625 mg/mL for *Andrographis paniculata*, and 7.675 mg/mL for *Garcinia mangostana*, expressed as gallic acid equivalents (GAE). FTIR spectroscopy (4000–600 cm⁻¹) and UV-Vis spectroscopy (200–800 nm) were used to analyze the functional groups and UV absorption properties, respectively.

C. Characterization of Plant extracts

Total phenolic content (TPC) of the plant extract as measurement using the Folin–Ciocalteu method. Results were expressed as milligrams of gallic acid equivalents per gram of extract (mg GAE/g dry weight). Chemical functional groups of the plant extract were analyzed by FTIR (Vertex 70, Bruker, Germany) using ATR mode, with spectra recorded from 600 to 4000 cm⁻¹ at 4 cm⁻¹ resolution. The ultraviolet-visible (UV-Vis-1280, Shimadzu) light absorption of the plant extract was analyzed using a UV-Vis Spectrophotometer, scanning wavelengths from 200 to 800 nm.

D. Synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnO Nps)

Zinc oxide nanoparticles were synthesized by mixing 75 mL of plant extract with 25 mL of 0.2 M zinc acetate dihydrate solution (extract-to-zinc acetate ratio of 3:1, v/v). The mixture was stirred at 500 rpm and 70 °C for 1 hour. The pH was adjusted and maintained at 12 using 3 M NaOH, followed by an additional 2 hours of stirring under the same conditions. (Dappula et al., 2023) The resulting precipitate was centrifuged at 6000 rpm for 30 minutes at 25 °C, washed with deionized water, and oven-dried at 80 °C for 2 hours. The dried product was then calcined at 800 °C for exactly 1 hour to yield ZnO nanoparticles.

E. Characterization of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs)

The crystalline structure of ZnO nanoparticles was analyzed using XRD (XRD-6100, Shimadzu) with Cu K α radiation ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$), operating at 30 kV and 20 mA, over a 2θ range of 20–90°. Morphology and particle size were examined using SEM (MIRA3 Tescan) at 20,000 \times and 50,000 \times magnification with 15 kV accelerating voltage. Samples

were gold-coated to prevent charging at 30 sec. Powdered samples were compacted before XRD analysis. EDX attached to SEM was used to confirm elemental composition (Zn, O, and trace N, P, K) of the synthesized ZnO nanoparticles. EDX analysis was performed using EDAX APEX with a resolution of 131.5 eV. Elemental quantification was conducted using the built-in Smart Quant method with standardless ZAF correction.

F. Composite compounding and processing

PLA, PEG, and ZnO nanoparticles were initially blended at a ratio of 80:20:1 using a twin-screw extruder (SHJ-25, China) operated at 100 °C (zone 1), 140 °C (zone 2), 170 °C (zone 3), and 190 °C at the die head, and 50 rpm to produce a masterbatch, which was then pelletized. The masterbatch was subsequently mixed with neat PLA at 80:20 and 60:40 ratios (neat PLA to masterbatch) to achieve final PLA:PEG:ZnO-NPs compositions of 96:4:0.2 and 92:8:0.4, respectively. These blends were processed into films via cast film extrusion using zone temperatures of 140 °C (zone 1), 160 °C (zone 2), and 180 °C (die head), operated at a screw speed of 60 rpm.

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 show that Total phenolic content (TPC) varied with plants. *Andrographis paniculate* leaves showed highest TPC in 100% ethanol (19.91 mg GAE/g) (Adaramola et al., 2018), while *Garcinia mangostana* peels showed highest TPC in 50% ethanol (194.29 mg GAE/g) (Suttirak & Manurakchinakorn, 2014), highlighting the effectiveness of ethanol-water mixtures. However, 50% ethanol caused gel formation and filtration issues, while 100% ethanol evaporated rapidly. Therefore, 75% ethanol was selected as optimal for its high yield, easier handling. FTIR spectra of *Andrographis paniculate* leaves and *Garcinia mangostana* peels extract exhibit similar peaks, indicating shared functional groups. A broad peak at 3200–3600 cm^{-1} corresponds to O–H stretching, prominent in water-rich extracts due to hydroxyl groups from water, ethanol, and phenolics. Peaks at 2800–3000 cm^{-1} , associated with C–H stretching, are stronger in ethanol-rich extracts, reflecting ethanol and organic compounds. Additionally, a peak near 1640 cm^{-1} suggests C=O stretching or H–O–H bending vibrations and peaks at 1450–1600 cm^{-1} (C=C stretching) suggest aromatic rings, while 1000–1100 cm^{-1} (C–O stretching) reflects phenolics and ethanol. The 875 cm^{-1} peak, seen in *Garcinia mangostana* peel, indicates aromatic C–H bending. The ethanol:water ratio influences peak intensity, affecting compound extraction based on solvent polarity. (Dappula et al., 2023)

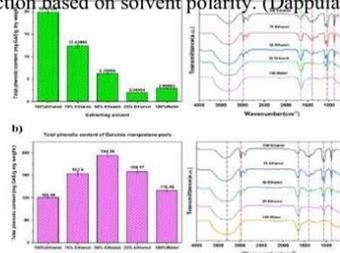


Figure 1. Total phenolic content and FTIR spectra of a) *Andrographis paniculate* leaves extract b) *Garcinia mangostana* peels extract.

Figure 2 show XRD patterns of ZnO–MGP, ZnO–APL, and commercial ZnO show characteristic peaks of hexagonal wurtzite ZnO at specific 2θ values. The biosynthesized ZnO-NPs displayed peak positions similar to commercial ZnO, confirming successful crystallization. Slight variations in peak intensity and width, especially in ZnO–MGP, suggest smaller crystallite sizes or morphological differences due to phytochemical influence. This indicates both plant extracts effectively guided ZnO formation for potential functional use.(Jaithon et al., 2024)

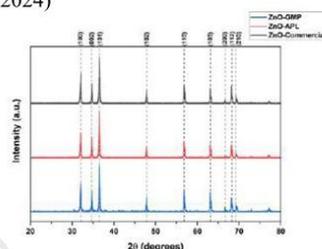


Figure 2. XRD patterns of ZnO nanoparticles synthesized from *Andrographis paniculata* leaves (APL) and *Garcinia mangostana* peels (GMP) , compared with commercial ZnO.

SEM images in Figure 3 show that ZnO nanoparticles synthesized using *Andrographis paniculata* leaves (a, b) are predominantly spherical with minimal aggregation and an average diameter of 286.60 nm. In contrast, ZnO nanoparticles from *Garcinia mangostana* peels (d, e) exhibit rod-like shapes, greater aggregation, and a larger average size of 443.04 nm (Jaithon et al., 2024). These morphological differences arise from variations in phytochemical composition, which affect particle nucleation and growth; *Andrographis paniculata* leaves likely enhance stabilization, yielding smaller, more uniform particles, while *Garcinia mangostana* peels promote crystal growth, resulting in larger, anisotropic structures. Both plant extracts effectively enable green synthesis, though their distinct physicochemical properties suggest different potential applications (Cao et al., 2021).

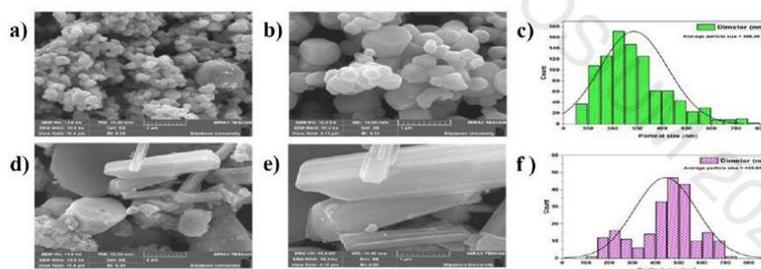


Figure 3. SEM images and particle size distribution of ZnO-NPs synthesized using *Andrographis paniculata* leaves (a–c) and *Garcinia mangostana* peels (d–f).

EDX results in Figure 4 show that ZnO-NPs synthesized from *Andrographis paniculata* leaves has a high Zn content (84.26%), indicating high purity and uniform crystallinity, which correlates with the formation of small, spherical particles. In contrast, ZnO from *Garcinia mangostana* peels contains lower Zn content (59.84%) and higher amounts of O and K. The presence of K in the structure may lead to substitution or interstitial incorporation, causing lattice strain. This structural distortion disrupts regular crystal growth and results in irregular morphologies, such as rods or plate-like structures. (Dappula et al., 2023)

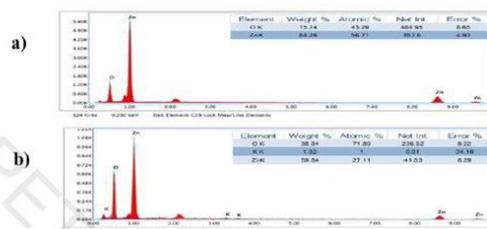


Figure 4. EDX spectra of ZnO-NPs synthesized using a) *Andrographis paniculata* leaves and b) *Garcinia mangostana* peels extracts.

In Figure 5, film clarity was affected by PEG content and ZnO nanoparticle incorporation. Neat PLA (a) was highly transparent but brittle, while PLA/PEG blends at 96:4 (b) and 92:8 (c) improved flexibility. The 80:20 blend (d) exhibited poor formability and surface defects, likely due to excessive PEG reducing matrix compatibility. To ease processability, an 80:20:1 PLA:PEG:ZnO nanoparticle masterbatch was prepared and then mixed with neat PLA at 80:20 and 60:40 ratios to achieve final compositions of 96:4:0.2 and 92:8:0.4 (e–h). Films containing ZnO-NPs synthesized from *Andrographis paniculata* leaves (e, f) appeared more opaque than those with ZnO-NPs from *Garcinia mangostana* peels (g, h). Notably, film (h) was clearer than film (f) despite both having the same PEG ratio (92:8), indicating better dispersion and morphology of the *Garcinia mangostana* peels derived ZnO. In contrast, ZnO-NPs derived from *Andrographis paniculata* leaves may have agglomerated more under high PEG conditions, leading to increased film turbidity. The masterbatch improved processability and enhanced the dispersion of both ZnO-NPs and PEG, resulting in greater film uniformity and improved visual quality (Shin et al., 2022).

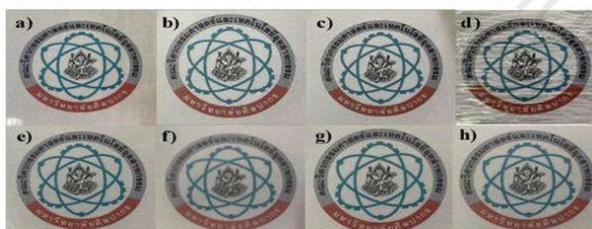


Figure 5. a) Neat PLA, b) PLA/PEG (96:4), c) PLA/PEG (92:8), d) PLA/PEG (80:20), e) PLA/PEG/ZnO-NPs APL (96:4:0.2), f) PLA/PEG/ZnO-NPs APL (92:8:0.4), g) PLA/PEG/ZnO-NPs GMP (96:4:0.2), h) PLA/PEG/ZnO-NPs GMP (92:8:0.4)

CONCLUSIONS

This research successfully synthesized green zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) through an eco-friendly process using hydroalcoholic extracts of *Andrographis paniculata* leaves and *Garcinia mangostana* peels, with each extract's unique phytochemicals influencing the nanoparticles size, shape, and elemental composition. ZnO-NPs from *Andrographis paniculata* leaves extracts were smaller and more spherical, while those from *Garcinia mangostana* peels extracts exhibited larger, rod-like structures. These nanoparticles were incorporated into biodegradable PLA/PEG blends via a masterbatch approach, which eased film processability and improved nanoparticle dispersion of ZnO-NPs and PEG within the polymer matrix. Optical assessments showed that films with *Garcinia mangostana* peels extracts derived ZnO had superior clarity, likely due to better nanoparticle dispersion and morphology. Overall, incorporating biosynthesized ZnO-NPs into PLA/PEG composites at ratios of 96:4:0.2 and 92:8:0.4 offers a promising and sustainable approach for developing active food packaging materials. Further studies will focus on evaluating the improved mechanical and structural properties of these films for packaging applications.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University and Hub of Talent: Sustainable Materials for Circular Economy, National Research Council of Thailand (NRCT).

REFERENCES

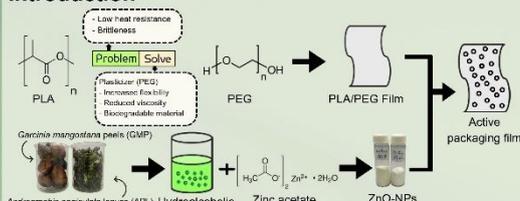
- Adaramola, F., Benjamin, G., Oluchi, O., & Fapohunda, S. (2018).** Antimicrobial and antioxidant activities of crude methanol extract and fractions of *Andrographis paniculata* leaf (Family: Acanthaceae) (Burm. f.) wall. Ex Nees. *Jordan Journal of Biological Sciences*, 11, 23-30.
- Cao, Y., Alijani, H. Q., Khatami, M., Bagheri-Baravati, F., Irvani, S., & Sharifi, F. (2021).** K-doped ZnO nanostructures: biosynthesis and parasiticidal application. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 5445-5451.
- Dappula, S. S., Kandarakonda, Y. R., Shaik, J. B., Mothukuru, S. L., Lebaka, V. R., Mannarapu, M., & Amooru, G. D. (2023).** Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using aqueous extract of *Andrographis alata*: Characterization, optimization and assessment of their antibacterial, antioxidant, antidiabetic and anti-Alzheimer's properties. *Journal of Molecular Structure*, 1273, 134264.
- Jaithon, T., Atichakaro, T., Phonphoem, W., T-Thienprasert, J., Sreewongchai, T., & T-Thienprasert, N. P. (2024).** Potential usage of biosynthesized zinc oxide nanoparticles from mangosteen peel ethanol extract to inhibit *Xanthomonas oryzae* and promote rice growth. *Heliyon*, 10(1), e24076.
- Shin, H., Thanakkasarnee, S., Sadeghi, K., & Seo, J. (2022).** Preparation and characterization of ductile PLA/PEG blend films for eco-friendly flexible packaging application. *Food Packaging and Shelf Life*, 34, 100966.
- Suttirak, W., & Manurakchinakorn, S. (2014).** In vitro antioxidant properties of mangosteen peel extract. *J Food Sci Technol*, 51(12), 3546-3558.



Biosynthesized zinc oxide nanoparticles by hydroalcoholic plant extracts for PLA/PEG biocomposites

Sittikorn Bawthong^{a,b}, Nattakorn Hongsriphan^{a,b}, Pajaeera Patanathabutr^{a,b}
^a Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University
^b Center of Excellence on Petrochemical and Material Technology, Chulalongkorn University
 *Email : Bawthong_S@su.ac.th

Introduction



Objective

This study aims to synthesize green ZnO-NPs and incorporate them into PLA/PEG blends to produce biodegradable active packaging films.

Materials and method



Table 1. Solvent extraction ratio for plant (Ethanol 95% and Water)

Hydroalcoholic extract ratio	Water (ml)
95 %Ethanol (ml)	100.00
Water (ml)	0.00
95.00	50.00
25.00	75.00
0.00	100.00

** 75:25 the best extraction

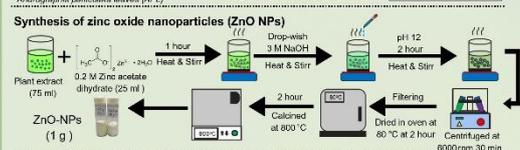


Table 2. Composition of PLA/PEG blends with ZnO-NPs

Sample	PLA(%wt)	PEG(%wt)	ZnO-NPs(%wt)
Neat PLA	100.00	-	-
PLA/PEG (96:4)	96.00	4.00	-
PLA/PEG (92:8)	92.00	8.00	-
PLA/PEG (80:20)	80.00	20.00	-
PLA/PEG1% ZnO-NPs	79.20	19.80	1.00

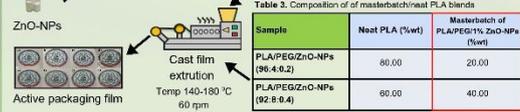


Table 3. Composition of masterbatch/neat PLA blends

Sample	Neat PLA (%wt)	Masterbatch of PLA/PEG1% ZnO-NPs (%wt)
PLA/PEG/ZnO-NPs (96:4:0.2)	80.00	20.00
PLA/PEG/ZnO-NPs (92:8:0.4)	60.00	40.00

Results and discussion

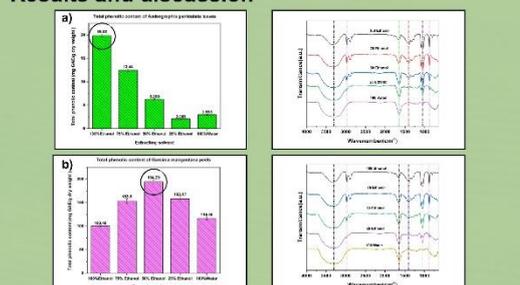
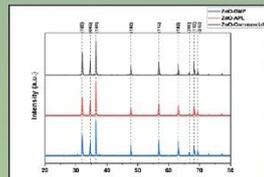


Figure 1 shows that FTIR spectra of both plants showed similar peaks, indicating shared functional groups of phenolic compounds. The peak at 1450–1600 cm⁻¹ (C=C stretching) suggests aromatic rings, while 1000–1100 cm⁻¹ (C-O stretching) reflects phenolics and ethanol. The 875 cm⁻¹ peak indicates aromatic C-H bending. Total Phenolic Content (TPC) varied with plants. *Andrographis paniculata* leaves had the highest TPC in 100% ethanol (194.29 mg GAE/g), while *Garcinia mangostana* peels had a highest TPC in 50% ethanol (19.92 mg GAE/g). However, 50% ethanol caused gel formation and filtration issues, while 100% ethanol evaporated rapidly. Therefore, 75% ethanol was selected as optimal for its high yield, easier handling.



The biosynthesized ZnO-NPs displayed peak positions similar to commercial ZnO, confirming successful crystallization. This indicates both plant extracts effectively guided ZnO formation for potential functional use.

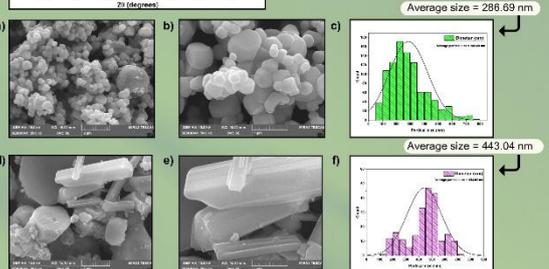
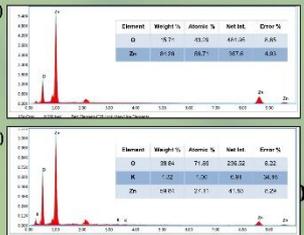
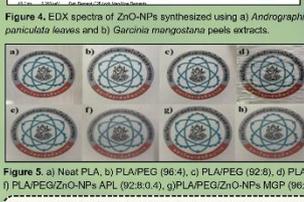


Figure 3. SEM images and particle size distribution of ZnO-NPs synthesized using *Andrographis paniculata* leaves (a–c) and *Garcinia mangostana* peels (d–f).



SEM images in Figure 3 show that ZnO-NPs from *Andrographis paniculata* leaves are spherical with minimal aggregation and a smaller average size (286.69 nm), while those from *Garcinia mangostana* peels are rod-like, more aggregated, and larger (443.04 nm). These differences are due to variations in phytochemical composition, affecting particle formation and growth.



ZnO-NPs synthesized from *Andrographis paniculata* leaves has a high Zn content (84.26%), indicating high purity and uniform crystallinity, which correlates with the formation of small, spherical particles. In contrast, ZnO-NPs from *Garcinia mangostana* peels contains lower Zn content (59.84%) and higher amounts of O. K element was found as it was from fertilizer. This structural distortion of ZnO-NPs synthesized from *Garcinia mangostana* peel showed disrupts regular crystal growth and results in irregular morphologies, such as rods or plate-like structures.

The 80:20 PLA/PEG blend (d) exhibited poor formability and surface defects, likely due to excessive PEG reducing matrix compatibility. To ease processability, PLA/PEG-ZnO-NPs masterbatch was prepared and then mixed with neat PLA at 80:20 and 60:40 ratios to achieve final compositions of 96:4:0.2 and 92:8:0.4 (e–h). Films containing ZnO-NPs synthesized from *Andrographis paniculata* leaves (e, f) appeared more opaque than those with ZnO-NPs from *Garcinia mangostana* peels (g, h). Notably, film (h) was clearer than film (f) despite both having the same PEG ratio (92:8), indicating better dispersion and morphology of ZnO-NPs derived from *Garcinia mangostana* peels. The masterbatch improved processability and enhanced the dispersion of both ZnO-NPs and PEG, resulting in greater film uniformity and improved visual quality.

Conclusions

This research successfully synthesized green zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs) through an eco-friendly process using 75 Ethanol:25 Water extracts of *Andrographis paniculata* leaves and *Garcinia mangostana* peels, with each extract's unique phytochemicals influencing the nanoparticles size, shape, and elemental composition. ZnO-NPs from *Andrographis paniculata* leaves extracts were smaller and more spherical, while those from *Garcinia mangostana* peels extracts exhibited larger, rod-like structures. These nanoparticles were incorporated into biodegradable PLA/PEG blends via a masterbatch approach, which eased film processability and improved nanoparticle dispersion of ZnO-NPs and PEG within the polymer matrix.

Acknowledgements

The authors thank the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University for research fund and Hub of Talent: Sustainable Materials for Circular Economy, National Research Council of Thailand (NRCT).

References

1. Aitaramola, F., Benjamin, G., Otuchi, O., & Fajana, S. (2016). Antimicrobial and antioxidant activities of crude methanol extract and fractions of *Andrographis paniculata* leaf (Family: Acanthaceae) (Bam). *J. Nat. Prod. Resour. J. Biol. Sci.*, 11, 23–30.
2. Cao, Y., Alijani, H. Q., Khatami, M., Bagheri-Barzavali, F., Irvani, S., & Sharifi, F. (2021). K-doped ZnO nanodiscs: biosynthesis and potential application. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 5445–5451.
3. Dasgupta, S. S., Karakandanda, Y. R., Shukla, J. B., Mukherjee, S. L., Lakshmi, V. R., Mananarapu, M., & Anonim, G. D. (2023). Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using aqueous extract of *Andrographis olata*: Characterization, optimization and assessment of their antibacterial, antioxidant, antidiabetic and anti-Alzheimer's properties. *Journal of Molecular Structure*, 1273, 134284.
4. Jaitun, T., Aichakran, T., Phangphoo, W., Thiangpratt, A., Sreewongthit, T., & Thiangpratt, N. P. (2024). Potential usage of biosynthesized zinc oxide nanoparticles from mangosteen peel ethanol extract to inhibit *Xanthomonas oryzae* and promote rice growth. *Heliyon*, 10(1), e24276.
5. Shin, H., Thirakitsamee, S., Sadeghi, K., & Seo, J. (2022). Preparation and characterization of ductile PLA/PEG blend films for eco-friendly flexible packaging application. *Food Packaging and Shelf Life*, 34, 100966.
6. Sutitjak, W., & Manurakchintorn, S. (2014). In vitro antioxidant properties of mangosteen peel extract. *J. Food Sci. Technol.*, 51(12), 3548–3558.



CERTIFICATE OF PARTICIPATION

This is to certify that

Sittikorn Bawthong

has presented a poster presentation

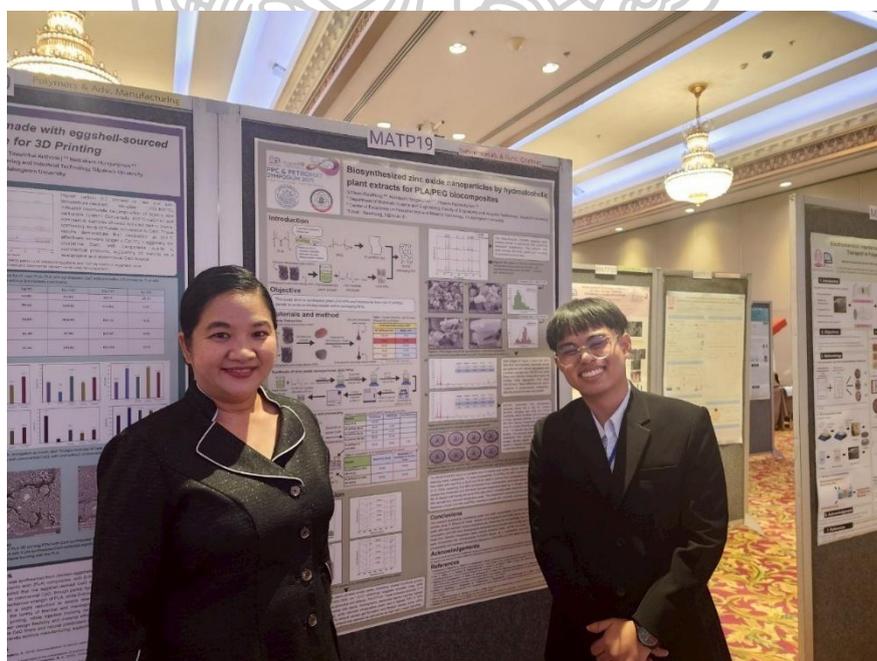
in the PPC & Petromat Symposium 2025

The 31st PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and
The 16th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology
on Thursday June 26th, 2025 at Mandarin Hotel, Bangkok

Pramoch B

Professor Pramoch Rangsunvigit
Dean

The Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายสิทธิกร บัวทอง
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี วศ.บ. คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
รางวัลที่ได้รับ	1. Certificate of participation the International Conference on The 31st PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and The 16th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology (PPC & PETROMAT Symposium 2025) to be held on June 26, 2025 at Mandarin Managed by Centre Point Hotel 2. ทุนการศึกษา ประเภททุนค่าเล่าเรียน และทุนผู้ช่วยสอนสำหรับนักศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษา สังกัดภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2566 - 2567

