



การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิ(บิวทิลีนอะดิเพท-
โค-เทอเรพทาเรท) สำหรับยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิ(บิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทอเรฟทาเรท) สำหรับยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

DEVELOPMENT OF PACKAGING FILMS FROM POLYMER BLEND BETWEEN
POLY(LACTIC ACID) AND POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) FOR
EXTENDED SHELF LIFE OF FRUITS



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

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2021

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิ(บิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทอเรพทาเรท) สำหรับยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้
โดย	ฉัตรกมล คล้ายจันทร์พงษ์
สาขาวิชา	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

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

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศรินทร์ เข้มชะปะบุตร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์มาณฑพ ปานะโปย)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เลาห์บุตรี)

61402205 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : พิล์มบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ, พอลิแลกติกแอซิด, พอลิบิวทิลีน อะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต, ไทเทเนียม ไดออกไซด์, น้ำมันหอมระเหยอบเชย

นางสาว ฉัตรกมล คล้ายจันทร์พงษ์: การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิ(บิวทิลีนอะดิเปต-โค-เทเรพทาเลต) สำหรับยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์

ในปัจจุบันบรรจุภัณฑ์พลาสติกมีอิทธิพลอย่างมากต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพในการต้านทานเชื้อจุลินทรีย์และชะลอการสุกของผลไม้เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา จากฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT โดยในตอนแรก 1 ทำการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBAT ที่เติม DCP ปริมาณต่าง ๆ พบว่าสามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ของ PLA และ PBAT ได้ โดยส่งผลให้ Young's modulus และ Elongation at break มีค่าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเติม DCP มากเกิน 0.03 phr พบว่าค่า elongation at break ของฟิล์มลดลงเป็นอย่างมาก เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวอาจมีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่มากขึ้น จึงเลือกปริมาณการเติม DCP 0.03 phr สำหรับการทดลองในตอนต่อไป สำหรับในตอนแรก 2 ทำการเตรียมฟิล์ม PLA/PBAT/D03/Ty โดยเติม TiO_2 ปริมาณต่าง ๆ พบว่า Young's modulus และ elongation at break มีค่าสูงสุดเมื่อเติม TiO_2 1 phr และสมบัติเชิงกลของฟิล์มมีค่าลดลงเมื่อเติมเกิน 1 phr เนื่องจากอาจมีการรวมตัวของอนุภาค TiO_2 นอกจากนี้ที่เวลาการฉายรังสียูวีเอ 3 ชั่วโมง ยังส่งผลให้ฟิล์มมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และดูดซับแก๊สเอทิลีนได้ดีที่สุด ดังนั้น TiO_2 1 phr และฉายรังสียูวีเอ 3 ชั่วโมง จึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่เลือกสำหรับการทดลองในตอนต่อไป สำหรับในตอนแรก 3 ทำการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03/Oz โดยเติมน้ำมันหอมระเหยปริมาณต่าง ๆ พบว่า Young's modulus และ Tensile strength มีค่าเพิ่มมากขึ้น ที่ปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย 2.5 – 5 phr เนื่องจาก Synergistic effect ระหว่างการเป็น Plasticizer ของน้ำมันหอมระเหยอบเชยและปริมาณผลึก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยเกิน 5 phr พบว่าค่า Young's modulus และ Tensile strength มีค่าลดลง นอกจากนี้ฟิล์มยังมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้มากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยที่เหมาะสมคือ 5 phr และในการทดลองในตอนแรก 4 ทำการเตรียม PLA/PBAT/D03/T1/O5 พบว่าการเติม TiO_2 ร่วมกับน้ำมันหอมระเหยอบเชย ส่งผลให้สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนของฟิล์มมีค่าอยู่ระหว่าง PLA/PBAT/D03/T1 และ PLA/PBAT/D03/O5 นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และดูดซับแก๊สเอทิลีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

61402205 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : Active packaging film, Poly(lactic acid), Poly(butylene adipate-co-terephthalate), Titanium dioxide, cinnamon essential oil

MISS CHATKAMOL KLAYCHANPONG : DEVELOPMENT OF PACKAGING FILMS FROM POLYMER BLEND BETWEEN POLY(LACTIC ACID) AND POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) FOR EXTENDED SHELF LIFE OF FRUITS THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR NATTAWUT CHAIYUT, Ph.D.

At present, the packaging is widely used in the food and postharvest industries, but spoilage and pathogenic microorganism are concerned because they cause postharvest losses and quality deterioration of fresh products. The objective of this research was to prepare active packaging film from polymer blends between PLA and PBAT. In part 1, the PLA/PBAT blend films with different DCP contents showed a compatibility improvement between the polymers. Young's modulus and elongation at break were also improved after adding DCP. However, the elongation at break decreased when the content of DCP was beyond 0.03 phr. According to the compatibility of polymer blend and mechanical property aspects, DCP at 0.03 phr was picked as a suitable content for further studies. In part 2, PLA/PBAT/D03/TiO₂ composite films were prepared with different TiO₂ contents. With increasing TiO₂ content, the composite films exhibited increasing in Young's modulus and elongation at break until they reached the maximum values at TiO₂ content of 1 phr. Adding excess TiO₂ results in a decrement of Young's modulus and elongation at break because there is an agglomeration of TiO₂ generating stress concentration. Furthermore, the composite films exhibited higher antimicrobial activity and ethylene scavenging when the films contained more TiO₂ content and prolonged UV exposure. Therefore, according to the film performances, the appropriate TiO₂ content and UV exposure time were chosen at 1 phr and 3 hr, respectively, for studying in part 4. In part 3, the prepared PLA/PBAT/D03/CEO blend films with different cinnamon essential oil (CEO) exhibited improvement in Young's modulus and tensile strength when CEO content increased from 0-5 phr since synergistic effect between plasticizer of CEO and crystallinity of the polymers. However, Young's modulus and elongation at break decreased when the CEO content exceeded 5 phr due to the CEO-dominated plasticization effect led to a large amount of the polymer chains slippage. These films satisfactorily performed antimicrobial activities together with increasing CEO content. From part 3 results, the appropriate CEO was selected at 5 phr. In part 4, PLA/PBAT/D03/T1/O5 composite films were prepared. They showed mechanical and thermal properties between PLA/PBAT/D03/T1 composite film (part 2) and PLA/PBAT/D03/O5 blend film (part 3). The PLA/PBAT/D03/T1/O5 composites film enhanced the antimicrobial efficiency against Gram-positive, Gram-negative bacteria and fungi as well as slowed down fruit ripening. Therefore, the films could be used as biodegradable packaging for fruits.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้เป็นอย่างดี ด้วยความกรุณาจากคณาจารย์หลายท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือและกำลังใจ พร้อมทั้งการสนับสนุนที่ได้จากบุคคลรอบข้าง ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภูมิ ชัยยุตต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศรินทร์ เหมชะปะบุตร และรองศาสตราจารย์ ดร. มาณพ ปานะโปย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำงานวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ไขปัญหาระหว่างการดำเนินงานวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศรินทร์ เหมชะปะบุตร รองศาสตราจารย์ ดร. มาณพ ปานะโปย และรองศาสตราจารย์ ดร.อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี ที่ได้คำปรึกษา เสนอแนวคิด และช่วยตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งวิทยานิพนธ์สำเร็จ

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่คอยอบรมสั่งสอน วิชาความรู้ทั้งปวง และขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้โอกาสในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งการสนับสนุนด้านสถานที่อุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ ขอขอบคุณคุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาสำหรับการอำนวยความสะดวกทางด้านการจัดหาวัสดุอุปกรณ์และสารเคมี ขอขอบคุณคุณไพโรจน์ ตั้งสุขธวัช วิศวกรประจำภาควิชา ให้ความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือและเครื่องจักร ขอขอบคุณคุณทิพาภรณ์ ทรัพย์สมบูรณ์ นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ ที่คอยให้ความรู้คำแนะนำ และคอยให้ความช่วยเหลือในการทดสอบการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย และขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชา สำหรับการอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานทุก ๆ ด้าน จนกระทั่งงานวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

และขอบคุณเพื่อน พี่ และน้อง นักศึกษาภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกคน ให้ความห่วงใย ความมีน้ำใจ และความช่วยเหลือตลอดมา สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัวที่คอยสนับสนุนด้านการเรียน คอยให้กำลังใจเสมอมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาว ฉัตรกมล คล้ายจันทร์พงษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ (Introduction).....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา (Statements and significance of the problems).....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย (Objective of research).....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย (Hypothesis to be tested).....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย (Scope or delimitation of the study).....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย (Methodology).....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Review of related literature).....	5
2.1 บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (active packaging).....	5
2.1.1 สารดูดซับออกซิเจน (oxygen absorber).....	5
2.1.2 สารดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide absorber).....	6
2.1.3 สารดูดซับความชื้น (moisture absorber).....	6
2.1.4 สารดูดซับแก๊สเอทิลีน (ethylene absorber).....	7
2.1.4.1 Climacteric fruit.....	7

2.1.4.2 Non-climacteric fruit	9
2.2 ตัวอย่างผลไม้ประเภท Climacteric fruit และโรคที่เกิดหลังจากเก็บเกี่ยว	11
2.2.1 โรคมะม่วงหลังจากเก็บเกี่ยว	11
2.2.1.1 โรค Anthracnose.....	11
2.2.1.2 โรค Stem end rot.....	13
2.2.1.3 โรค Phomopsis rot.....	14
2.3 พลาสติกชีวภาพ (Bioplastics).....	14
2.3.1 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA)	14
2.3.2 พอลิ(บิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทอแรพทาเรท) (PBAT).....	15
2.4 ไดคิลมิล เปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide; DCP)	16
2.5 อบเชย (cinnamon).....	17
2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของอบเชย.....	17
2.5.2 กลไกการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของน้ำมันหอมระเหย.....	18
2.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide).....	19
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	30
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	30
3.2 เครื่องมือที่ใช้ดำเนินงานวิจัย.....	30
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	49
<u>ตอนที่ 1</u> ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่ปริมาณ DCP ต่าง ๆ	50
1. การศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR).....	50
2. การศึกษาดัชนีการไหล (melt flow index; MFI).....	53

3. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)	53
4. การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)	56
5. การศึกษาสมบัติเชิงกล	62
ตอนที่ 2 ศึกษาสมบัติของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO ₂ ในปริมาณต่างๆ	65
1. การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)	65
2. การศึกษาความสามารถในการดูดกลืนแสงและความทึบแสงของฟิล์มคอมพอสิตจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy	66
3. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM	71
4. การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC	76
5. การศึกษาสมบัติเชิงกล	79
6. การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย	81
7. การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและความสามารถในการดูดซับแก๊สเอทิลีน	85
8. การศึกษาผลของเวลาในการฉายรังสียูวีเอที่มีต่อสมบัติทางแสงและการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิตที่ปริมาณ 1 2 และ 3 ชั่วโมง	93
8.1 การศึกษาค่าสีด้วยระบบ CIELAB	93
8.2 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA	94
ตอนที่ 3 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยในปริมาณต่างๆ	98
1. การศึกษาสมบัติทางแสงและค่าสีจากระบบ CIELAB ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่างๆ	98
2. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM	100
3. การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC	102
4. การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA	105

5. การศึกษาสมบัติเชิงกล	108
6. การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย	110
7. การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา.....	112
ตอนที่ 4 ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO ₂ ร่วมกับน้ำมันหอมระเหย อบเชย	114
1. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)	114
2. การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)	116
3. การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA.....	119
4. การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม	120
5. การศึกษาอัตราการซึมของผ่านแก๊สออกซิเจน (Oxygen permeability; OP) และอัตรา การซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate; WVTR)	122
6. การศึกษาสมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และความสามารถในการดูดซับ แก๊สเอทิลีน	124
7. การศึกษาความสามารถในการทนทานต่อสภาพแวดล้อมโดยการเร่งสภาวะและค่าจากการ วัดสีด้วยระบบ CIELAB	128
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	134
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	134
5.2 ข้อเสนอแนะ	136
ภาคผนวก ก. ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ.....	137
ภาคผนวก ก-1 สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT เมื่อมีการเติม DCP ปริมาณต่างๆ... 137	
ภาคผนวก ก-2 สมบัติของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT เมื่อมีการเติม TiO ₂ ปริมาณต่าง ๆ..... 141	
ภาคผนวก ก-3 สมบัติของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT เมื่อมีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย ปริมาณต่างๆ.....	153

ภาคผนวก ก-4 สมบัติของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT เมื่อมีการเติม TiO₂ 1 phr และน้ำมันหอมระเหยอบเชย 5 phr..... 160

ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณ..... 165

ภาคผนวก ค. การนำเสนอผลงานวิจัย 168

รายการอ้างอิง 181

ประวัติผู้เขียน..... 191



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 บรรจุภัณฑ์แอคทีฟต่างๆที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร [7]	5
ตารางที่ 2-2 ตัวอย่างผลไม้ประเภท Climacteric และ Non-climacteric [10].....	10
ตารางที่ 2-3 ความแตกต่างของการสร้างแก๊สเอทิลีนและการตอบสนองต่อการได้รับแก๊สเอทิลีน ระหว่างผลไม้ประเภท Climacteric และ Non-climacteric [10]	10
ตารางที่ 2-4 การจัดกลุ่มของผลไม้ตามอัตราการผลิตก๊าซเอทิลีน [3].....	11
ตารางที่ 2-5 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันอบเชย [3]	17
ตารางที่ 2-6 Crystalline และ Melting behavior ของ XLPE และ PE gel [30]	23
ตารางที่ 2-7 Minimum Inhibitory Concentration (MIC) ของน้ำมันหอมระเหยแต่ละชนิด [31]	24
ตารางที่ 2-8 ความหนาและสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PLA ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย 25 และ 50%w/w เทียบกับพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG [32].....	24
ตารางที่ 2-9 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PLA/PEG เมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย 25 และ 50%wt [32]	25
ตารางที่ 2-10 ผลการทดสอบ Antifungal ของ CEO nanoemulsions และ Pure essential oil โดยใช้วิธี Disc diffusion method ของเชื้อ A. niger, R. arrhizus, Penicillium sp., and C. Gloeosporioides [4]	26
ตารางที่ 3-1 ซึ่ย่อและสัดส่วนการเติม DCP	36
ตารางที่ 3-2 ซึ่ย่อและสัดส่วนการเติม TiO ₂	37
ตารางที่ 3-3 ซึ่ย่อและสัดส่วนการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย (CEO).....	39
ตารางที่ 3-4 Dilution factor ของแต่ละหลอดทดลอง	47
ตารางที่ 4-1 ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ปริมาณต่าง ๆ.....	53
ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่ มีการเติม DCP ปริมาณต่าง ๆ.....	58

ตารางที่ 4-3 สมบัติการดึงยึดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม DCP ปริมาณต่าง ๆ.....	63
ตารางที่ 4-4 ค่าการดูดกลืนรังสีในช่วง UV-Vis ค่าความทึบแสง ความยาวคลื่นที่จุดเริ่มต้นของขอบการดูดกลืนรังสียูวีและค่าแถบพลังงานของฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติม TiO ₂ ที่ปริมาณต่างๆ	69
ตารางที่ 4-5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติม TiO ₂ ปริมาณต่างๆ	77
ตารางที่ 4-6 สมบัติการดึงยึดของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO ₂ ปริมาณต่างๆ.....	79
ตารางที่ 4-7 การเกิดเชื้อราบนผลสตรอว์เบอร์รี่ที่ไม่มีการเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิต โดยทำการวางไว้ในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส	85
ตารางที่ 4-8 การเกิดเชื้อราบนผลสตรอว์เบอร์รี่ที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก โดยไม่มีการฉายรังสียูวีเอ โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส	86
ตารางที่ 4-9 การเกิดเชื้อราบนผลสตรอว์เบอร์รี่ที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก และได้รับการฉายรังสียูวีเอ 1 ชั่วโมง โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส.....	86
ตารางที่ 4-10 การเกิดเชื้อราบนผลสตรอว์เบอร์รี่ที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก และได้รับการฉายรังสียูวีเอ 2 ชั่วโมง โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส	87
ตารางที่ 4-11 การเกิดเชื้อราบนผลสตรอว์เบอร์รี่ที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก และได้รับการฉายรังสียูวีเอ 3 ชั่วโมง โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส	87
ตารางที่ 4-12 ลักษณะปรากฏของกล้วยที่ไม่มีการเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิต โดยทำการวางไว้ในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส	89
ตารางที่ 4-13 ลักษณะปรากฏของกล้วยที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก และไม่ได้รับการฉายรังสียูวีเอ โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส ...	89
ตารางที่ 4-14 ลักษณะปรากฏของกล้วยที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก และได้รับการฉายรังสียูวีเอ 1 ชั่วโมง โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส.....	90

ตารางที่ 4-15 ลักษณะปรากฏของกล้วยที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก และได้รับการฉายรังสียูวีเอ 2 ชั่วโมง โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส.....	91
ตารางที่ 4-16 ลักษณะปรากฏของกล้วยที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก และได้รับการฉายรังสียูวีเอ 3 ชั่วโมง โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส.....	92
ตารางที่ 4-17 อุณหภูมิการสลายตัว (T_d) ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ ที่ผ่านการฉายรังสียูวี 0 และ 3 ชั่วโมง จากเทคนิค TGA.....	94
ตารางที่ 4-18 ค่าการดูดกลืนรังสีในช่วง UV-Vis และค่าความทึบแสงของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยที่ปริมาณต่างๆ.....	100
ตารางที่ 4-19 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม CEO ปริมาณต่างๆ จากเทคนิค DSC.....	103
ตารางที่ 4-20 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติม CEO ปริมาณต่างๆ จากเทคนิค TGA.....	106
ตารางที่ 4-21 ปริมาณการสูญเสียน้ำมันหอมระเหยอบเชยในระหว่างกระบวนการหลอมขึ้นรูปจากเทคนิค TGA.....	106
ตารางที่ 4-22 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย ปริมาณต่างๆ.....	108
ตารางที่ 4-23 การเกิดเชื้อราบนผลสตอร์เบอร์รี่ที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส.....	112
ตารางที่ 4-24 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT สูตรต่างๆ จากเทคนิค DSC.....	117
ตารางที่ 4-25 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT สูตรต่างๆ จากเทคนิค TGA.....	119
ตารางที่ 4-26 สมบัติการดึงยึดของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT สูตรต่างๆ.....	120
ตารางที่ 4-27 อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Oxygen permeability; OP) ของฟิล์มคอมพอสิตสูตรต่างๆ.....	122

ตารางที่ 4-28 การเกิดเชื้อราบนผลสตรอว์เบอร์รี่ที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก โดย
 ทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส..... 127

ตารางที่ 4-29 ลักษณะปรากฏของกล้วยที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก และได้รับ
 การฉายรังสียูวีเอเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25
 องศาเซลเซียส 127

ตารางที่ 4-30 ฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT สูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการเร่งสภาวะที่ระยะเวลาต่าง ๆ 129



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2-1 Oxygen scavenger ที่ผสมในขวด PET [8].....	6
รูปที่ 2-2 ตัวอย่างสินค้าที่ต้องการควบคุมความชื้น [6].....	7
รูปที่ 2-3 การสร้างสารประกอบจากการหายใจ [9].....	8
รูปที่ 2-4 รูปแบบการหายใจ (เส้นทึบ) แบบ Climacteric และ Non-Climacteric , การตอบสนองต่อการใช้แก๊สเอทิลีน (เส้นประ) [10]	9
รูปที่ 2-5 การหายใจ (กราฟด้านบน) และการสร้างเอทิลีน (กราฟด้านล่าง) ของผลไม้ประเภท Climacteric และ Non-climacteric [10].....	10
รูปที่ 2-6 เชื้อรา Colletotrichum gloeosporioides สาเหตุของการเกิดโรค Anthracnose ในมะม่วง [13].....	12
รูปที่ 2-7 ลักษณะของเชื้อ Colletotrichum sp. [11].....	12
รูปที่ 2-8 โรค Anthracnose ในมะม่วงก่อนการเก็บเกี่ยว [13].....	12
รูปที่ 2-9 โรค Anthracnose ในมะม่วงหลังการเก็บเกี่ยว [13].....	13
รูปที่ 2-10 ลักษณะของเชื้อ Lasiodiplodia sp. [11].....	13
รูปที่ 2-11 โรค Stem end rot ในมะม่วงหลังการเก็บเกี่ยว [14].....	13
รูปที่ 2-12 ลักษณะของเชื้อ Phomopsis sp. [11].....	14
รูปที่ 2-13 โครงสร้างของ PLA [16].....	14
รูปที่ 2-14 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PLA [17].....	15
รูปที่ 2-15 โครงสร้างของ PBAT [18]	15
รูปที่ 2-16 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PBAT [18].....	16
รูปที่ 2-17 โครงสร้างทางเคมีของ Dicumyl peroxide [20]	16
รูปที่ 2-18 ต้นอบเชย [22]	17
รูปที่ 2-19 องค์ประกอบหลักของน้ำมันหอมระเหยอบเชย [23].....	18

รูปที่ 2-20	ผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ [25]	19
รูปที่ 2-21	รูปแบบผลึกของ Titanium dioxide [26].....	19
รูปที่ 2-22	กลไกการเกิดปฏิกิริยา Ethylene photocatalytic บน TiO ₂ nanoparticles [27].....	20
รูปที่ 2-23	ภาพถ่ายภาคตัดขวาง (cryo-fracture surface) ของ PLA/PBAT (80/20) ที่มีการเติม DCP (a) 0, (b) 0.1 และ (c) 0.5 wt% ลูกศรสีแดงแสดง PBAT domain [29]	22
รูปที่ 2-24	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT (80/20) และ PLA ที่มีการเติม DCP ปริมาณต่างๆ (a) Tensile strength และ (b) Elongation at break [29]	22
รูปที่ 2-25	Tensile strength (σ_b) และ Strain at break (ϵ_b) เมื่อเติม DCP ปริมาณต่างๆ [30].	23
รูปที่ 2-26	ความสามารถในการต้านทานเชื้อของฟิล์ม PLA/PEG ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย 25 และ 50%w/w, PLA (a) <i>L. monocytogenes</i> และ (b) <i>S. typhimurium</i> หลังจากบ่มที่อุณหภูมิห้อง 1 และ 7 วัน [32].....	25
รูปที่ 2-27	การเติบโตของ <i>L. monocytogenes</i> และ <i>S. typhimurium</i> ในเนื้อไก่เมื่อห่อด้วยฟิล์ม PLA/PEG และ PLA/PEG/505 CIN โดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 16 วัน [32]	26
รูปที่ 2-28	(a) Tensile strength, (b) Elongation at break, (c) Optical transmittance และ (d) Water vapor permeability ของฟิล์ม Chitosan (CS) และ Chitosan-TiO ₂ (CT) ที่เติม TiO ₂ ปริมาณ 0.25 0.5 1 และ 2%wtTiO ₂ (CT0.25 CT0.5 CT1 และ CT2 ตามลำดับ) [33].....	27
รูปที่ 2-29	Ethylene photocatalytic degradation ของ Chitosan (CS) และ Chitosan-TiO ₂ (CT) nanocomposite film ที่มีการเติม TiO ₂ ปริมาณ 0.25 0.5 1 และ 2%wt (CT0.25 CT0.5 CT1 และ CT2 ตามลำดับ) [33].....	28
รูปที่ 2-30	ความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ (growth inhibition) ของฟิล์ม CT1 และ CS ที่มีการฉายและไม่ฉายรังสียูวีต่อเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (<i>S. aureus</i>), แบคทีเรียแกรมลบ (<i>E. coli</i> , <i>S. Typhimurium</i> , <i>P. aeruginosa</i>) และเชื้อรา (<i>Aspergillus</i> และ <i>Penicillium</i>) [33].....	28
รูปที่ 3-1	เครื่องหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์มที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มสูตรต่างๆ [34].....	31
รูปที่ 3-2	เครื่อง Universal testing machine สำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม [35].....	31
รูปที่ 3-3	เครื่อง Differential Scanning Calorimeter [36]	31
รูปที่ 3-4	เครื่อง Thermogravimetric Analyzer [37]	32

รูปที่ 3-5 เครื่อง Oxygen Permeability Tester [38].....	32
รูปที่ 3-6 เครื่อง Accelerated Weathering [39].....	32
รูปที่ 3-7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [40]	33
รูปที่ 3-8 เครื่อง UV-Visible spectroscopy [41]	33
รูปที่ 3-9 เครื่อง X-ray diffractometer.....	33
รูปที่ 3-10 เครื่องวัดค่าดัชนีการไหล.....	34
รูปที่ 3-11 เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง.....	34
รูปที่ 3-12 เครื่องฉายรังสียูวี	34
รูปที่ 3-13 เครื่อง Laminar flow cabinet [42]	35
รูปที่ 3-14 เครื่องฆ่าเชื้อ [43].....	35
รูปที่ 3-15 เครื่องบ่มเชื้อ [44].....	35
รูปที่ 3-16 เครื่องเขย่าสาร.....	36
รูปที่ 3-17 Masterbatch จากวิธี Solvent casting.....	38
รูปที่ 3-18 การเทียบความขุ่นของสารละลายเชื้อแบคทีเรีย (หลอดด้านซ้าย) กับสารมาตรฐาน McFARLAND SCALE ลำดับที่ 1 (หลอดด้านขวา).....	46
รูปที่ 3-19 การทดสอบความสามารถในการดูดซับแก๊สเอธิลีน.....	48
รูปที่ 3-20 การทดสอบความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา.....	48
รูปที่ 4-1 FTIR spectra ของ PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ปริมาณต่าง ๆ.....	50
รูปที่ 4-2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง PLA radical และ PBAT radical โดยมี DCP เป็น Free- radical initiator [48].....	51
รูปที่ 4-3 กลไกการเกิดการขาดออกของสายโซ่ของ PLA และ PBAT เมื่อทำปฏิกิริยากับ DCP [48]	52
รูปที่ 4-4 ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ปริมาณต่างๆ.....	53

รูปที่ 4-5 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง (cross section) ที่ได้จากเทคนิค SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ในปริมาณ (a) 0, (b) 0.03, (c) 0.06 และ (d) 0.1 phr ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า..... 54

รูปที่ 4-6 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง (cross section) ที่ได้จากเทคนิค SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ในปริมาณ (a) 0, (b) 0.03, (c) 0.06 และ (d) 0.1 phr ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า..... 55

รูปที่ 4-7 DSC Thermograms ในขั้นตอนการทำให้เย็นตัวของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ปริมาณต่าง ๆ..... 56

รูปที่ 4-8 DSC Thermograms ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ปริมาณต่าง ๆ 57

รูปที่ 4-9 ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของ PLA และ PBAT [47]..... 62

รูปที่ 4-10 สมบัติเชิงกล (a) Young's modulus, (b) Tensile strength, (c) Elongation at break ของฟิล์ม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ปริมาณต่าง ๆ 63

รูปที่ 4-11 XRD patterns ของ (a) ผง TiO_2 และ (b) ฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ..... 65

รูปที่ 4-12 ผลการทดสอบฟิล์มที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrometer (a) การดูดกลืนรังสีในช่วง UV-Vis ของผง TiO_2 , (b) การดูดกลืนรังสีในช่วง UV-Vis ของฟิล์มคอมพอสิต และ (c) ความทึบแสงของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ.... 67

รูปที่ 4-13 ความทึบแสงของฟิล์มคอมพอสิตต่อการมองเห็นเมื่อเติม TiO_2 (a) 0, (b) 0.25, (c) 0.5, (d) 1 และ (e) 2 phr..... 69

รูปที่ 4-14 ค่าสีจากการวัดด้วยระบบ CIELAB ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ (a) L (lightness), (b) a (redness, greenness) และ (c) b (yellowness, blueness)..... 70

รูปที่ 4-15 ภาพถ่ายที่ได้จากเทคนิค SEM ของผง TiO_2 nanoparticle ที่กำลังขยาย 300,000 เท่า71

รูปที่ 4-16 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง (cross section) ที่ได้จากเทคนิค SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (a) PLA/PBAT และฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณ (b) 0.25, (c) 0.5, (d) 1 และ (e) 2 phr ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า..... 72

รูปที่ 4-17 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง (cross section) ที่ได้จากเทคนิค SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (a) PLA/PBAT และฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO₂ ในปริมาณ (b) 0.25, (c) 0.5, (d) 1 และ (e) 2 phr ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า..... 73

รูปที่ 4-18 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง (cross section) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการนับ (count) และ X-ray energy (eV) จากเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO₂ ในปริมาณ (a) 0.25, (b) 0.5, (c) 1 และ (d) 2 phr..... 74

รูปที่ 4-19 DSC Thermograms ในขั้นตอนการทำให้เย็นตัวของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO₂ ปริมาณต่างๆ..... 76

รูปที่ 4-20 DSC Thermograms ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO₂ ปริมาณต่างๆ 76

รูปที่ 4-21 สมบัติเชิงกล (a) Young’s modulus, (b) Tensile strength และ (c) Elongation at break ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO₂ ที่ปริมาณต่างๆ..... 80

รูปที่ 4-22 จำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียที่นับได้ต่อมิลลิเมตร (CFU/ml) ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO₂ ปริมาณต่างๆ ที่ได้รับการฉายรังสียูวีเอที่เวลาแตกต่างกัน โดยทำการทดสอบกับเชื้อแบคทีเรีย (a) E.coli (b) S.aureus..... 82

รูปที่ 4-23 เปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรีย (a) E.coli และ (b) S.aureus ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO₂ ปริมาณต่างๆ ที่ได้รับการฉายรังสียูวีเอที่เวลาแตกต่างกัน 82

รูปที่ 4-24 แผนภาพกลไกการเกิด Photocatalytic degradation ของ Ethylene และ Antimicrobial activity ของ PLA/PBAT/TiO₂ nanocomposite [33]..... 84

รูปที่ 4-25 ค่าสีจากการวัดด้วยระบบ CIELAB ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO₂ ปริมาณ 0 0.25 0.5 1 และ 2 phr หลังจากการฉายรังสียูวีเอที่เวลาต่างๆ (a) L (lightness), (b) a (redness, greenness) และ (c) b (yellowness, blueness)..... 93

รูปที่ 4-26 TGA thermograms ของฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติม TiO₂ ปริมาณ (a, b) 0, (c, d) 0.25, (e, f) 0.5 (g, h) 1 และ (i, j) 2 phr สำหรับฟิล์มที่ผ่านการฉายรังสียูวีเอ 0 และ 3 ชั่วโมง..... 95

รูปที่ 4-27 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมต่อการมองเห็นเมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย (a) 0, (b) 2.5, (c) 5, (d) 7.5 และ (e) 10 phr 98

รูปที่ 4-28 ค่าสีจากการวัดด้วยระบบ CIELAB ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่างๆ (a) L (lightness), (b) a (redness, greenness) และ (c) b (yellowness, blueness)	99
รูปที่ 4-29 ผลการทดสอบฟิล์มที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่างๆ ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrometer (a) การดูดกลืนรังสีในช่วง UV-Vis และ (b) ความทึบแสง	100
รูปที่ 4-30 ภาพถ่ายภาพตัดขวาง (cross section) ที่ได้จากเทคนิค SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยในปริมาณ (a) 0, (b) 2.5, (c) 5, (d) 7.5 และ (e) 10 phr ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	101
รูปที่ 4-31 DSC Thermograms ในขั้นตอนการทำให้เย็นตัวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่าง ๆ.....	102
รูปที่ 4-32 DSC Thermograms ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่าง ๆ.....	102
รูปที่ 4-33 TGA thermograms ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 เมื่อมีการเติมน้ำมันหอมระเหยปริมาณต่างๆ (a) TGA และ (b) DTG.....	105
รูปที่ 4-34 สมบัติเชิงกล (a) Young's modulus, (b) Tensile strength และ (c) Elongation at break ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่าง ๆ	108
รูปที่ 4-35 จำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียที่นับได้ต่อมิลลิเมตร (CFU/ml) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยปริมาณต่างๆ โดยทำการทดสอบกับเชื้อแบคทีเรีย (a) E.coli (b) S.aureus	110
รูปที่ 4-36 เปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรีย E.coli และ S.aureus ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่าง ๆ.....	111
รูปที่ 4-37 ภาพถ่ายภาพตัดขวาง (cross section) ที่ได้จากเทคนิค SEM ของฟิล์มคอมพอสิต (a) PLA/PBAT/D03 (b) PLA/PBAT/D03/T1 (c) PLA/PBAT/D03/O5 และ (d) PLA/PBAT/D03/T1/O5 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	115
รูปที่ 4-38 DSC Thermograms ในขั้นตอนการทำให้เย็นตัว ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติม TiO ₂ 1 phr และน้ำมันหอมระเหยอบเชย 5 phr.....	116

รูปที่ 4-39 DSC Thermograms ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติม TiO ₂ 1 phr และน้ำมันหอมระเหยอบเชย 5 phr	116
รูปที่ 4-40 TGA thermograms ของฟิล์มคอมพอสิตสูตรต่าง ๆ (a) TGA และ (b) DTG.....	119
รูปที่ 4-41 สมบัติเชิงกล (a) Young's modulus, (b) Tensile strength และ (c) Elongation at break ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT สูตรต่างๆ	121
รูปที่ 4-42 จำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียที่นับได้ต่อมิลลิเมตร (CFU/ml) ของฟิล์มคอมพอสิตสูตรต่างๆ โดยทำการทดสอบกับเชื้อแบคทีเรีย (a) E. coli (b) S. aureus.....	124
รูปที่ 4-43 เปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรีย E.coli และ S.aureus ของฟิล์มคอมพอสิตสูตรต่างๆ	125
รูปที่ 4-44 ค่าสีจากการวัดด้วยระบบ CIELAB ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT สูตรต่างๆ (a) L (lightness), (b) a (redness, greenness) และ (c) b (yellowness, blueness).....	128
รูปที่ 4-45 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM ของ (a) PLA/PBAT/D03 (b) PLA/PBAT/D03/T1 (c) PLA/PBAT/D03/O5 และ (d) PLA/PBAT/D03/T1/O5 โดย 0 คือ cycle 0, 1 คือ cycle 1, 2 คือ cycle 2, 3 คือ cycle 3, 4 คือ cycle 4 และ 5 คือ cycle 5.....	130
รูปที่ 4-46 โครงสร้างทางเคมีของ PBAT และ PLA.....	131
รูปที่ 4-47 Photodegradation mechanism ของ PLA ระหว่างกระบวนการ Weathering [87]	132
รูปที่ 4-48 Photodegradation mechanism ของ PBAT ระหว่างกระบวนการ Weathering [87]	132
รูปที่ 4-49 Hydrolysis reaction ของ PBAT และ PLA ระหว่างกระบวนการ Weathering [87]	133

บทที่ 1 บทนำ (Introduction)

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา (Statements and significance of the problems)

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์พลาสติกมีบทบาทต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก เช่น บรรจุภัณฑ์อาหาร ซึ่งทำหน้าที่ในการป้องกันอาหารจากสิ่งสกปรกภายนอก โดยในอดีตบรรจุภัณฑ์อาหารนิยมทำมาจากพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียม ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น พอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) โพลีเอทิลีน (Polyethylene; PE) และโพลีพรอพิลีน (Polypropylene; PP) เป็นต้น แต่จากในอดีตจนถึงปัจจุบันการใช้บรรจุภัณฑ์โดยรวมของผู้บริโภคมีอัตราการเติบโตสูงขึ้น อีกทั้งยังเกิดภาวะราคาน้ำมันผันผวนและปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมอีกด้วย จึงทำให้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (bioplastic) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) [1] เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยการบวนการที่หลากหลายและสามารถย่อยสลายด้วยการฝังกลบในระยะเวลาอันสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ผลิตจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี แต่พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA) มีข้อเสียคือ มีความเปราะสูง ทนทานต่อแรงกระแทกต่ำ และไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคล้ายแก้วได้ จึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติดังกล่าวเพื่อให้สามารถนำพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) ไปใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น ซึ่งสามารถปรับปรุงได้โดยการเติมพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง เช่น พอลิ(บิวทิลีน อะดิเพท-โค-เทอเรฟทาเรท) (Poly(butylene adipate-co-terephthalate); PBAT) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์บนสายโซ่หลัก มีความแข็งแรง ขึ้นรูปได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นสูง จึงส่งเสริมให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBAT มีความสามารถในการรับแรงกระแทกมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม PLA [2]

ในปัจจุบันบรรจุภัณฑ์รูปแบบใหม่มุ่งเน้นความสะดวกสบายต่อผู้บริโภค ซึ่งแตกต่างไปจากบรรจุภัณฑ์แบบดั้งเดิมที่ทำหน้าที่เพียงบรรจุสินค้าและให้ความสวยงาม แต่บรรจุภัณฑ์อัจฉริยะได้นำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่มาควบคุมหรือปกป้องผสมผสานกับบรรจุภัณฑ์เพื่อยืดอายุผลไม้หรืออาหารในบรรจุภัณฑ์ให้สามารถเก็บไว้ได้นานยิ่งขึ้น โดยการใช้สารประกอบเป็นตัวควบคุมบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ด้วยวิธีการสกัดกั้นหรือการแพร่ของก๊าซต่าง ๆ ซึ่งสารประกอบดังกล่าวในบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (active packaging) จะต้องมีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค โดยลดความเสี่ยงต่อการเน่าเสียของอาหารหรือจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค จึงสามารถยืดอายุการเก็บรักษาอาหารได้ ซึ่งในการใช้สารต้าน

เชื้อจุลินทรีย์ (antimicrobial agent) ออกมาควบคุมอาหารนั้น จะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยต่อผู้บริโภค เนื่องจากสารต้านเชื้อจุลินทรีย์ (antimicrobial agent) นั้นจะต้องเข้าไปในอาหาร ซึ่งมีการวิจัยหลายงานพบว่าน้ำมันหอมระเหยมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค เช่น *Staphylococcus aureus* และ *Escherichia coli* [3] ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่พบในอาหาร อีกทั้งยังสามารถยับยั้งการเติบโตของเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* [4] ซึ่งเป็นเชื้อราที่ก่อให้เกิดโรคแอนแทรกนอส (anthracnose) ในผลไม้หลายชนิดและทำให้ผลไม้เน่าในที่สุด นอกจากนี้ปัจจัยที่ทำให้ผลไม้เน่าเสียได้เร็วอีกปัจจัยหนึ่ง คือ อัตราการผลิตก๊าซเอทิลีน ซึ่งสามารถลดปริมาณก๊าซเอทิลีนภายในบรรจุภัณฑ์ได้โดยใช้สารดูดซับเอทิลีน เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide; TiO_2) เพื่อชะลอการสุกและยืดระยะเวลาการวางจำหน่าย [5]

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์ผลไม้จากพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ผสมกับพอลิ(บิวทิลีน อะดิเพท-โค-เทอเรพทาเรท) (PBAT) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยฟิล์มบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวมีการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide; TiO_2) ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับแก๊สเอทิลีนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากผลไม้ และเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย (cinnamon oil; CEO) ซึ่งมีความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และเนื่องจาก PLA และ PBAT มีความสามารถในการเข้ากันได้ต่ำ (poor compatibility) สำหรับงานวิจัยนี้จึงเติม Dicumyl peroxide (DCP) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของการเติม Dicumyl peroxide (DCP) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และน้ำมันหอมระเหยอบเชย (CEO) ปริมาณต่างๆ ต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย (Objective of research)

1. เพื่อเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมของ PLA/PBAT โดยที่มี DCP เป็นสารเชื่อมประสาน
2. เพื่อศึกษาผลของการเติม TiO_2 และน้ำมันหอมระเหยอบเชยต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน

1.3 สมมติฐานของการวิจัย (Hypothesis to be tested)

1. ปริมาณการเติม DCP ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความเข้ากันได้ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT กล่าวคือ เมื่อปริมาณ DCP มากขึ้นส่งผลให้ฟิล์ม PLA/PBAT มีความเข้ากันได้มากขึ้น

2. ปริมาณการเติม TiO_2 ที่เพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT มีความสามารถในการดูดซับแก๊สเอทิลีนได้มากขึ้น
3. ปริมาณการเติม CEO ที่เพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้มากขึ้น

1.4 ขอบเขตของการวิจัย (Scope or delimitation of the study)

1. พอลิแลคติกแอซิดเกรด 2003D จากบริษัท พีซี โพลิเมอร์ส มาร์เก็ตติ้ง จำกัด และพอลิ(บิวทิลีน อะดิเพท-โค-เทอแรพทาเรท) เกรด Ecoflex F Blend C1200 (PBAT) จากบริษัท พอลิเมทส์ จำกัด
2. เตรียมฟิล์ม PLA/PBAT ในอัตราส่วน 70:30
3. ใช้ Dicumyl peroxide (DCP) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้
4. ใช้ Titanium dioxide (TiO_2) เป็นสารดูดซับแก๊สเอทิลีนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากผลไม้
5. ใช้น้ำมันหอมระเหยอบเชย (cinnamon essential oil; CEO) เป็นสารต้านเชื้อจุลินทรีย์

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย (Methodology)

1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดลอง
3. ดำเนินงานวิจัย

โดยงานวิจัยจะแบ่งเป็น 4 ส่วนดังนี้

ตอนที่ 1 เตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม Dicumyl peroxide (DCP) ปริมาณ 0.03 0.06 และ 0.1 phr และทำการศึกษาโครงสร้างทางเคมี ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ดัชนีการไหล สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกล จากนั้นเลือกปริมาณการเติม DCP ที่เหมาะสมที่สุด

ตอนที่ 2 เตรียมฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณ 0.25 0.5 1 และ 2 phr โดยเติม DCP ในปริมาณที่เลือกจากตอนที่ 1 และนำไปศึกษาโครงสร้างผลึก ความสามารถในการดูดกลืนแสง ความทึบแสงของฟิล์ม ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ความสามารถในการดูดซับแก๊สเอทิลีน และผลของเวลาในการฉายรังสียูวีเอต่อฟิล์ม (ค่าสี เสถียรภาพทาง

ความร้อน) จากนั้นวิเคราะห์และเลือกปริมาณการเติม TiO_2 ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการศึกษาต่อในตอนที 4

ตอนที่ 3 เตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณ 2.5 5 7.5 และ 10 phr โดยเติม DCP ในปริมาณที่เลือกจากตอนที่ 1 และนำไปศึกษาค่าสีของฟิล์ม ความทึบแสงของฟิล์ม ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ จากนั้นวิเคราะห์และเลือกปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการศึกษาต่อในตอนที 4

ตอนที่ 4 เตรียมฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP, TiO_2 และน้ำมันหอมระเหยอบเชย ด้วยปริมาณที่เลือกในตอนที 1 2 และ 3 จากนั้นทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติเชิงกล อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ สมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ความสามารถในการดูดจับแก๊สเอทิลีน และความสามารถในการทนทานต่อสภาพแวดล้อมโดยการเร่งสภาวะ

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถเพิ่มความเข้ากันได้ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ด้วยการเติม Dicumyl peroxide (DCP) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้
2. สามารถหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปริมาณการเติม DCP, TiO_2 และน้ำมันหอมระเหยอบเชยได้ โดยที่ยังทำให้ฟิล์มมีสมบัติที่ดีอยู่
3. สามารถเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีความสามารถในการดูดจับเอทิลีนและสามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ได้
4. ได้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และมีความสามารถในการยืดอายุผลไม้ได้

บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Review of related literature)

2.1 บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (active packaging)

บรรจุภัณฑ์แอคทีฟเป็นนวัตกรรมที่ใช้ในการควบคุมบรรยากาศเพื่อปกป้องอาหารภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ใช้สารประกอบทางเคมีที่มีคุณสมบัติในการดูดหรือคายก๊าซบางชนิด ซึ่งต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับอาหารหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการบรรจุ [6] ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 บรรจุภัณฑ์แอคทีฟต่างๆที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร [7]

ระบบ	สารประกอบ	ผลิตภัณฑ์อาหาร	อ้างอิง
Oxygen absorber	Iron compounds	cheese, bakery products	Bilska, 2011
	Ascorbic acid	sweets, nuts, coffee, tea	
	Metal salts	beans, milk powder	
	Glucose oxidase	meat	
Moisture absorber	Silica gel		Bilska (2011)
	Glycerol		Brody et. al. (2001)
	Polyvinyl alcohol		
	Clay-based		
CO ₂ absorber	Calcium hydroxide	roasted coffee beans	Bilska (2011)
	Sodium hydroxide		
	Potassium hydroxide		
Ethylene absorber	Aluminium oxide	fruits (apples, apricots	Bilska (2011)
	Active Carbon	bananas, avocado)	
	Potassium - tetraoxomanganate	vegetables (carrot, potatoes, cucumbers)	Brody et al. (2001)
	Potassium permanganate		
Flavor absorber	Citric acid	fish, fruit juices	Bilska (2011)
	Cellulose esters		Brody et al. (2001)
	Activated carbon		
	Sodium bicarbonate		
Antioxidant releasing	Butylated hydroxyanisole (BHA)		Brody et al. (2001)
	Butylated hydroxytoluene (BHT)		
	TBHQ		
	Vitamin C		
	Vitamin E		

ที่มา: ดัดแปลงจาก Bilska (2011) และ Brody et al. (2001)

2.1.1 สารดูดซับออกซิเจน (oxygen absorber)

เหมาะสำหรับใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหารที่ผ่านการอบหรือการทอด เช่น ขนมเค้กหรือขนมปัง เป็นต้น เพื่อป้องกันไม่ให้อาหารเน่าเสียหรือเกิดเชื้อราในระหว่างการวางขาย นอกจากนี้ยังป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ทำให้อาหารเสื่อมคุณภาพ สี กลิ่นและรสชาติเปลี่ยนไป ดังรูปที่ 2-1 แสดงตัวอย่างขวดบรรจุภัณฑ์ปรุงแต่งรสอาหาร ซึ่งมีการเติมสารดูดซับออกซิเจนลงในบรรจุภัณฑ์เพื่อ

คงคุณภาพของสินค้าไว้ แต่อย่างไรก็ตามการลดปริมาณออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์นั้นขึ้นอยู่กับประเภทของอาหารด้วย ซึ่ง Oxygen scavenger ที่นิยมใช้มักเป็นธาตุเหล็กหรือสารประกอบธาตุเหล็ก เช่น Iron oxide เป็นต้น [8, 9]



รูปที่ 2-1 Oxygen scavenger ที่ผสมในขวด PET [8]

2.1.2 สารดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide absorber)

เหมาะสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารที่บรรจุเนื้อสดหรืออาหารที่เกิดเชื้อราได้ง่าย เช่น ขนมปังเนยแข็ง สตรอว์เบอร์รี และลิ้นจี่ เป็นต้น ซึ่งต้องการเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และลดปริมาณออกซิเจนภายในบรรจุภัณฑ์ โดยคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกมาจะรวมกับน้ำในอาหารได้เป็นกรดคาร์บอนิก ส่งผลให้ค่า pH บริเวณผิวหน้าของอาหารลดลง ซึ่งเป็นสภาวะที่สามารถยับยั้งการเติบโตของจุลินทรีย์ได้ [6, 8]

2.1.3 สารดูดซับความชื้น (moisture absorber)

เหมาะสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการควบคุมความชื้น เช่น ผลผลิตทางการเกษตร เช่น ผักผลไม้ และดอกไม้ดังรูปที่ 2 เป็นต้น เพื่อป้องกันไม่ให้ผลิตผลดังกล่าวคายน้ำมากเกินไป ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้น้ำหนักโดยรวมลดลงและเร่งให้เชื้อราเจริญเติบโตได้เร็วขึ้น โดยสารควบคุมความชื้นที่นิยมใช้คือ ซิลิกาเจล [6, 8]



รูปที่ 2-2 ตัวอย่างสินค้าที่ต้องการควบคุมความชื้น [6]

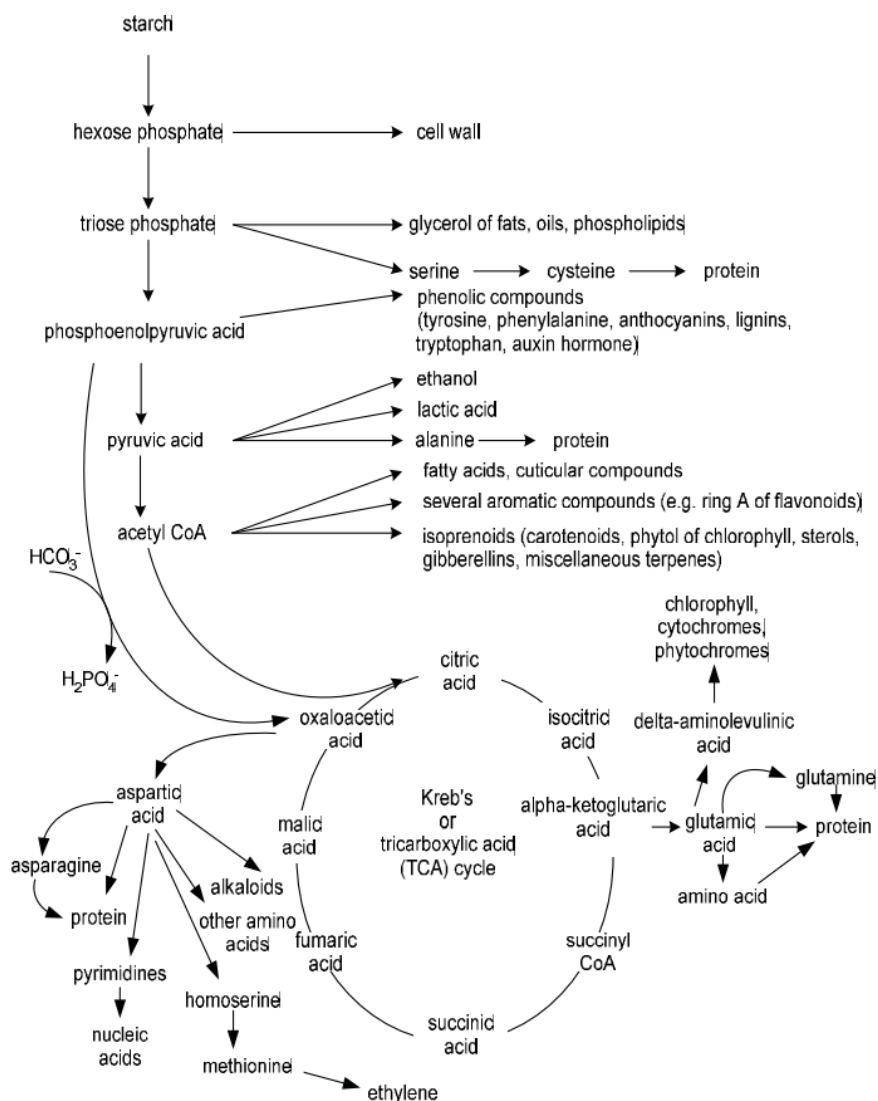
2.1.4 สารดูดซับแก๊สเอทิลีน (ethylene absorber)

สารดูดซับแก๊สเอทิลีนเหมาะสำหรับบรรจุกัญหที่ที่ต้องการลดปริมาณเอทิลีน เช่น บรรจุกัญหที่ผลิตผลทางการเกษตร ผักและผลไม้ เป็นต้น [8] เพื่อชะลอการสุกและยืดระยะเวลาการวางจำหน่าย โดยเอทิลีนเป็นก๊าซที่พืชปลดปล่อยออกมาเมื่ออยู่ในระยะการสุกหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงบางประการภายในพืช เช่น การที่แป้งเปลี่ยนเป็นน้ำตาล ซึ่งทำให้ผลไม้มีรสหวาน การสลายตัวของกรดอินทรีย์ ทำให้รสเปรี้ยวของผลไม้ลดลงเมื่อผลไม้สุก และการสูญเสียความเต่งตึงของเซลล์ เป็นต้น [5] แต่อย่างไรก็ตามอัตราการหายใจและรูปแบบการหายใจของผลไม้แต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน โดยผลไม้บางชนิดอาจถูกเก็บเกี่ยวตั้งแต่ผลยังไม่สุก ดังนั้นเมื่อเก็บเกี่ยวแล้วจึงมีพฤติกรรมที่ทำให้ผลสุกต่อไป เช่น มะม่วง กุ้ง ทุเรียน เป็นต้น แต่สำหรับผลไม้ที่จำเป็นต้องเก็บเกี่ยวเมื่อผลสุกเท่านั้น เช่น ส้ม ลิ้นจี่ ลำไย เป็นต้น หากเก็บเกี่ยวก่อนจะส่งผลให้ลักษณะการสุกของผลไม้เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นผลมาจากการหายใจที่ผิดปกติ [9] นอกจากนี้ผลไม้แต่ละชนิดมีความสามารถในการปลดปล่อยแก๊สเอทิลีนได้แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งผลไม้ตามพฤติกรรมหายใจและการสร้างแก๊สเอทิลีนได้ 2 ประเภท คือ Climacteric และ Non-climacteric fruit

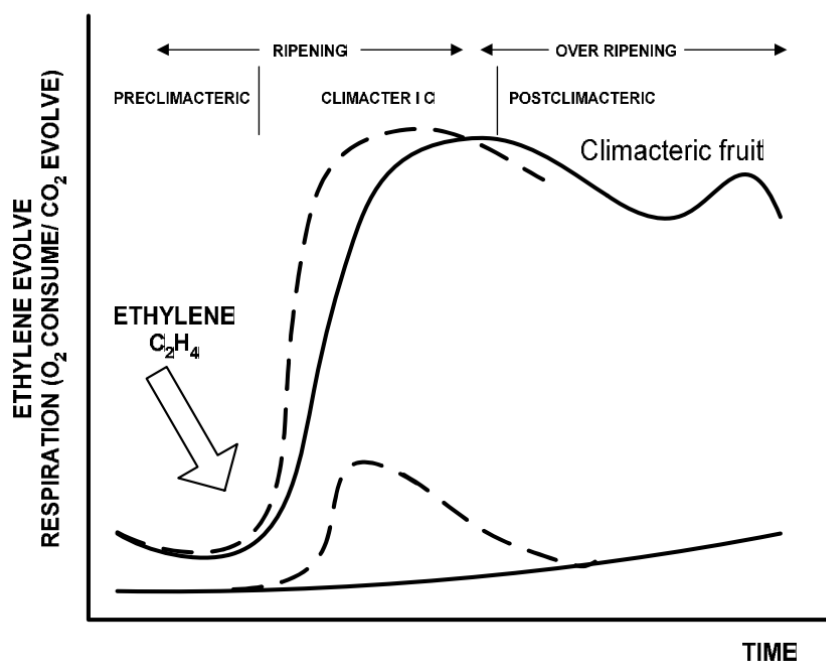
2.1.4.1 Climacteric fruit

Climacteric fruit มักเก็บสะสมอาหารในรูปของแป้งและไขมัน และเมื่อเก็บเกี่ยวแล้วสามารถทิ้งไว้ให้ผลสุกได้เอง เนื่องจากผลของการหายใจระหว่างการสุกและเกิดการสร้างแก๊สเอทิลีนภายในเนื้อเยื่อ [9] ดังรูปที่ 2-3 โดยในระยะเริ่มต้นมีอัตราการหายใจต่ำแต่ในระหว่างการสุกอัตราการหายใจจะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้น เรียกว่า ระยะ Climacteric rise และอัตราการหายใจของผลจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุด และเมื่อผลไม้สุกเต็มที่ (ripening) เรียกว่า Climacteric peak หลังจากนั้นอัตราการหายใจจะมีแนวโน้มลดลง และเข้าสู่ระยะสุกงอม (over ripening) และเน่าเสียในที่สุด ดังรูปที่ 2-4 ทั้งนี้ในระหว่างกระบวนการสุก การสร้าง

แก๊สเอทิลีนจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการหายใจของผล ดังรูปที่ 2-5 โดยการสร้างแก๊สเอทิลีนที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเกิดก่อนหรือหลังอัตราการหายใจที่เพิ่มขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับผลไม้แต่ละชนิด [9, 10]



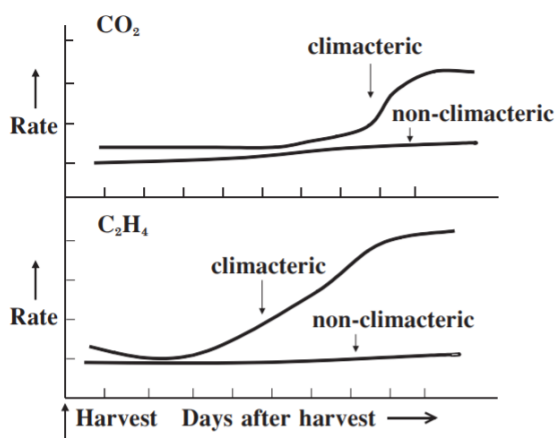
รูปที่ 2-3 การสร้างสารประกอบจากการหายใจ [9]



รูปที่ 2-4 รูปแบบการหายใจ (เส้นทึบ) แบบ Climacteric และ Non-Climacteric , การตอบสนองต่อการใช้แก๊สเอทิลีน (เส้นประ) [10]

2.1.4.2 Non-climacteric fruit

Non-Climacteric fruit คือ ผลไม้ที่ระหว่างการสุกมีอัตราการหายใจต่ำมากและค่อนข้างคงที่ ดังรูปที่ 2-5 โดยผลไม้ประเภทนี้อาจเก็บสะสมอาหารในรูปของน้ำตาลหรือกรดอินทรีย์ ซึ่งไม่สามารถวางทิ้งไว้ให้สุกได้เหมือนผลไม้ประเภท Climacteric ดังนั้นจึงต้องเก็บเกี่ยวเมื่อผลสุกแล้วเท่านั้น นอกจากนี้ผลไม้ประเภท Non-Climacteric อาจมีการสร้างแก๊สเอทิลีนในเนื้อเยื่อได้เช่นกัน แต่มีปริมาณและอัตราที่ต่ำ ส่งผลให้กระบวนการสุกเกิดช้า และเมื่อสุกแล้วจะไม่มีอาการหายใจหรือสร้างเอทิลีนเพิ่มอีก กล่าวคือผลไม้ชนิดนี้ไม่ต้องการเอทิลีนเพื่อกระตุ้นให้เกิดการสุก [9, 10]



รูปที่ 2-5 การหายใจ (กราฟด้านบน) และการสร้างเอทิลีน (กราฟด้านล่าง) ของผลไม้ประเภท Climacteric และ Non-climacteric [10]

ตารางที่ 2-2 ตัวอย่างผลไม้ประเภท Climacteric และ Non-climacteric [10]

Climacteric	Non-climacteric
กล้วย มะม่วง มะละกอ มะเขือเทศ แคนตาลูป	ส้ม มะนาว สตรอว์เบอร์รี่ เชอร์รี่ พลับ สับปะรด
ทุเรียน มังคุด แอปเปิล สาลี่ ท้อ แตงโม	แตงกวา พริกหวาน พริกเผ็ด องุ่น เงาะ ลิ้นจี่
น้อยหน่า โอโวกาโด กีวี พลับ ละมุด ฝรั่ง	ลำไย ลองกอง ฝรั่ง พักทอง มะระ

ตารางที่ 2-3 ความแตกต่างของการสร้างแก๊สเอทิลีนและการตอบสนองต่อการได้รับแก๊สเอทิลีนระหว่างผลไม้ประเภท Climacteric และ Non-climacteric [10]

Climacteric	Non-climacteric
-การตอบสนองต่อการใช้เอทิลีนเพิ่มในการหายใจ	กระตุ้นตลอดระยะเวลาหลังเก็บเกี่ยวแล้ว
-ความต่อเนื่องในการสร้างเอทิลีน	ไม่ต่อเนื่อง
-ความเข้มข้นของเอทิลีนภายใน	แปรปรวน ตั้งแต่ความเข้มข้นต่ำถึงสูงมาก

2.2 ตัวอย่างผลไม้ประเภท Climacteric fruit และโรคที่เกิดหลังจากเก็บเกี่ยว

มะม่วง (*Mangifera L.*) มีชื่อสามัญคือ Mango อยู่ในวงศ์ Anacardiaceae เป็นผลไม้ประเภท Climacteric ซึ่งจัดว่ามีอัตราการผลิตก๊าซเอทิลีนระดับปานกลาง $1.0-10.0 \mu \text{C}_2\text{H}_4 \text{ Kg-hr}^{-1}$ ดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 การจัดกลุ่มของผลไม้ตามอัตราการผลิตก๊าซเอทิลีน [3]

อัตราการผลิตแก๊สเอทิลีนที่ 20 องศา		ชนิดของผลไม้
	เซลเซียส ($\mu\text{C}_2\text{H}_4 \text{ Kg-hr}^{-1}$)	
ต่ำมาก	< 0.1	ส้ม องุ่น พุทรา ทับทิม เชอร์รี่ สตรอว์เบอร์รี่
ต่ำ	0.1-1.0	แตงกวา มะเขือ กระจับปริง พริก พลับ สับปะรด ฟักทอง แตงโม ราสเบอร์รี่ บลูเบอร์รี่
ปานกลาง	1.0-10.0	กล้วย ฝรั่ง มะม่วง มะเขือเทศ
สูง	10.0-100.0	มะละกอ สาลี่ ท้อ แอปเปิล แคนตาลูป
สูงมาก	< 100.0	น้อยหน่า ละมุด

2.2.1 โรคมะม่วงหลังจากเก็บเกี่ยว

2.2.1.1 โรค Anthracnose

เกิดจากเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* แสดงดังรูปที่ 2-6 และ 2-7 โดยเป็นโรคที่เกิดได้ตั้งแต่ระยะปลูกจนถึงระยะเก็บเกี่ยว และรอการจัดจำหน่าย ซึ่งเชื้อราดังกล่าวสามารถทำลายมะม่วงได้ทุกส่วน ได้แก่ กิ่ง ก้าน ใบ ช่อดอก และผล พบว่าปรากฏจุดสีดำกระจายอยู่บนไหล่ของผลมะม่วง และต่อมามีการกระจายไปทั่วผล ซึ่งจุดดำดังกล่าวมีการขยายตัวเป็นแอ่งปุ่มตรงกลางมีกลุ่มเมือกของสปอร์สีชมพู ภายในผล เนื้อมีความชื้นเป็นวงกลม นิ่มและมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยว ดังรูปที่ 2-8 และ 2-9 [11, 12]



รูปที่ 2-6 เชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* สาเหตุของการเกิดโรค Anthracnose ในมะม่วง [13]



รูปที่ 2-7 ลักษณะของเชื้อ *Colletotrichum* sp. [11]



รูปที่ 2-8 โรค Anthracnose ในมะม่วงก่อนการเก็บเกี่ยว [13]



รูปที่ 2-9 โรค Anthracnose ในมะม่วงหลังการเก็บเกี่ยว [13]

2.2.1.2 โรค Stem end rot

เกิดจากเชื้อ *Lasiodiplodia theobromae* โดยผลมะม่วงจะเริ่มมีสีน้ำตาลอ่อน และเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง และสีน้ำตาลดำในที่สุด ซึ่งลามจากรอยตัดขั้วผลไปยังก้นผล ซึ่งถ้าหากมะม่วงเป็นโรคดังกล่าวจะเน่าได้อย่างรวดเร็ว โดยเนื้อจะมีสีน้ำตาลอ่อน เนื้อเยื่อใต้เปลือกผลจะถูกทำลาย และเน่าลามไปถึงเมล็ด ดังรูปที่ 2-11 [11]

Lasiodiplodia sp.

- 1 พิคนิตี (pycnidia)
- 2 โคนิดิโอฟอร์ (conidiophores)
- พาราไฟซิส (paraphyses)
- 3 โคนิตี (conidia)

ที่มา : Barnett et al., 1986



รูปที่ 2-10 ลักษณะของเชื้อ *Lasiodiplodia* sp. [11]



รูปที่ 2-11 โรค Stem end rot ในมะม่วงหลังการเก็บเกี่ยว [14]

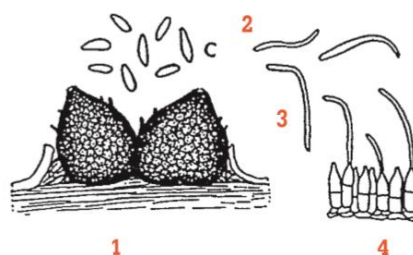
2.2.1.3 โรค Phomopsis rot

เกิดจากเชื้อ *Phomopsis mangiferae* ซึ่งทำให้ผลเน่าตั้งแต่ขั้วและเป็นแผลบนผลมะม่วง มีลักษณะเป็นจุดสีน้ำตาล โดยผลที่เป็นโรครดดังกล่าวจะเน่าอย่างช้าๆ และสร้าง pycnidium บริเวณกลางแผล

Phomopsis sp.

- 1 พิคนินเดียม (pycnidia)
- 2 อัลฟา โคนินเดียม (alpha conidia)
- 3 เมต้า โคนินเดียม (beta conidia)
- 4 โคนินดิโอฟอร์ (conidiophores)

ที่มา : Barnett *et al.*, 1986

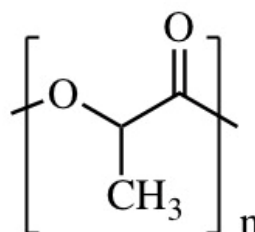


รูปที่ 2-12 ลักษณะของเชื้อ *Phomopsis* sp. [11]

2.3 พลาสติกชีวภาพ (Bioplastics)

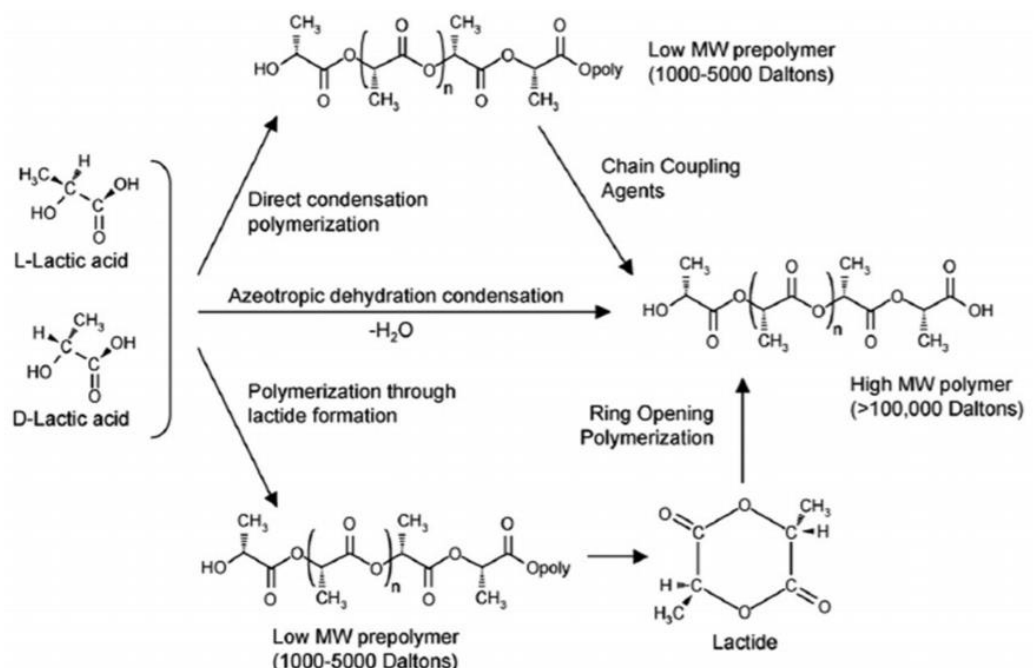
พลาสติกชีวภาพเป็นพลาสติกที่ผลิตขึ้นจากวัสดุทางธรรมชาติและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งวัสดุธรรมชาติดังกล่าวมีหลายชนิด เช่น แป้ง (starch) เคซีน (casein) โปรตีนจากถั่ว (soy protein) และเซลลูโลส (cellulose) เป็นต้น ซึ่งแป้งเป็นวัสดุธรรมชาติที่หาได้ง่าย มีปริมาณมากและราคาถูก จึงเป็นที่นิยมในการนำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพ โดยสามารถผลิตแป้งได้จากพืชเกษตรกรรมหลายชนิด เช่น มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวสาลี มันฝรั่ง เป็นต้น ซึ่งในประเทศไทยมีพื้นที่เกษตรกรรมปลูกมันสำปะหลังเป็นจำนวนมากและราคาถูก จึงนิยมนำมันสำปะหลังมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกชีวภาพ [15]

2.3.1 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid; PLA)



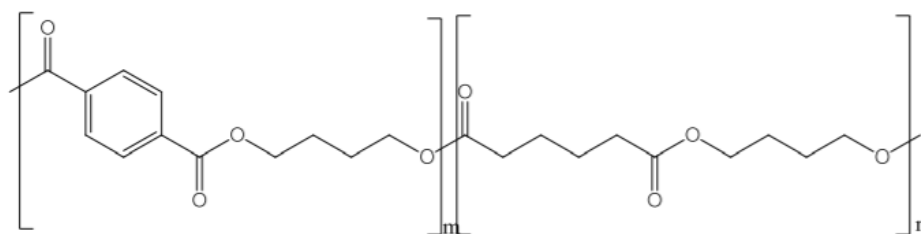
รูปที่ 2-13 โครงสร้างของ PLA [16]

Poly(lactic acid) (PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยผลิตมาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น โดยทำให้วัตถุดิบดังกล่าวละลายเป็นแป้งแล้วใช้เอนไซม์ย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลกลูโคสผ่านกระบวนการหมักโดยใช้แบคทีเรีย ได้เป็น Lactic acid จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทางเคมีได้ lactide มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการ Polymerization ดังรูปที่ 2-14 [16]



รูปที่ 2-14 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PLA [17]

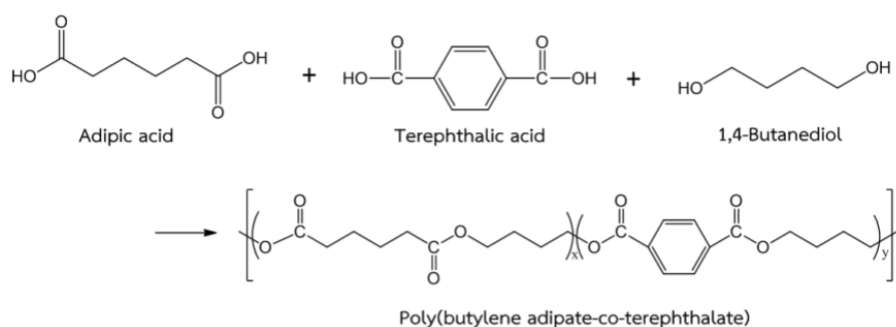
2.3.2 พอลิ(บิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทอเรพทาเรท) (PBAT)



รูปที่ 2-15 โครงสร้างของ PBAT [18]

Poly (butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่สังเคราะห์ได้จากแหล่งปิโตรเคมี โดย PBAT สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยเป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่มที่

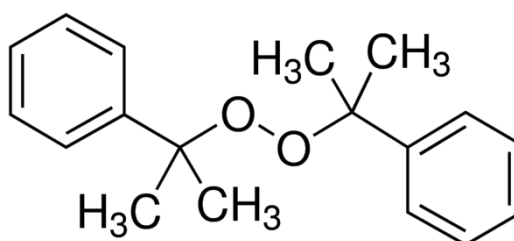
สังเคราะห์จาก Adipic acid, 1,4-butanediol และ Terephthalic acid แสดงดังรูปที่ 2-16 ซึ่ง PBAT มีคุณสมบัติที่สามารถทดแทนการใช้ Low density polyethylene (LDPE) ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และเนื่องจาก PBAT มีสายโซ่ยาวและน้ำหนักโมเลกุลสูง จึงทำให้ PBAT มีสมบัติในการดึงยืดสูงและทนทานต่อแรงกระแทกได้ดี นิยมนำ PBAT มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเกษตร, อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ และอุตสาหกรรมการแพทย์ เป็นต้น [18]



รูปที่ 2-16 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PBAT [18]

2.4 ไดคิลมิล เพอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide; DCP)

ไดคิลมิล เพอร์ออกไซด์ มีชื่อทางเคมี คือ Bis (1-methyl-1-phenylethyl) peroxide หรือ Bis (α,α -dimethylbenzyl) peroxide มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 270.37 กรัม/โมล มีความหนาแน่นเท่ากับ 1.56 กรัม/มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิการหลอมเหลวเท่ากับ 39 ถึง 41 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิการเริ่มแตกตัวเมื่อได้รับความร้อนเท่ากับ 120.43 องศาเซลเซียส [19] ซึ่งส่วนมากมีการใช้ไดคิลมิล เพอร์ออกไซด์ เป็นสารที่ทำให้ยางคงรูป (vulcanization) นอกจากนี้ยังเป็นสารเชื่อมขวาง (crosslinking agent) สำหรับพอลิเมอร์และอีลาสโตเมอร์



รูปที่ 2-17 โครงสร้างทางเคมีของ Dicumyl peroxide [20]

ไดคิลมิล เพอร์ออกไซด์ สามารถก่อให้เกิดการระคายเคืองอย่างรุนแรงต่อผิวหนังและเยื่อเมือก อาจก่อให้เกิดอาการแพ้ หากสัมผัสโดยตรงหรือสูดดม ควรเก็บให้ห่างจากความร้อน ประกายไฟ

หลีกเลี่ยงการรั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อม หากสัมผัสผิวหนัง ควรล้างผิวหนังด้วยสบู่และน้ำปริมาณมาก และหากเข้าตา ควรล้างตาด้วยน้ำเป็นเวลาหลายนาที

2.5 อบเชย (cinnamon)

มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Cinnamomum bejolghota* (Buch.-Ham.) Sweet อยู่ในวงศ์ LAURACEAE มีชื่อสามัญคือ Cinnamon และในแต่ละพื้นที่มีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไป ได้แก่ เชียงใหญ่ (จังหวัดตรัง) จวงดง (จังหวัดหนองคาย) บริแวง (จังหวัดระนอง) มหาปราบ (จังหวัดตราด) มหาปราบตัวผู้ (จังหวัดจันทบุรี) แลงแวง (จังหวัดปัตตานี) และระแวง (จังหวัดชลบุรี) เป็นต้น [21]



รูปที่ 2-18 ต้นอบเชย [22]

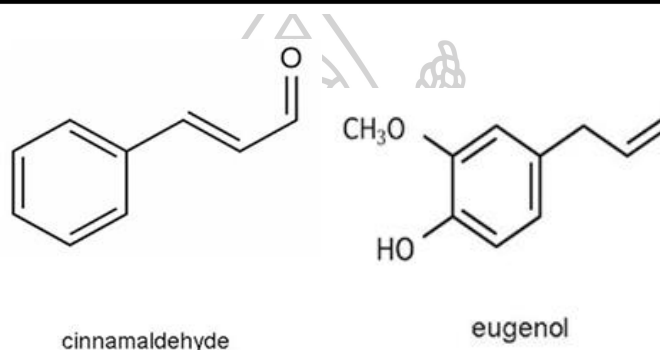
อบเชยมีถิ่นกำเนิดบริเวณเขตร้อนและกึ่งเขตร้อนของอเมริกาเหนือ อเมริกากลาง และอเมริกาใต้ มักพบใกล้แหล่งน้ำในป่าดงดิบชื้น เป็นไม้ต้นขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ สูง 7-25 เมตร ดังรูปที่ 2-18 เนื้อไม้มีกลิ่นหอมคล้ายการบูร มีลักษณะเหนียวใช้ในการแกะสลักทำหีบใส่ของป้องกันแมลง นอกจากนี้รากและใบของอบเชยมีสรรพคุณทางยา แก้กูกเสียดแน่นท้อง แก้ปวดศีรษะ [21] นอกจากนี้เนื่องจากน้ำมันมีฤทธิ์ในการต้านเชื้อจุลินทรีย์และเชื้อรา จึงมีการนำไปใช้เป็นยาฆ่าเชื้อในช่องปาก [3]

2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของอบเชย

สารประกอบทางเคมีที่พบมากในน้ำมันเปลือกและใบอบเชย คือ Cinnamaldehyde และ Eugenol ตามลำดับ โดยแสดงโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2-19 นอกจากนี้ยังพบ α -pinene, Cinnamyl acetate, Caryophyllene และ Benzyl benzoate ดังแสดงในตารางที่ 2-5 [3]

ตารางที่ 2-5 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันอบเชย [3]

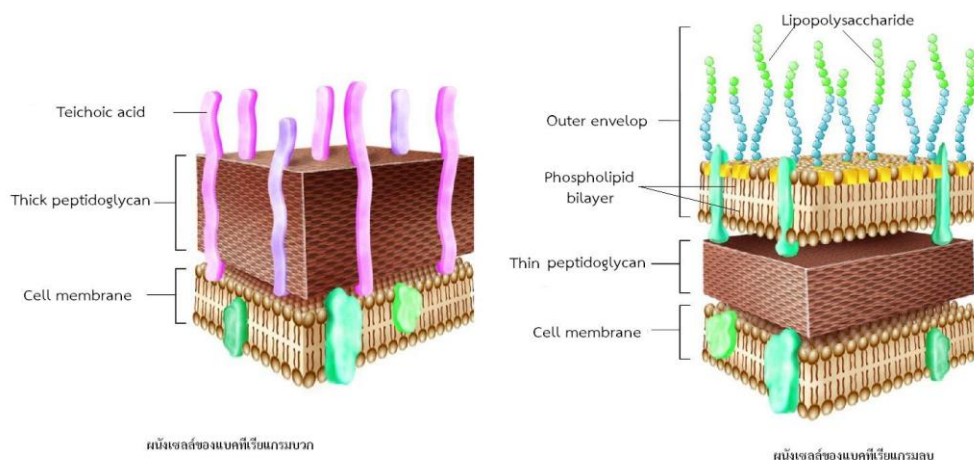
องค์ประกอบ (Component)	ปริมาณร้อยละ	
	เปลือกไม้	ใบ
Cinnamaldehyde	60 - 75	1.3 - 2.0
p-Cymene	0.6 - 1.2	0.4 - 1.2
α-Pinene	0.2 - 0.6	0.2 - 0.1
Eugenol	0.8	70 - 96
Cinnamyl acetate	5.0	0.8 - 1.7
Caryophyllene	1.4 - 3.3	1.9 - 5.8
Benzyl benzoate	0.7 - 1.0	2.7 - 3.5



รูปที่ 2-19 องค์ประกอบหลักของน้ำมันหอมระเหยอบเชย [23]

2.5.2 กลไกการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของน้ำมันหอมระเหย

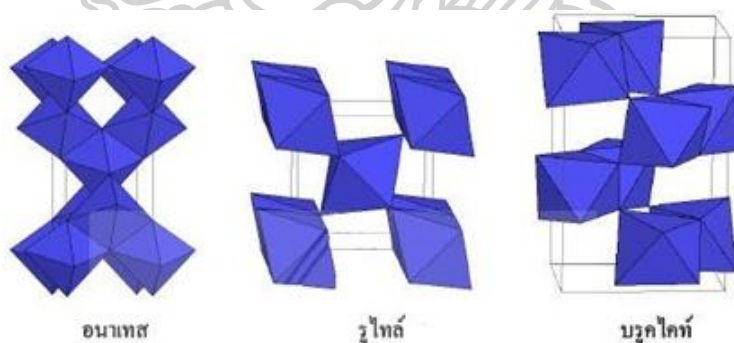
เนื่องจากส่วนประกอบของน้ำมันหอมระเหยมีส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ทำให้น้ำมันหอมระเหยแทรกตัวผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ซึ่งมีโปรตีนและไขมันเป็นองค์ประกอบได้ โดยน้ำมันหอมระเหยจะไปคั่นในส่วนของไขมันและไมโทคอนเดรีย (mitochondria) ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์เกิดความไม่คงตัว เกิดการยับยั้งกระบวนการเมแทบอลิซึมที่เยื่อหุ้มเซลล์ ทำลายโปรตีนที่เป็นส่วนประกอบหลักของเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนในเซลล์ลดลง จึงทำให้ส่วนประกอบของไซโทพลาสซึมและสารเมทาบอลิต์ไอออนรั่วไหลออกนอกเซลล์ จึงเป็นสาเหตุทำให้เซลล์ตายในที่สุด [24] โดยน้ำมันหอมระเหยมีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกได้มากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ เนื่องจากแบคทีเรียแกรมลบมีโครงสร้างของผนังเซลล์ที่ซับซ้อนมากกว่าแบคทีเรียแกรมบวกดังแสดงในรูปที่ 2-20 ถึงแม้ว่าจะมีไขมันในชั้นเมมเบรนชั้นนอก (outer membrane) มากกว่าและมีผนังเซลล์บางกว่าแบคทีเรียแกรมบวก จึงทำให้แบคทีเรียแกรมลบมีความสามารถในการทนทานต่อน้ำมันหอมระเหยได้มากกว่า [24]



รูปที่ 2-20 ผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ [25]

2.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide)

Titanium dioxide (TiO_2) เป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ที่มีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษ และราคาถูก โดย TiO_2 มีโครงสร้างผลึก 3 รูปแบบ คือ Rutile, Anatase และ Brookite ซึ่งผลึกแต่ละประเภทมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2-21 [26]

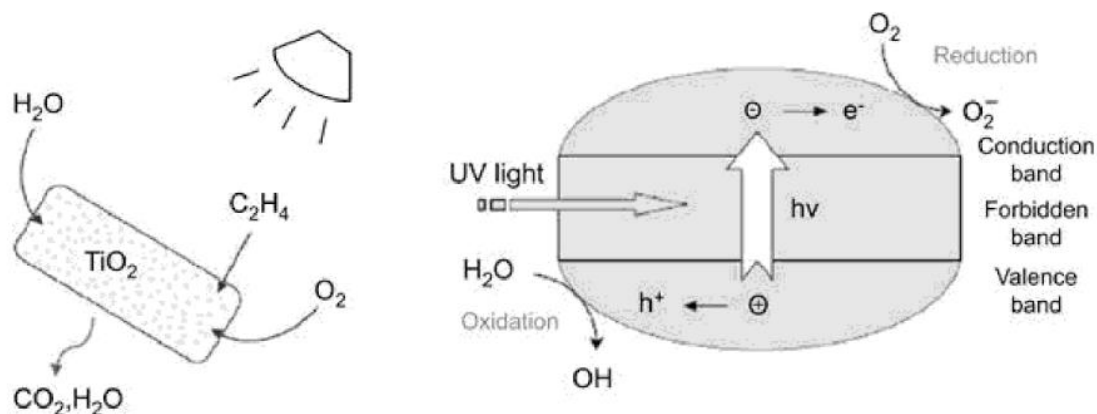


รูปที่ 2-21 รูปแบบผลึกของ Titanium dioxide [26]

Rutile มีโครงสร้างผลึกแบบ Tetragonal ซึ่งเป็นชนิดที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ มีความเสถียรต่ออุณหภูมิสูง ส่วน Anatase มีโครงสร้างผลึกแบบ Tetragonal เช่นกัน แต่หากให้ความร้อนสูงกว่า $915\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะสามารถเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Rutile ได้ และ Brookite มีโครงสร้างผลึกแบบ Orthorhombic ซึ่งเป็นชนิดที่พบน้อยในธรรมชาติ มีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำ หากให้ความร้อนมากกว่า $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะสามารถเปลี่ยนรูปแบบผลึกเป็นแบบ Rutile ได้ [26]

Titanium dioxide (TiO_2) มีคุณสมบัติในการกำจัดแก๊สเอทิลีน (ethylene scavenger) โดยอาศัยปฏิกิริยาการย่อยสลายด้วยแสง (photocatalytic degradation reaction) หลังจาก

TiO₂ ได้รับการฉายรังสี UV ซึ่งการที่ TiO₂ มีพื้นที่ผิวมากเป็นการส่งเสริมประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำและเอทิลีนก่อนเกิด Photocatalytic degradation [27]



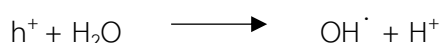
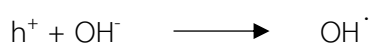
รูปที่ 2-22 กลไกการเกิดปฏิกิริยา Ethylene photocatalytic บน TiO₂ nanoparticles [27]

จากรูปที่ 2-22 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยา Ethylene photodegradation ด้วย TiO₂ photocatalyst ในขั้นตอนแรกจะเกิดการดูดซับน้ำ O₂ และ Ethylene บนพื้นผิวของ TiO₂ จากนั้นจะเกิด Hole-electron pairs ซึ่งต้องการพลังงานที่เพียงพอต่อการข้ามผ่าน Bandgap ระหว่าง Valence band (VB) และ Conduction band (CB) โดยหน้าที่ของ TiO₂ จะเกิดขึ้นเมื่อ Photons ที่ความยาวคลื่นหนึ่งมากระทบบริเวณพื้นผิว จะทำให้เกิดการกระตุ้น Electron จาก VB ไปยัง CB และจะทำให้เกิด Positive holes ใน VB ซึ่งจากนั้นจะทำปฏิกิริยากับ Hydroxylated surface และเกิดเป็น OH[•] radicals ซึ่งทำหน้าที่เป็น Oxidizing agent ที่แท้จริง [27] และในส่วนของ CB Electron นั้น จะเคลื่อนที่จาก CB ไปยัง Electron acceptor โดย O₂ ที่ถูกดูดซับไว้ในขั้นตอนแรกจะทำหน้าที่เป็น Electron acceptor และทำให้เกิด Superoxide radical (O₂^{•-}) จากนั้น OH[•] จะเข้าทำปฏิกิริยากับ O₂^{•-} และไปออกซิไดซ์ Ethylene ให้กลายเป็น CO₂ และน้ำ [28] ดังแสดงในสมการด้านล่าง

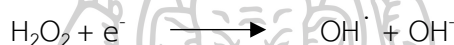
ปฏิกิริยาการกระตุ้นด้วยแสง



ปฏิกิริยาออกซิเดชัน



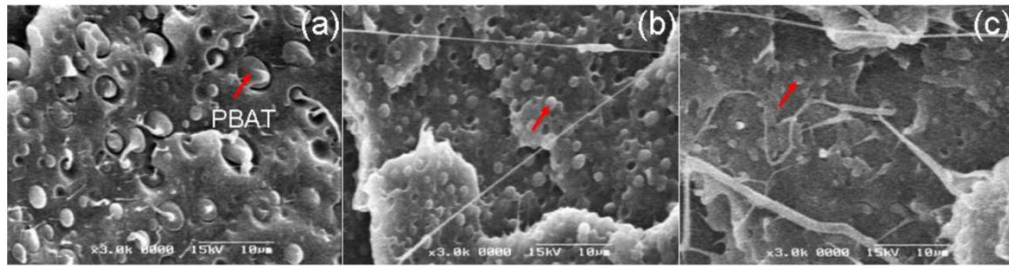
ปฏิกิริยารีดักชัน



นอกจากนี้ TiO_2 ยังมีความสามารถในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ ทั้งชนิดแกรมบวกและแกรมลบ โดยจะเกิดบริเวณพื้นผิวของ TiO_2 ซึ่งหาก TiO_2 มีพื้นที่ผิวมากก็ทำให้สามารถมีพื้นที่ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้มากเช่นกัน โดย Reactive oxygen species (ROS) ที่เกิดจากปฏิกิริยาจะเข้าทำลายผนังเซลล์และเซลล์เมมเบรนของเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้เซลล์แตกและของเหลวภายในรั่วไหลออกมา จึงทำให้เชื้อจุลินทรีย์ตายในที่สุด [28]

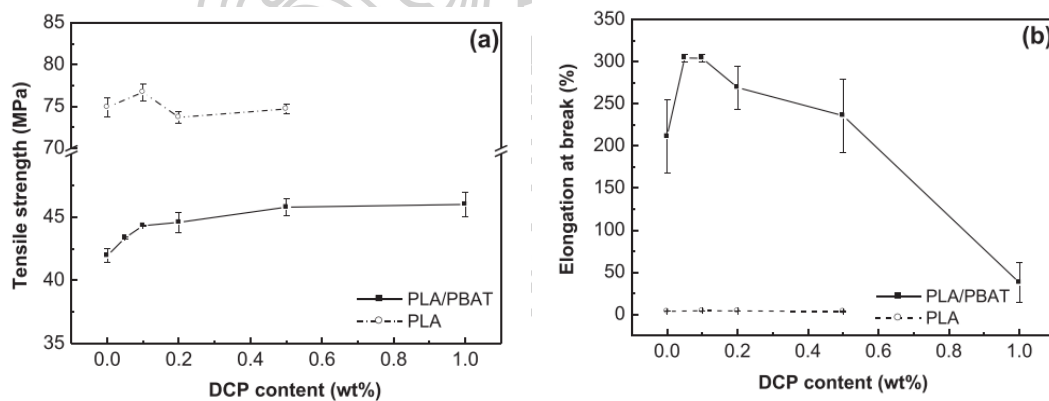
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ Piming Ma และคณะ [29] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มความเหนียวให้กับ PLA โดยใช้วิธีการเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมแบบว่องไว (reactive blend) ซึ่งผสมกับ PBAT ร่วมไปกับการใช้ Dicumyl peroxide เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (free radical initiator) โดยใช้อัตราส่วนการผสม PLA และ PBAT เท่ากับ 80 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากภาพถ่ายภาคตัดขวางของซีท PLA/PBAT/DCP ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Compression molding ดังรูปที่ 2-23 พบว่า Domain size ของ PBAT ซึ่งเป็นวัฏภาคกระจายมีขนาดลดลงเมื่อเติม DCP 0.1 %wt เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีการเติม DCP และเมื่อเติม DCP ถึง 0.5 %wt พบว่า วัฏภาคกระจายของ PBAT มีขนาดลดลงเล็กน้อยและมีการหลุดออกของวัฏภาค PBAT น้อยลง แสดงให้เห็นว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 2-23 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง (cryo-fracture surface) ของ PLA/PBAT (80/20) ที่มีการเติม DCP (a) 0, (b) 0.1 และ (c) 0.5 wt% ลูกศรสีแดงแสดง PBAT domain [29]

นอกจากนี้พบว่าการเติม DCP ส่งผลให้ค่า Tensile strength ของ PLA/PBAT มากขึ้น 4 MPa และค่า Elongation at break มากขึ้นถึง 300 % และลดลงเมื่อเติม DCP ปริมาณเกิน 0.2 wt% ดังรูปที่ 2-24 เนื่องจากเมื่อ DCP ได้รับความร้อนในระหว่างการผสมนั้นจะเกิดการแตกตัวเป็น Free radical ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่ PLA และ PBAT โดยการดึงเอาอะตอมไฮโดรเจนออก ทำให้บนสายโซ่ของ PLA และ PBAT มี Free radical ดังนั้น PLA radical และ PBAT radical จึงเข้าทำปฏิกิริยากัน อาจเกิดเป็น Branched/crosslinked PLA, Branched/crosslinked PBAT, PLA-g-PBAT copolymers และ PLA-crosslink-PBAT



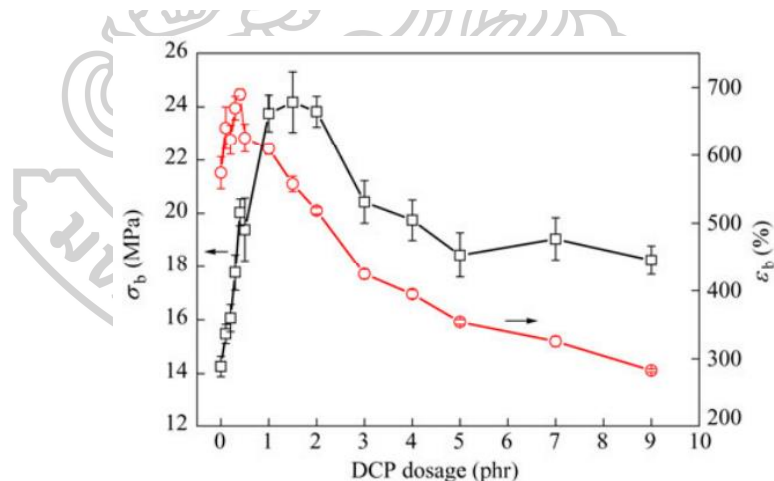
รูปที่ 2-24 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT (80/20) และ PLA ที่มีการเติม DCP ปริมาณต่างๆ (a) Tensile strength และ (b) Elongation at break [29]

จากงานวิจัยของ Xiao-hu Zhang และคณะ [30] ได้ทำการเตรียม Crosslinked low-density polyethylene (XLPE) โดยใช้วิธีการแพร่ DCP เข้าไปในเม็ด LDPE ก่อนกระบวนการหลอมผสม (melt blending) พบว่าอุณหภูมิหลอมผลึก (melting temperature; T_m) และอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature; T_c) ลดลงประมาณ 17 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มปริมาณ

DCP จาก 0 phr ถึง 9 phr ดังตารางที่ 2-6 แสดงให้เห็นว่ามีการเกิด Branch หรือ Network ซึ่งขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็น Crystalline lamella ของสายโซ่ นอกจากนี้ยังพบว่า Tensile strength (σ_b) และ Strain at break (ϵ_b) มีค่ามากขึ้นเมื่อเติม DCP ต่ำกว่า 1.5 phr และ 0.4 phr ตามลำดับ และลดลงเมื่อเติม DCP ปริมาณมากขึ้น เนื่องจากการก่อตัวของ Network ซึ่งขัดขวางการเลื่อนผ่านและการจัดเรียงตัวของผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2-25

ตารางที่ 2-6 Crystalline และ Melting behavior ของ XLPE และ PE gel [30]

DCP	XLPE				Gel		
	T_m (°C)	T_c (°C)	l (nm)	Crystallinity (%)	T_m (°C)	T_c (°C)	l (nm)
0	109.6	–	7.8	41.1	–	–	–
0.1	108.2	97.1	7.5	39.8	–	–	–
0.2	107.9	96.6	7.4	39.5	–	–	–
0.3	107.1	96.2	7.3	40.0	105.8	95.5	7.0
0.4	106.9	96.0	7.2	39.2	104.9	94.4	6.9
0.5	106.4	95.5	7.1	38.4	105.2	92.6	6.9
1.0	104.6	94.0	6.8	35.5	104.3	91.9	6.8
1.5	103.8	92.5	6.7	35.3	103.6	91.2	6.7
2.0	102.6	91.4	6.5	34.1	102.0	90.4	6.4
3.0	100.4	89.2	6.2	32.6	100.6	88.8	6.2
4.0	98.0	87.3	5.9	30.9	98.5	86.8	5.9
5.0	96.8	85.0	5.7	29.9	96.8	84.9	5.7
7.0	94.3	82.8	5.4	28.2	96.2	81.5	5.7
9.0	92.6	80.6	5.3	26.8	92.0	79.6	5.2



รูปที่ 2-25 Tensile strength (σ_b) และ Strain at break (ϵ_b) เมื่อเติม DCP ปริมาณต่างๆ [30]

จากงานวิจัยของ Seenivasan Prabuseenivasan และคณะ [31] พบว่าน้ำมันหอมระเหยอบเชย (cinnamon oil) มีความสามารถในการเป็นสารต้านการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้มากที่สุดซึ่งแสดงดังตารางที่ 2-7 ซึ่งเป็นผลมาจากสารประกอบที่อยู่ในน้ำมันดังกล่าว โดยจากผลการทดสอบเทคนิค Gas chromatography mass spectrometry (GC-MS) พบว่า Cinnamaldehyde เป็นสารประกอบหลักในน้ำมันหอมระเหยอบเชย ซึ่ง Cinnamaldehyde และสารประกอบอื่นใน

น้ำมันหอมระเหยอบเชยมีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) ซึ่งสามารถเข้าไปกั้นชั้นไขมันของเยื่อหุ้มเซลล์เชื้อแบคทีเรียและไมโทคอนเดรีย ส่งผลให้โครงสร้างเซลล์ถูกรบกวนและทำให้เกิดการซึมผ่านได้มากขึ้น จึงทำให้เซลล์ตายในที่สุด

ตารางที่ 2-7 Minimum Inhibitory Concentration (MIC) ของน้ำมันหอมระเหยแต่ละชนิด [31]

Table 4: Minimum Inhibitory Concentration (MIC) of selected essential oils (mg/ml).

Oil name	<i>S. aureus</i>	<i>B. subtilis</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. vulgaris</i>	<i>P. aeruginosa</i>	<i>E. coli</i>
Cinnamon oil	3.2	>1.6	3.2	>1.6	>0.8	>1.6
Clove oil	>6.4	>3.2	>6.4	>3.2	>1.6	>1.6
Geranium oil	>12.8	>6.4	12.8	>12.8	>12.8	>6.4
Lemon oil	>12.8	>12.8	>12.8	>6.4	12.8	>6.4
Lime oil	12.8	>6.4	>6.4	>3.2	>6.4	>6.4
Orange oil	>12.8	>12.8	12.8	>6.4	>12.8	>12.8
Rosemary oil	>12.8	>6.4	>12.8	>6.4	>6.4	>6.4

จากงานวิจัยของ Jasim Almed และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยในฟิล์ม PLA ซึ่งเตรียมโดยผสม PLA และ PEG ในอัตราส่วน 90:10 จากนั้นเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย 25 และ 50 %w/w โดยทำการขึ้นรูปด้วยวิธี Solution casting เพื่อพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์แช่แข็ง (frozen food product)

ตารางที่ 2-8 ความหนาและสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PLA ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย 25 และ 50%w/w เทียบกับพอลิเมอร์ผสม PLA/PEG [32]

Sample	Thickness (mm)	Tensile strength (MPa)	EAB (%)	Tensile modulus (MPa)
PLA/PEG (90:10)	0.081 ± 0.003c	45.94 ± 2.99a	35.37 ± 3.98c	797.90 ± 12.50a
PLA/PEG/25% CEO	0.103 ± 0.008b	31.59 ± 1.95b	90.60 ± 6.96b	382.97 ± 6.51 b
PLA/PEG/50% CEO	0.123 ± 0.004a	24.61 ± 0.65c	165.29 ± 8.72a	256.88 ± 1.70c

Values are given as mean ± SD (n = 3).

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$).

จากผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2-8 พบว่าเมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยมากขึ้น ส่งผลให้ค่า Tensile strength กับ Tensile modulus ของฟิล์มผสม PLA/PEG ลดลง 31.24% กับ 46.44% และ 52.01% กับ 67.80% เมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย 25 และ 50% ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามค่า Elongation at break เพิ่มขึ้น 156.15 และ 367.32% เมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย 25 และ 50% ตามลำดับ บ่งบอกได้ว่าน้ำมันหอมระเหยอบเชยทำหน้าที่เป็น Plasticizer โดยเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ จึงทำให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มลดลง นอกจากนี้การเติมน้ำมันลงในฟิล์มพอลิเมอร์อาจทำให้เกิดการขัดขวางอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ระยะห่างระหว่างสายโซ่มากขึ้น ส่งผลให้ค่า Tensile strength ของฟิล์มพอลิเมอร์ลดลง และผลของการเป็น Plasticizer ของน้ำมันหอมระเหยอบเชย เกิดขึ้นจากการเลื่อนผ่านกันของเฟส PLA และ

PEG เนื่องจากน้ำมันหอมระเหยอบเชยซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจึงแทรกตัวเข้าไปอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ [32]

ตารางที่ 2-9 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PLA/PEG เมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย 25 และ 50%wt [32]

Thermal properties of plasticized PLA films incorporated with 25 and 50% cinnamon essential oil.

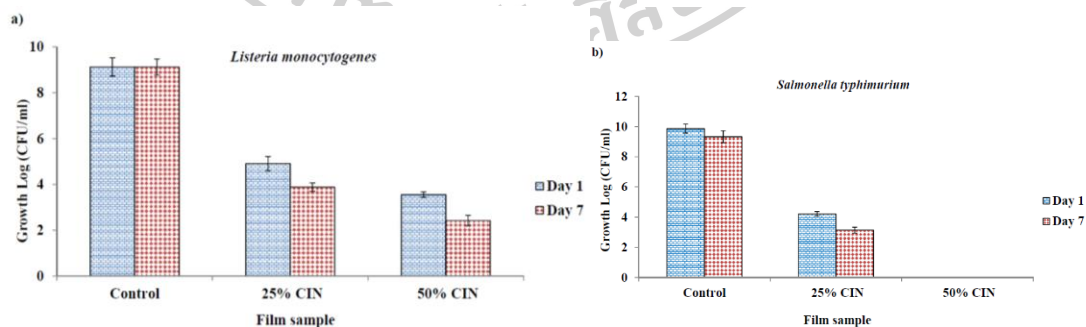
Sample	T_g (°C)	T_m (°C)	H_m (Jg ⁻¹)	T_c (°C)	H_c (Jg ⁻¹)	% X_{cc}
PLA:PEG (90:10)	39.30 ± 0.27a	146.94 ± 1.21a	17.69 ± 0.25a	98.05 ± 0.73a	22.56 ± 0.42a	32.86 ± 0.64a
PLA/PEG/25% CEO	16.42 ± 0.32b	133.21 ± 1.34b	15.46 ± 0.22b	70.27 ± 0.52b	18.98 ± 0.14b	27.66 ± 1.26b
PLA/PEG/50% CEO	6.81 ± 0.36c	127.42 ± 1.43c	13.94 ± 0.37c	63.09 ± 0.36c	16.16 ± 0.25c	14.41 ± 0.31c

Values are given as mean ± SD (n = 3).

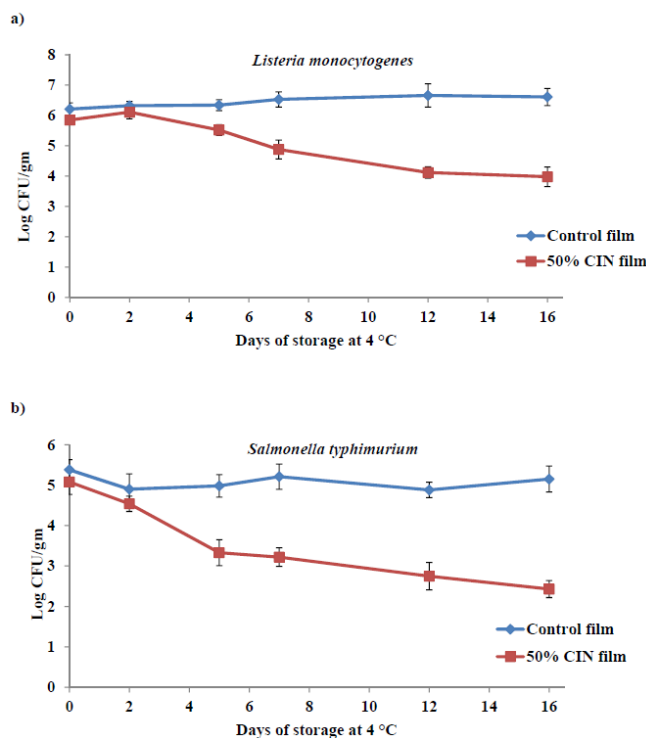
Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$).

นอกจากนี้ยังพบว่า Glass transition temperature (T_g) และ Melting temperature (T_m) มีค่าลดลงเมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยมากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2-9 เนื่องจากน้ำมันหอมระเหยอบเชยทำหน้าที่เป็น Plasticizer ซึ่งทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ง่ายมากขึ้น ถึงแม้ว่าการเป็น Plasticizer จะส่งผลต่อโครงสร้างส่วนอสัณฐาน (amorphous) ของพอลิเมอร์โดยการลดลงของค่า T_g อย่างไรก็ตามโมเลกุลของ Plasticizer ยังส่งผลต่อ Interface ระหว่างโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous) และสัณฐาน (crystalline) ดังนั้นจึงส่งผลต่อค่า T_m ด้วยเช่นกัน

และจากผลการนำฟิล์ม PLA/PEG ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย 25% และ 50% ไปทดสอบความสามารถในการต้านทานเชื้อ *L. monocytogenes* และ *S. typhimurium* หลังจากบ่มที่อุณหภูมิห้อง 1 และ 7 วัน ดังรูปที่ 2-27 พบว่าฟิล์มที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยมีความสามารถในการต้านทานเชื้อดังกล่าวได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติมน้ำมันหอมระเหย และนอกจากนี้ฟิล์มที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย 50% สามารถยับยั้งเชื้อ *L. monocytogenes* และ *S. typhimurium* ได้นานถึง 16 วัน โดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2-28 [32]



รูปที่ 2-26 ความสามารถในการต้านทานเชื้อของฟิล์ม PLA/PEG ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย 25 และ 50%w/w, PLA (a) *L. monocytogenes* และ (b) *S. typhimurium* หลังจากบ่มที่อุณหภูมิห้อง 1 และ 7 วัน [32]



รูปที่ 2-27 การเติบโตของ *L. monocytogenes* และ *S. typhimurium* ในเนื้อไก่เมื่อห่อด้วยฟิล์ม PLA/PEG และ PLA/PEG/505 CIN โดยเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 16 วัน [32]

จากงานวิจัยของ Puntipa Pongsumpun และคณะ [4] พบว่าน้ำมันหอมระเหยอบเชยมีความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของ *Aspergillus niger*, *Rhizopus arrhizus*, *Penicillium sp.*, และ *Colletotrichum gloeosporioides* ดังตารางที่ 2-10

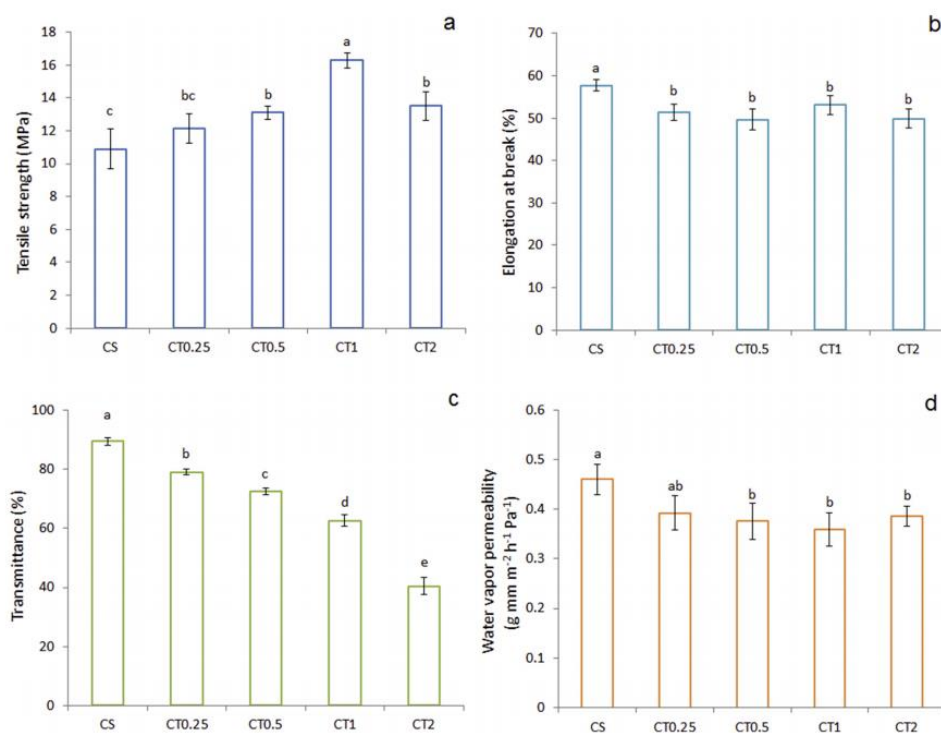
ตารางที่ 2-10 ผลการทดสอบ Antitifungal ของ CEO nanoemulsions และ Pure essential oil โดยใช้วิธี Disc diffusion method ของเชื้อ *A. niger*, *R. arrhizus*, *Penicillium sp.*, and *C. Gloeosporioides* [4]

Sample	Inhibition zone (mm)			
	<i>A. niger</i>	<i>R. arrhizus</i>	<i>Penicillium sp.</i>	<i>C. gloeosporioides</i>
CEO nanoemulsion	23.74 ^b ± 0.73	22.12 ^a ± 0.16	19.27 ^b ± 0.71	16.34 ^b ± 0.94
Amphotericin B	24.14 ^a ± 0.43	20.83 ^b ± 0.21	21.23 ^a ± 0.16	25.51 ^a ± 0.78
CEO coarse emulsion	12.29 ^c ± 0.52	10.43 ^c ± 0.87	9.31 ^c ± 0.63	7.62 ^c ± 0.35

The data with different superscripts within the same tested culture indicate a significant difference ($P \leq 0.05$).

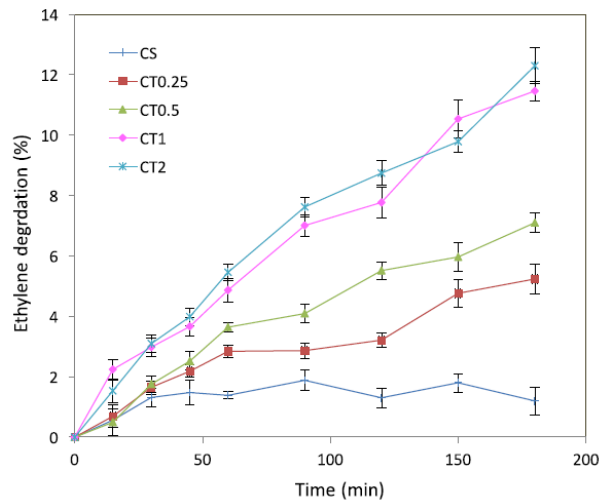
จากงานวิจัยของ Ubonrat Siripatrwan และคณะ [33] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการกำจัดแก๊สเอธิลีนและความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของ Chitosan-TiO₂ nanocomposite สำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร พบว่า Chitosan nanocomposite ที่มีการเติม TiO₂ ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ Tensile strength เพิ่มมากขึ้น โดย

มีค่าสูงสุดที่ 1%wtTiO₂ และลดลงที่ 2%wtTiO₂ โดย TiO₂ กระจายตัวใน Chitosan อย่างทั่วถึง จึงส่งผลให้ TiO₂ ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง (reinforcing filler) ให้กับเมทริกซ์ นอกจากนี้ค่า Elongation at break มีค่าลดลงเมื่อมีการเติม TiO₂ อาจเป็นผลมาจาก Hydrogen bond ระหว่าง -NH และ -OH ของ Chitosan และ TiO₂ ทำให้ความสามารถในการดึงยึดของฟิล์มต่ำ

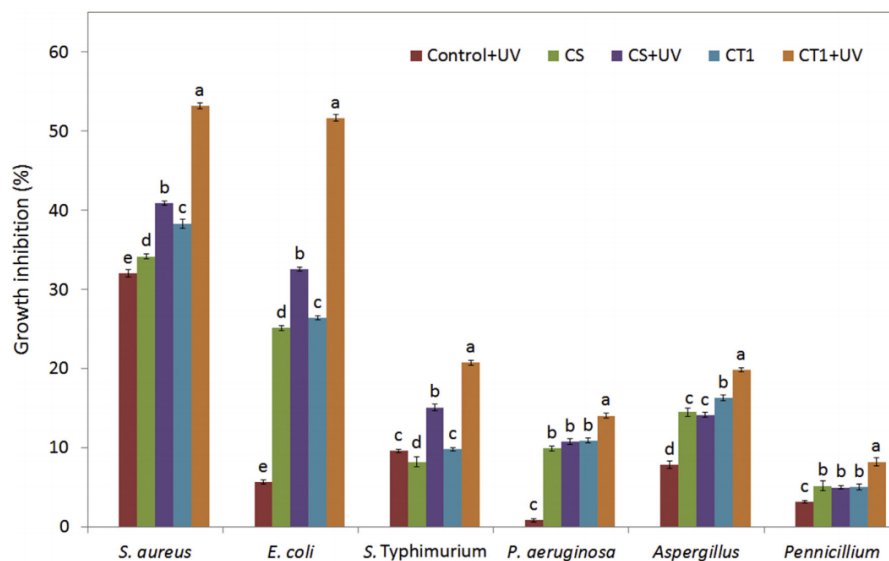


รูปที่ 2-28 (a) Tensile strength, (b) Elongation at break, (c) Optical transmittance และ (d) Water vapor permeability ของฟิล์ม Chitosan (CS) และ Chitosan-TiO₂ (CT) ที่เติม TiO₂ ปริมาณ 0.25 0.5 1 และ 2%wtTiO₂ (CT0.25 CT0.5 CT1 และ CT2 ตามลำดับ) [33]

จากผลการทดสอบ Water vapor permeability (WVP) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2-28 พบว่าฟิล์มที่มีการเติม TiO₂ ส่งผลให้ค่า WVP มีค่าลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ TiO₂ จาก 0.25%wt เป็น 2%wt พบว่าค่า WVP ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่า TiO₂ ปิดกั้นเส้นทางการแพร่ผ่านของไอน้ำในโครงสร้างของฟิล์ม



รูปที่ 2-29 Ethylene photocatalytic degradation ของ Chitosan (CS) และ Chitosan-TiO₂ (CT) nanocomposite film ที่มีการเติม TiO₂ ปริมาณ 0.25 0.5 1 และ 2%wt (CT0.25 CT0.5 CT1 และ CT2 ตามลำดับ) [33]



รูปที่ 2-30 ความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ (growth inhibition) ของฟิล์ม CT1 และ CS ที่มีการฉายและไม่ฉายรังสียูวีต่อเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*), แบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*, *S. Typhimurium*, *P. aeruginosa*) และเชื้อรา (*Aspergillus* และ *Penicillium*) [33]

และจากผลการทดสอบ Ethylene photocatalytic degradation ของ Chitosan-TiO₂ ต่อเวลาการฉายรังสียูวีและความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์แสดงดังรูปที่ 2-30 และ 2-31 พบว่าฟิล์ม Chitosan ที่มีการเติม TiO₂ ปริมาณมากขึ้น มีความสามารถในการกำจัด

แก๊สเอธิลีนและยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเมื่อทำการฉายรังสียูวีไปยังฟิล์ม ส่งผลให้อิเล็กตรอนบนพื้นผิวของ TiO_2 ถูกกระตุ้นจากชั้น Valence band ไปยัง Conduction band ซึ่งทำให้ชั้น Valence band เกิด Hole (h^+) เหลืออยู่หลังจากที่ e^- ถูกกระตุ้นไปแล้ว โดย h^+ ดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ H_2O หรือ Hydroxide ion (OH^-) ได้ ทำให้เกิด Hydroxyl radical ($\text{OH}\cdot$) ส่วน e^- ที่ถูกกระตุ้นไปยัง Conduction band จะสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับ O_2 ได้ ทำให้เกิด Superoxide ion (O_2^-) โดย $\text{OH}\cdot$ และ O_2^- คือ Reactive oxygen species (ROH) ซึ่งสามารถเกิด Oxidation กับ Polyunsaturated phospholipid ของเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้สัณฐานวิทยาของเชื้อจุลินทรีย์เปลี่ยนแปลงไป และทำให้เกิดการรั่วไหลของ Cytoplasm ซึ่งทำให้เซลล์หยุดการเจริญเติบโตในที่สุด และนอกจากนี้ ROS สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ Ethylene เกิดเป็น CO_2 และ H_2O



บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 เม็ด Poly (lactic acid) เกรด 2003D มีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 6 กรัม/10 นาที จากบริษัท พีซี โพลีเมอร์ส มาร์เก็ตติ้ง จำกัด ประเทศไทย

3.1.2 เม็ด Poly (butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) เกรด Ecoflex F Blend C1200 มีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 3.8 กรัม/10 นาที จากบริษัท พอลิแมทส์ จำกัด ประเทศไทย

3.1.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide; TiO₂) ชนิด P25 (มีปริมาณเฟส Rutile 12.57% และ Anatase 87.43%) ขนาดอนุภาค 21 นาโนเมตร จากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศไทย

3.1.4 น้ำมันหอมระเหยอบเชย (cinnamon oil) จากบริษัท เคมีภัณฑ์ จำกัด ประเทศไทย

3.1.5 ไดคลอโรมีเทน (dichloromethane) จากบริษัท อาร์ซีไอ แล็บสแกน จำกัด ประเทศไทย

3.1.6 ไดคิวมิล เปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide; DCP) จากบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศไทย

3.1.7 เชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* (*E. coli*) และ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) จากกรมวิชาการเกษตร

3.1.8 โซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride; NaCl) ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ จากบริษัท RCI Labscan จำกัด ประเทศไทย

3.1.9 อาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิด ได้แก่ Nutrient agar (NA) และ Nutrient broth (NB) จากบริษัท HiMedia Laboratories Pvt จำกัด ประเทศอินเดีย

3.2 เครื่องมือที่ใช้ดำเนินงานวิจัย

3.2.1 เครื่องหลอมอัดรีดพลาสติกแบบสกรูคู่ (co-rotating twin screw extruder) รุ่น SHJ-25 บริษัท Yongteng จากประเทศจีน สกรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร, ยาว 360 เซนติเมตร มีค่า L/D เท่ากับ 144

3.2.2 เครื่องหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์ม (cast film extruder) รุ่น LB-CR 150 บริษัท Labtech Engineering จำกัด จากประเทศไทย



รูปที่ 3-1 เครื่องหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์มที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มสูตรต่างๆ [34]

3.2.3 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) บริษัท Instron Engineering Corporation รุ่น Model 5969 ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3-2 เครื่อง Universal testing machine สำหรับทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม [35]

3.2.4 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) บริษัท Mettler Toledo รุ่น DSC-1 STAR System ประเทศสวิตเซอร์แลนด์



รูปที่ 3-3 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter [36]

3.2.5 เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) บริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/DSC-1 STAR System ประเทศสวิตเซอร์แลนด์



รูปที่ 3-4 เครื่อง Thermogravimetric Analyzer [37]

3.2.6 เครื่องทดสอบสมบัติการกั้นผ่านของออกซิเจน (oxygen Permeability Tester) บริษัท AMETEK รุ่น MOCON OX-TRAN® 2/22(L) ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3-5 เครื่อง Oxygen Permeability Tester [38]

3.2.7 เครื่อง Accelerated Weathering tester รุ่น QUV-SPRAY บริษัท Q-Lab Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3-6 เครื่อง Accelerated Weathering [39]

3.2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning Electron Microscope, SEM)
บริษัท Tescan รุ่น MIRA3 ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3-7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [40]

3.2.9 เครื่อง UV-Visible spectroscopy บริษัท SHIMADZU รุ่น UV-1800 ประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 3-8 เครื่อง UV-Visible spectroscopy [41]

3.2.10 เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) บริษัท SHIMADZU รุ่น LabX XRD-6100 ประเทศญี่ปุ่น



รูปที่ 3-9 เครื่อง X-ray diffractometer

3.2.11 เครื่องวัดค่าดัชนีการไหล (melt flow indexer) จากบริษัท KAYENESS ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3-10 เครื่องวัดค่าดัชนีการไหล

3.2.12 เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง (ultrasonic processor) รุ่น VC 750 บริษัท Sonics & Materials ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3-11 เครื่องกำเนิดคลื่นเสียงความถี่สูง

3.2.12 เครื่องฉายรังสียูวี บริษัท M-LAB Model WBN 30 ประเทศไทย



รูปที่ 3-12 เครื่องฉายรังสียูวี

3.2.13 เครื่อง Laminar flow cabinet สำหรับฆ่าเชื้อชิ้นงาน Model BSS-V800 จากบริษัท BIOBASE ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3-13 เครื่อง Laminar flow cabinet [42]

3.1.14 เครื่องฆ่าเชื้อ (digital Fuzzy control autoclave) บริษัท Daihan Scientific ประเทศเกาหลีใต้



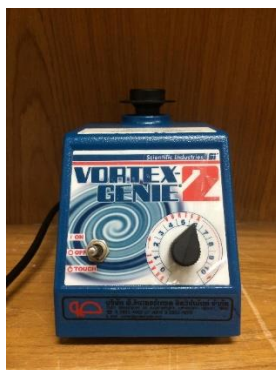
รูปที่ 3-14 เครื่องฆ่าเชื้อ [43]

3.1.15 เครื่องบ่มเชื้อ (incubator) บริษัท Daihan Scientific ประเทศเกาหลีใต้



รูปที่ 3-15 เครื่องบ่มเชื้อ [44]

3.1.16 เครื่องเขย่าสาร (vortex mixer) รุ่น G560E Vortex Mixer Genie 2 จากบริษัท Scientific Industries ประเทศสหรัฐอเมริกา



รูปที่ 3-16 เครื่องเขย่าสาร

3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 4 ตอน โดยฟิล์มที่ต้องการต้องผ่านข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม “ถุงพลาสติกสำหรับบรรจุอาหาร” มาตรฐานอุตสาหกรรมเลขที่ 1027-2553 ซึ่งระบุไว้ว่าต้องมีค่าความทนทานต่อแรงดึง ณ จุดขาดที่มากกว่าหรือเท่ากับ 11.8 MPa และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่มากกว่าหรือเท่ากับ 150%

ตอนที่ 1 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT เมื่อเติม DCP ปริมาณต่าง ๆ

ตารางที่ 3-1 ชื่อย่อและสัดส่วนการเติม DCP

Sample	DCP (phr)
PLA/PBAT/D0	0
PLA/PBAT/D03	0.03
PLA/PBAT/D06	0.06
PLA/PBAT/D1	0.1

ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ปริมาณ 0 0.03 0.06 และ 0.1 phr โดยเริ่มจากการอบเม็ด PLA และ PBAT ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ด PLA และ PBAT อัตราส่วน 70 และ 30 ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นแล้วมาผสมกับ DCP ที่ละลายในอะซิโตนเพื่อให้ DCP กระจายตัวได้ดี จากนั้นนำไปหลอมผสมด้วยเครื่องหลอมอัดรีดพลาสติกแบบสกรูคู่ (co-rotating twin screw extruder) โดยตั้งค่าอุณหภูมิตั้งแต่ Hopper ถึงหัว

ขึ้นรูป ดังนี้ 160 160 170 170 170 180 180 และ 180 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วรอบในการหมุนสกรู 60 รอบ/นาที เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านออกมาจากหัวขึ้นรูปจะมีลักษณะเป็น Extrudate จากนั้นนำ Extrudate ดังกล่าวไปตัดให้เป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์ม (cast film extruder) โดยตั้งอุณหภูมิตั้งแต่ Hopper ถึงหัวขึ้นรูป ดังนี้ 190 190 200 210 190 190 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการหมุนสกรู 25 รอบ/นาที โดยปรับการดึงฟิล์มให้มีความหนาอยู่ในช่วง 70-120 ไมโครเมตร โดยฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่ขึ้นรูปได้จะถูกนำไปศึกษาโครงสร้างทางเคมี ดัชนีการไหล ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกล จากนั้นเลือกปริมาณการเติม DCP ที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองตอนที่ 2 3 และ 4 ต่อไป

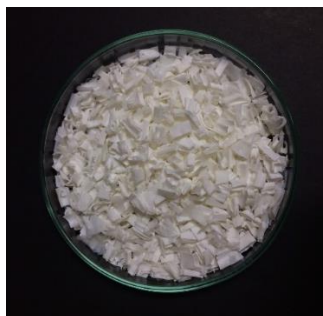
ตอนที่ 2 ศึกษาสมบัติของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ

ตารางที่ 3-2 ชื่อย่อและสัดส่วนการเติม TiO_2

Sample	TiO_2 (phr)
PLA/PBAT/Dx/T0	0
PLA/PBAT/Dx/T0.25	0.25
PLA/PBAT/Dx/T0.5	0.5
PLA/PBAT/Dx/T1	1
PLA/PBAT/Dx/T2	2

x คือ ปริมาณ DCP ที่ใช้ ซึ่งได้มาจากการทดลองตอนที่ 1

ทำการเตรียม Masterbatch PLA/PBAT/ TiO_2 ด้วยวิธี Solvent casting โดยทำการละลาย PLA และ PBAT อัตราส่วน 70 : 30 ใน Dichloromethane จากนั้นนำ TiO_2 4 phr ที่ผ่านการกระจายอนุภาคด้วยเครื่อง Ultrasonication เติลงในสารละลาย PLA/PBAT และเทสารละลายดังกล่าวลงในถาดแก้ว ตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง จากนั้นทำการตัดเป็นชิ้นขนาดเล็กจะได้ PLA/PBAT ที่มี TiO_2 กระจายตัวอยู่ในปริมาณที่เข้มข้น และนำไปเจือจางลงในแต่ละสูตรการผสม



รูปที่ 3-17 Masterbatch จากวิธี Solvent casting

ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณ 0.25 0.5 1 และ 2 phr โดยมีการเติม DCP ในปริมาณที่เลือกในการทดลองตอนที่ 1 โดยเริ่มจากทำการอบเม็ด PLA และ PBAT และ TiO_2 masterbatch ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำ PLA PBAT และ TiO_2 masterbatch ในปริมาณต่างๆ มาสเปร์ยด้วย DCP ในปริมาณที่เลือกในตอนต้นที่ 1 คลุกผสมให้ทั่ว จากนั้นนำไปหลอมผสมด้วยเครื่องหลอมอัดรีดพลาสติกแบบสกรูคู่ (co-rotating twin screw extruder) โดยตั้งค่าอุณหภูมิตั้งแต่ Hopper ถึงหัวขึ้นรูป ดังนี้ 160 160 170 170 170 180 180 และ 180 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วรอบในการหมุนสกรู 60 รอบ/นาที เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านออกมาจากหัวขึ้นรูปจะมีลักษณะเป็น Extrudate จากนั้นนำ Extrudate ดังกล่าวไปตัดให้เป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก จากนั้นนำคอมพอสิตสูตรต่าง ๆ มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์ม (cast film extruder) โดยตั้งอุณหภูมิตั้งแต่ Hopper ถึงหัวขึ้นรูป ดังนี้ 190 190 200 210 190 190 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการหมุนสกรู 25 รอบ/นาที โดยปรับการดึงฟิล์มให้มีความหนาอยู่ในช่วง 70-120 ไมโครเมตร โดยฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่ขึ้นรูปได้จะถูกนำไปศึกษาโครงสร้างผลึกความสามารถในการดูดกลืนแสง ความทึบแสงของฟิล์ม ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ความสามารถในการดูดซับแก๊สเอทิลีน และผลของเวลาในการฉายรังสียูวีเอต่อฟิล์ม (ค่าสี เสถียรภาพทางความร้อน) จากนั้นเลือกปริมาณการเติม TiO_2 ที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองตอนที่ 4 ต่อไป

ตอนที่ 3 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย ปริมาณต่างๆ

ตารางที่ 3-3 ชื่อย่อและสัดส่วนการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย (CEO)

Sample	CEO (phr)
PLA/PBAT/Dx/O0	0
PLA/PBAT/Dx/O2.5	2.5
PLA/PBAT/Dx/O5	5
PLA/PBAT/Dx/O7.5	7.5
PLA/PBAT/Dx/O10	10

x คือ ปริมาณ DCP ที่ใช้ ซึ่งได้มาจากการทดลองตอนที่ 1

ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณ 2.5 5 7.5 และ 10 phr โดยมีการเติม DCP ในปริมาณที่เลือกในการทดลองตอนที่ 1 โดยเริ่มจากทำการอบเม็ด PLA และ PBAT ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ด PLA และ PBAT อัตราส่วน 70 และ 30 ที่ผ่านการไล่ความชื้นแล้ว มาคลุกผสมกับ DCP ปริมาณที่เลือกในการทดลองตอนที่ 1 โดยละลาย DCP ในอะซิโตนและนำไปคลุกกับเม็ด PLA และ PBAT ที่เตรียมไว้ เพื่อให้ DCP กระจายตัวได้ดี จากนั้นนำน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่างๆคลุกผสมกับเม็ดพอลิเมอร์ที่เตรียมไว้ในถุงพลาสติกซิปล็อคและเขย่าให้ส่วนผสมเข้ากัน จากนั้นนำไปหลอมผสมด้วยเครื่องหลอมอัดรีดพลาสติกแบบสกรูคู่ (co-rotating twin screw extruder) โดยตั้งค่าอุณหภูมิตั้งแต่ Hopper ถึงหัวขึ้นรูป ดังนี้ 160 160 170 170 170 180 180 และ 180 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วรอบในการหมุนสกรู 60 รอบ/นาที เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านออกมาจากหัวขึ้นรูปจะมีลักษณะเป็น Extrudate จากนั้นนำ Extrudate ดังกล่าวไปตัดให้เป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์ม (cast film extruder) โดยตั้งค่าอุณหภูมิตั้งแต่ Hopper ถึงหัวขึ้นรูป ดังนี้ 190 190 200 210 190 และ 190 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการหมุนสกรู 25 รอบ/นาที โดยปรับการดึงฟิล์มให้มีความหนาอยู่ในช่วง 70-120 ไมโครเมตร โดยฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่ขึ้นรูปได้จะถูกนำไปศึกษาค่าสีของฟิล์ม ความทึบแสงของฟิล์ม ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติ

การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ จากนั้นเลือกปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองตอนที่ 4 ต่อไป

ตอนที่ 4 ศึกษาสมบัติของฟิล์มคอมพอลสิต PLA/PBAT ที่มีการเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ร่วมกับน้ำมันหอมระเหยอบเชย

ทำการเตรียม PLA/PBAT/Dx/Ty/Oz

โดย x คือ ปริมาณ DCP ที่เลือกใช้จากตอนที่ 1

y คือ ปริมาณ TiO_2 ที่เลือกใช้จากตอนที่ 2

z คือ ปริมาณน้ำมันหอมระเหยอบเชยที่เลือกใช้จากตอนที่ 3

โดยเริ่มจากการอบเม็ด PLA และ PBAT ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ด PLA และ PBAT อัตราส่วน 70 : 30 และ TiO_2 masterbatch ในปริมาณที่เลือกในตอนที่ 2 ที่ผ่านการไล่ความชื้นแล้ว มาสเปร์ยด้วย DCP ในปริมาณที่เลือกตอนที่ 1 คลุกผสมให้ทั่ว และนำไปผสมกับน้ำมันหอมระเหยอบเชยในปริมาณที่เลือกในตอนที่ 3 จากนั้นนำไปหลอมผสมด้วยเครื่องหลอมอัดรีดพลาสติกแบบสกรูคู่ (co-rotating twin screw extruder) โดยตั้งค่าอุณหภูมิตั้งแต่ Hopper ถึงหัวขึ้นรูป ดังนี้ 160 160 170 170 170 180 180 และ 180 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วรอบในการหมุนสกรู 60 รอบ/นาที เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านออกมาจากหัวขึ้นรูปจะมีลักษณะเป็น Extrudate จากนั้นนำ Extrudate ดังกล่าวไปตัดให้เป็นเม็ดด้วยเครื่องตัดเม็ดพลาสติก จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์ม (cast film extruder) โดยตั้งอุณหภูมิตั้งแต่ Hopper ถึงหัวขึ้นรูป ดังนี้ 190 190 200 210 190 และ 190 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการหมุนสกรู 25 รอบ/นาที โดยปรับการดึงฟิล์มให้มีความหนาอยู่ในช่วง 70-120 ไมโครเมตร โดยฟิล์มคอมพอลสิตที่ขึ้นรูปได้จะถูกนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติเชิงกล อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ สมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ความสามารถในการดูดซับแก๊สเอทีลิน และความสามารถในการทนทานต่อสภาพแวดล้อมโดยการเร่งสภาวะ

วิธีการทดสอบสมบัติต่างๆ

- การศึกษาสมบัติเชิงกล

การศึกษาสมบัติเชิงกลทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine บริษัท Instron Engineering Corporation รุ่น Model 5969 ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882 เริ่มจากตัดชิ้นงานฟิล์มตามทิศทางการออกจากหัวตาย (machine direction) ขนาด 1 x 4 ตารางนิ้ว วัดความหนาของแผ่นฟิล์ม 3 ตำแหน่ง จำนวน 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย โดยแต่ละสูตรการผสมใช้ชิ้นงานอย่างน้อย 10 ชิ้น ทำการทดสอบโดยตั้งระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงาน (grip) เท่ากับ 2 นิ้ว อัตราการดึงยึดชิ้นงาน 12.5 มิลลิเมตร/นาที และแรงที่ใช้ในการดึงเท่ากับ 5 กิโลนิวตัน โดยเครื่องทดสอบจะรายงานค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break

- การศึกษาสมบัติทางความร้อน

การศึกษาสมบัติทางความร้อน ทำการศึกษาด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) บริษัท Mettler Toledo รุ่น DSC-1 STAR System ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ โดยทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และใช้น้ำหนักชิ้นงาน 5 – 10 มิลลิกรัม บรรจุใน Aluminum pan โดยมีขั้นตอนการศึกษาในโหมดอุณหภูมิไม่คงที่ (temperature scan) ดังนี้

ขั้นตอน

1. คงอุณหภูมิคงที่ -50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที
2. ให้ความร้อนตั้งแต่ -50 ถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที
3. คงอุณหภูมิคงที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที
4. ให้ความร้อนตั้งแต่ 200 ถึง -50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที
5. คงอุณหภูมิคงที่ -50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที
6. ให้ความร้อนตั้งแต่ -50 ถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที
7. คงอุณหภูมิคงที่ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที

โดยจากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจะได้กราฟ DSC Thermogram ซึ่งงานวิจัยนี้จะพิจารณาขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่ 2 และขั้นตอนการทำให้

เย็นตัว โดยข้อมูลที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยอุณหภูมิคล้ายแก้ว (glass transition temperature; T_g) อุณหภูมิหลอมผลึก (melting temperature; T_m) อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดผลึก (crystallization temperature; T_c) อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดผลึกสมบูรณ์ (cold crystallization temperature; T_{cc}) สำหรับการคำนวณเปอร์เซ็นต์ผลึก (degree of crystallinity; $\%X_c$) คำนวณได้ดังสมการ

$$\%X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0 \times w} \times 100$$

$$\% \text{Normalized } X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_m^0 \times w} \times 100$$

โดย ΔH_m คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (จูล/กรัม), ΔH_m^0 คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวผลึก 100 เปอร์เซ็นต์ (PLA เท่ากับ 93 จูล/กรัม [45], PBAT เท่ากับ 114 จูล/กรัม [45]), w คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ PLA หรือ PBAT

- การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน ทำการศึกษาด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) บริษัท Mettler Toledo รุ่น TGA/DSC-1 STAR System ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ โดยทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 600 องศาเซลเซียส และใช้อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที โดยข้อมูลที่ได้จากเครื่อง TGA ได้แก่ อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนสูงสุด (degradation temperature; T_d)

- การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา ศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) รุ่น MIRA3 บริษัท Tescan ประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาบริเวณภาคตัดขวาง (cross section) ทำโดยการแช่ชิ้นงานในไนโตรเจนเหลว และทำการหักชิ้นงานโดยฉับพลัน สำหรับการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการเร่งสภาวะด้วยเครื่อง Accelerated weathering tester ทำการตัดชิ้นงานบางส่วนไปติดบน Stub โดยชิ้นงานที่ศึกษาพื้นผิวและรอยแตกจะถูกนำไปเคลือบด้วยทองคำก่อนการทดสอบ

- การศึกษาค่าดัชนีการไหล

การศึกษาค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ศึกษาโดยใช้เครื่อง Melt flow indexer ตามมาตรฐาน ASTM D1238 ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม

และให้อุณหภูมิหลอมก่อนทำการกด 3 นาที ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง คำนวณค่าเฉลี่ย โดยอยู่ในหน่วย กรัม/10 นาที

- **การศึกษาโครงสร้างทางเคมี**

การศึกษาโครงสร้างของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ศึกษาโดยใช้เครื่อง Fourier transform infrared spectrophotometer (FTIR) รุ่น Vertex 70 บริษัท BRUKER ประเทศเยอรมนี โดยทำการทดสอบด้วยโหมด Attenuated total reflection (ATR)

- **การศึกษาค่าความขุ่น**

การศึกษาค่าความขุ่นของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT สูตรต่างๆ ศึกษาโดยใช้เครื่อง UV-Visible spectrophotometer รุ่น UV-1800 บริษัท SHIMADZU ประเทศญี่ปุ่น โดยทำการทดสอบโดยใช้ชิ้นงานฟิล์มที่มีความยาวคลื่น 900 – 200 นาโนเมตร ในโหมด Absorption โดยรายงานผลในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Absorbance และ Wavelength (nm) โดยคำนวณค่าความขุ่น (opacity) ได้ดังสมการ

$$\text{Opacity} = \frac{\text{Absorbance at 600 nm}}{\text{Thickness of the film}}$$

- **การศึกษาโครงสร้างผลึก**

การศึกษาความเป็นผลึกของฟิล์มคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ศึกษาโดยใช้เทคนิค X-ray diffraction analysis (XRD) รุ่น Rigaku TTRAX III จากบริษัท RIGAKU AMERICANS CORPORATION ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยทำการเตรียมผง TiO_2 ใส่ลงในภาตทดสอบ และเตรียมฟิล์มคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT/ TiO_2 ใส่ลงในภาตทดสอบ จากนั้นนำไปทดสอบในช่วง 10 – 80 องศา อัตราเร็วในการทดสอบ 2 องศา/นาที ปริมาณกระแสไฟฟ้า (current) เท่ากับ 20 มิลลิแอมแปร์ และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (voltage) เท่ากับ 30 กิโลโวลต์ โดยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มฟลักซ์ (intensity) และค่ามุมของการเลี้ยวเบน (2θ)

- **การศึกษามลของการเร่งสภาวะ**

การศึกษามลของการเร่งสภาวะของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT สูตรต่างๆ ศึกษาด้วยเครื่อง Accelerated weathering tester รุ่น Q-UV SPRAY จากบริษัท Q-Lab Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยทำการทดสอบด้วยมาตรฐาน ASTM G154 cycle 2 UVB-313 0.63 $\text{W/m}^2/\text{nm}$ ความยาวคลื่น 310 nm โดยทำการฉายรังสี UV เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อุณหภูมิ 60 ± 3

องศาเซลเซียส และมีการใช้น้ำควบแน่นเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 ± 3 องศาเซลเซียส ต่อหนึ่งรอบการทดสอบ โดยทำการทดสอบจำนวน 5 รอบ

- การศึกษาอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

การศึกษาอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT สูตรต่างๆ ทำการศึกษาด้วยเครื่อง MOCON OX-TRAN® โมเดล 2/22(L) โดยใช้ช่วงการทดสอบของฟิล์ม 0.005 ถึง 2000 ซีซี/(ตารางเมตร.วัน) ภายใต้มาตรฐาน ASTM D3985 อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ก๊าซสำหรับทดสอบ 0 %RH ความชื้นสัมพัทธ์ก๊าซสำหรับพา 0 %RH และใช้พื้นที่ทดสอบ 5.64 ตารางเซนติเมตร โดยสามารถคำนวณอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนได้ดังสมการ

$$OTR = K_L a (C_S - C_L)$$

โดย $K_L a$ คือ Parameter oxygen transfer capacity, C_S คือ ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนอิ่มตัวที่ไม่มีแรงผลักดัน, C_L คือ ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่ละลายผ่านฟิล์มโดยมีแรงผลักดัน

- การศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

การศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ศึกษาโดยใช้สารดูดความชื้น โดยทำการอบซิลิกาเจลที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นตัดฟิล์มพอลิเมอร์ที่ต้องการทดสอบให้มีขนาดเท่ากับปากขวดทดสอบ จากนั้นนำซิลิกาเจลใส่ลงในขวดทดสอบประมาณ 4/5 ของขวด และนำฟิล์มที่ต้องการทดสอบมาปิดที่ปากขวดและพันรอบขวดด้วยพาราฟิล์มให้แนบสนิท จากนั้นนำขวดดังกล่าวไปชั่งน้ำหนักเริ่มต้น และนำไปวางไว้ใน Desiccator ที่อิ่มตัวไปด้วยไอของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในเท่ากับ 75 ± 5 %RH ที่อุณหภูมิห้อง ทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปที่เวลาแตกต่างกันจนน้ำหนักคงที่ และคำนวณอัตราการซึมผ่านของไอน้ำดังสมการ

$$WVTR = \frac{\text{Slope}}{\text{Area}}$$

โดย Slope คือ ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและน้ำหนักที่ชั่งได้, Area คือ พื้นที่ของปากภาชนะที่ใช้ในการทดสอบ

- การทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย

ทำการศึกษาการต้านเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิด ได้แก่ *Escherichia Coli (E.coli)* ซึ่งเป็นตัวแทนแบคทีเรียแกรมลบ และ *Staphylococcus Aureus (S.aureus)* ซึ่งเป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมบวก โดยทดสอบด้วยวิธี Dynamic shake flask โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

- ขั้นตอนการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อและสารละลายเชื้อจาก

เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง (nutrient agar; NA) โดยการชั่ง NA ปริมาณ 600 กรัม ทำละลายด้วยน้ำกลั่น 600 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนจนละลายหมด จากนั้นแบ่งสารละลาย NA ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร ปริมาณ 300 มิลลิลิตร จำนวน 2 ขวด จากนั้นปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยสำลีและอลูมิเนียมฟรอยล์ และนำไปฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งอัตไอน้ำ (autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นรอให้อุณหภูมิลดลงเหลือประมาณ 80 องศาเซลเซียส ทำการลนไฟปากขวดรูปชมพู่ด้วยตะเกียงแอลกอฮอล์ และเท NA ลงในงานเพาะเชื้อพลาสติกที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว โดยหมุนงานเพาะเชื้อเบาๆ เพื่อให้ NA กระจายทั่วและไม่เกาะกลุ่มหนาเกินไป และเมื่อ NA แข็งตัวแล้ว ควรงานเพาะเชื้อใส่ลงในตู้ร้อน เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อรอนำไปใช้งานต่อไป

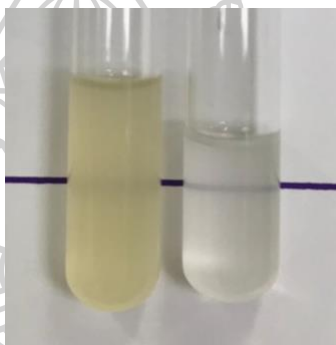
เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว (nutrient broth; NB) โดยการชั่ง NB ปริมาณ 13 กรัม ทำละลายด้วยน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนจนละลายหมด จากนั้นแบ่งสารละลาย NB ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปริมาณ 50 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด (ตามปริมาณตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ) จากนั้นปิดปากขวดด้วยสำลีและอลูมิเนียมฟรอยล์ และเปิดสารละลาย NB ส่วนที่เหลือใส่ลงในหลอดทดลอง หลอดละ 5 มิลลิลิตร จำนวน 5 หลอด ทำการปิดปากหลอดทดลองด้วยฝาพลาสติกและหุ้มด้วยอลูมิเนียมฟรอยล์ จากนั้นนำขวดรูปชมพู่และหลอดทดลองดังกล่าวไปฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง Autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที สำหรับขวดรูปชมพู่รอให้เย็นและเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง ส่วนหลอดทดลองเก็บไว้ในตู้เย็นเพื่อรอนำไปใช้งานต่อไป

เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 0.85 เปอร์เซ็นต์ โดยการชั่ง NaCl 99 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนัก 8.59 กรัม ทำละลายด้วยน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนจนละลายหมด จากนั้นเปิดใส่ลงในหลอดทดลอง หลอดละ 4.5 มิลลิลิตร (1 ตัวอย่างทดสอบใช้ 9 หลอดทดลอง) ทำการปิดปากหลอดทดลองด้วยฝาพลาสติกและหุ้มด้วยอลูมิเนียมฟรอยล์ จากนั้นนำหลอดทดลองดังกล่าวไปฆ่าเชื้อด้วยเครื่อง Autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อรอนำไปใช้งานต่อไป

- ขั้นตอนการเตรียมเชื้อแบคทีเรียสำหรับทดสอบ

นำเชื้อแบคทีเรียเข้มข้นที่ถูกเก็บไว้ในตู้เย็น ออกมาไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้อุณหภูมิลดลง จากนั้นนำ Loop ลนไฟให้ร้อนแดง และเชื้อแบคทีเรียออกมา 1 Loop และลากเชื้อ (steak) เป็นแนวระนาบ 4 ระนาบ ลงบนอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง ซึ่งแต่ละระนาบจะลากผ่านบริเวณก่อนหน้า โดยแต่ละบริเวณเมื่อเริ่มต้นลากใหม่ต้องทำการลน Loop ให้ร้อนแดงทุกครั้ง เพื่อเป็นการลดจำนวนเชื้อ

แบคทีเรีย จากนั้นนำจานเพาะเชื้อดังกล่าวไปบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเมื่อนำออกมาจากตู้บ่มจะได้เชื้อแบคทีเรียโคโลนีเดี่ยวอยู่บนจานเพาะเชื้อ จากนั้นนำ Loop หลนไฟให้ร้อนแดง สะบัดให้พอหายร้อน และทำการสะกิดโคโลนีเดี่ยว 3 โคโลนี ใส่ลงในหลอด NB ที่เตรียมไว้ โดยหลนไฟปากหลอดทดลองทุกครั้งที่เปิดและปิดฝา จากนั้นนำไปบ่มในตู้บ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเมื่อครบเวลาแล้วนำไปเทียบความขุ่นกับสารละลายที่เตรียมได้จากวิธี McFARLAND โดยเป็นสารละลายผสมระหว่างแบเรียมคลอไรด์ ($BaCl_2$) 1 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร และ กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) 1 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ 9.9 มิลลิลิตร ซึ่งเป็น McFARLAND SCALE ลำดับที่ 1 ซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับแบคทีเรีย 3×10^8 CFU/ml ดังรูปที่ 3-18



รูปที่ 3-18 การเทียบความขุ่นของสารละลายเชื้อแบคทีเรีย (หลอดด้านซ้าย) กับสารมาตรฐาน McFARLAND SCALE ลำดับที่ 1 (หลอดด้านขวา)

- ขั้นตอนการทดสอบและบ่มเชื้อ

นำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ต้องการทดสอบมาตัดให้มีขนาด 1×1 ตารางเซนติเมตร โดยกำหนดให้แต่ละสูตรมีน้ำหนัก 3 กรัม และนำไปใส่ลงในจานเพาะเชื้อ จากนั้นนำไปฆ่าเชื้อด้วยรังสียูวี ด้านละ 15 นาที (สำหรับการทดสอบในตอนที่ 2 มีการเปลี่ยนแปลงเวลาการฉายรังสียูวีเอ 1 2 และ 3 ชั่วโมง เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาในการฉายรังสียูวีเอต่อการทำงานของ TiO_2) จากนั้นคีบฟิล์มมาใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มี NB อยู่ 50 มิลลิลิตร ด้วย Forceps ที่หลนไฟแล้ว โดยก่อนและหลังใส่ฟิล์มลงในขวดรูปชมพู่ต้องหลนไฟที่ปากขวดทุกครั้ง จากนั้นใช้ไมโครปิเปตดูดเชื้อแบคทีเรียที่เตรียมได้ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ขวดละ 200 ไมโครลิตร เขย่าขวดเป็นวงกลมเพื่อให้เชื้อกระจายทั่วขวด และนำไปบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- ขั้นตอนการเจือจางเชื้อแบคทีเรีย

ทำการเจือจางเชื้อแบคทีเรียลงครั้งละ 10 เท่า (10-fold serial dilutions) โดยใช้ไมโครปิเปตดูดเชื้อแบคทีเรียจากขวดรูปชมพู่ที่บ่มแล้วปริมาณ 500 ไมโครลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง

สารละลาย NaCl เจือจางที่เตรียมไว้หลอดที่ 1 และใช้เครื่อง Vortex เขย่าเพื่อให้สารละลายเข้ากันได้ ดี จากนั้นปิเปตเชื้อแบคทีเรียจากหลอดที่ 1 ปริมาณ 500 ไมโครลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองสารละลาย NaCl เจือจางหลอดที่ 2 ทำซ้ำเช่นนี้จนครบทั้ง 9 หลอด หลังจากทำการเจือจางเสร็จแล้ว นำเชื้อแบคทีเรียในหลอดทดลองที่ 7 8 และ 9 มาหยดลงบนจานเพาะเชื้อที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อแข็ง (NA) โดยแบ่งครึ่งจานเพาะเชื้อเป็น 2 ด้าน หยดด้านละ 10 หยด หยดละ 10 ไมโครลิตร จนครบทุกสูตร จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- ขั้นตอนการนับจำนวนเชื้อแบคทีเรีย

หลังจากบ่มเสร็จแล้ว เลือกจานเพาะเชื้อที่มีการเจริญเติบโตของโคโลนีชัดเจน ไม่เบาบางหรือแออัดเกินไปจำนวน 1 ความเข้มข้น นับจำนวนเชื้อโคโลนี และนำมาคำนวณปริมาณเชื้อแบคทีเรีย (CFU/ml) และเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย (%Reduction)

$$\text{ปริมาณเชื้อแบคทีเรีย (CFU/ml)} = \frac{\text{จำนวนโคโลนีที่นับได้บนจานเพาะเชื้อ} \times \text{Dilution factor}}{\text{ปริมาตรของแบคทีเรียที่นำมาเลี้ยงบนอาหาร (ml)}}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย (%Reduction)} = \frac{A-B}{A} \times 100$$

โดย A คือ ปริมาณเชื้อแบคทีเรีย (CFU/ml) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารต้านเชื้อแบคทีเรีย

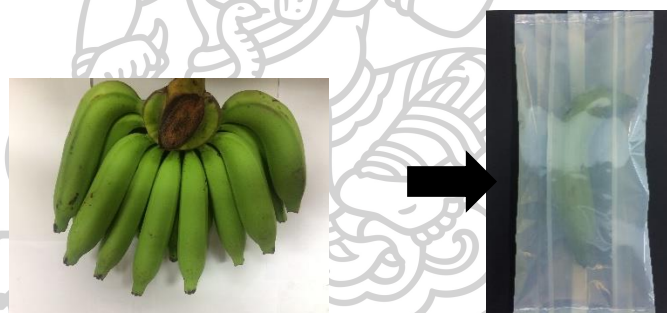
B คือ ปริมาณเชื้อแบคทีเรีย (CFU/ml) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารต้านเชื้อแบคทีเรีย

ตารางที่ 3-4 Dilution factor ของแต่ละหลอดทดลอง

หลอดทดลองที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Concentration of Bacteria (CFU/ml)	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
Dilution factor	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9

- ความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์กำจัดแก๊สเอทิลินและยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์

นำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการเติม TiO_2 และน้ำมันหอมระเหยอบเชย ซึ่งมีความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย มาทดสอบความสามารถในการเป็นบรรจุภัณฑ์ โดยใช้สตรอว์เบอร์รี่เป็นตัวแทนในการศึกษาความสามารถในการยับยั้งเชื้อรา ซึ่งจัดซื้อสตรอว์เบอร์รี่ที่มีขนาดผลและสีที่ใกล้เคียงกันจากห้างสรรพสินค้า และสำหรับความสามารถในการกำจัดแก๊สเอทิลิน ใช้กล้วยเป็นตัวแทนในการศึกษา ซึ่งทำการเลือกกล้วยหอมที่มีสีเขียวเข้มและเป็นกล้วยจากหวีเดียวกันในการทดสอบ โดยตัดฟิล์มขนาด 10×4.5 ตารางนิ้ว สำหรับบรรจุกล้วย และฟิล์มขนาด 5×5 ตารางนิ้ว สำหรับบรรจุสตรอว์เบอร์รี่ เมื่อนำผลไม้ใส่ลงในบรรจุภัณฑ์แล้ว ปิดผลึกให้ครบทุกด้าน สำหรับกล้วยนำไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 วัน ส่วนสตรอว์เบอร์รี่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน สังเกตการเปลี่ยนแปลงและถ่ายภาพเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง



รูปที่ 3-19 การทดสอบความสามารถในการดูดจับแก๊สเอทิลิน



รูปที่ 3-20 การทดสอบความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิ(บิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทอเรพทาเรท) สำหรับยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้ ซึ่งในปัจจุบันแนวโน้มในการใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกมากขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่บรรจุภัณฑ์ดังกล่าวมักเป็นพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในการจัดการขยะและมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการใช้บรรจุภัณฑ์จากพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจต่อสถานการณ์ในปัจจุบัน แต่สำหรับฟิล์มบรรจุภัณฑ์ผลไม้จำเป็นต้องมีความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียและชะลอการสุก เพื่อลดอัตราการเน่าเสียของผลไม้ เนื่องจากแบคทีเรียและแก๊สเอทิลีนเป็นสาเหตุทำให้ผลไม้เน่าเสีย อายุการเก็บรักษาสั้น และก่อให้เกิดโรคทางเดินอาหารได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิด (PLA) และพอลิ(บิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทอเรพทาเรท) (PBAT) โดยทำการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Dicumyl peroxide (DCP) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสาน (compatibilizer) จากนั้นทำการเติม Titanium dioxide (TiO₂) ในปริมาณต่างๆ เพื่อทำหน้าที่เป็นสารกำจัดเอทิลีน (ethylene scavenger) และยับยั้งการเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (antimicrobial agent) และนำปริมาณการเติม TiO₂ ที่เหมาะสมไปศึกษาต่อร่วมกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย (cinnamon essential oil, CEO) ที่ทำหน้าที่ยับยั้งการเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (antimicrobial agent) ในปริมาณที่เหมาะสม จากนั้นทำการศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มคอมพอสิต ได้แก่ สมบัติเชิงกล ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติการกันผ่านแก๊สออกซิเจน อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ความทนทานต่อสภาพอากาศจำลอง ความสามารถในการกำจัดแก๊สเอทิลีน สมบัติการต้านการเติบโตของเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT เมื่อเติม DCP ปริมาณต่างๆ และเลือกปริมาณ DCP ที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาส่วนที่ 2 3 และ 4

ส่วนที่ 2 ศึกษาสมบัติของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT เมื่อเติม TiO₂ ปริมาณต่างๆ และเลือกปริมาณ TiO₂ ที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาส่วนที่ 4

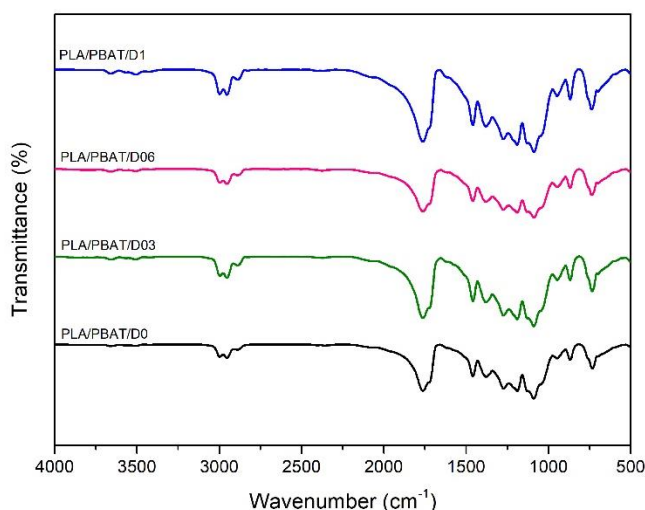
ส่วนที่ 3 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT เมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยปริมาณต่างๆ และเลือกปริมาณน้ำมันหอมระเหยอบเชยที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาส่วนที่ 4

ส่วนที่ 4 ศึกษาสมบัติของฟิล์มคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT ที่มีการเติมสารชนิดต่างๆตามปริมาณที่เหมาะสมจากตารางที่ 3-1, 3-2 และ 3-3

ตอนที่ 1 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่ปริมาณ DCP ต่าง ๆ

ในตอนต้นที่ 1 ได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ในอัตราส่วน 70 : 30 โดยมีการเติม Dicumyl peroxide (DCP) ในปริมาณ 0.03 0.06 และ 0.1 phr เพื่อทำหน้าที่เป็น Free radical initiator ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT จากนั้นทำการศึกษาโครงสร้างทางเคมี ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ดัชนีการไหล สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกล

1. การศึกษาโครงสร้างทางเคมี ด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

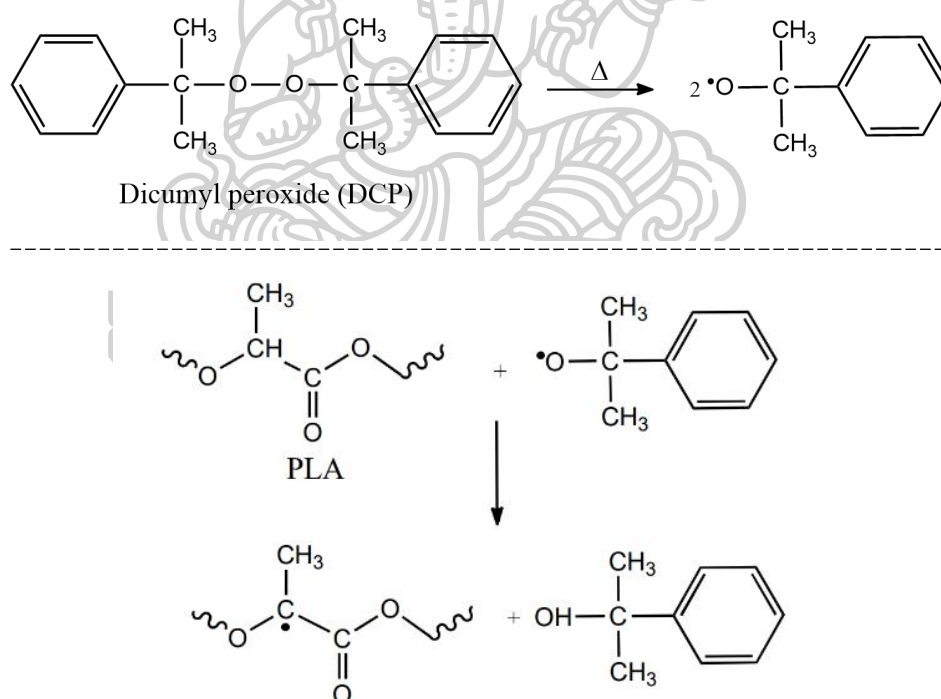


รูปที่ 4-1 FTIR spectra ของ PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ปริมาณต่าง ๆ

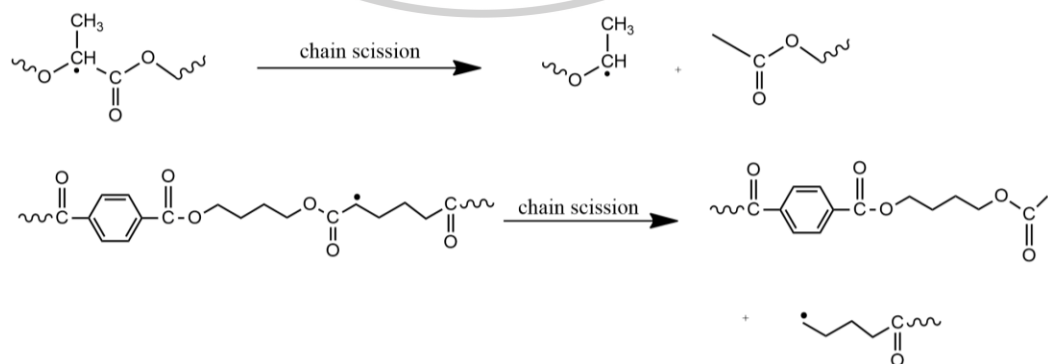
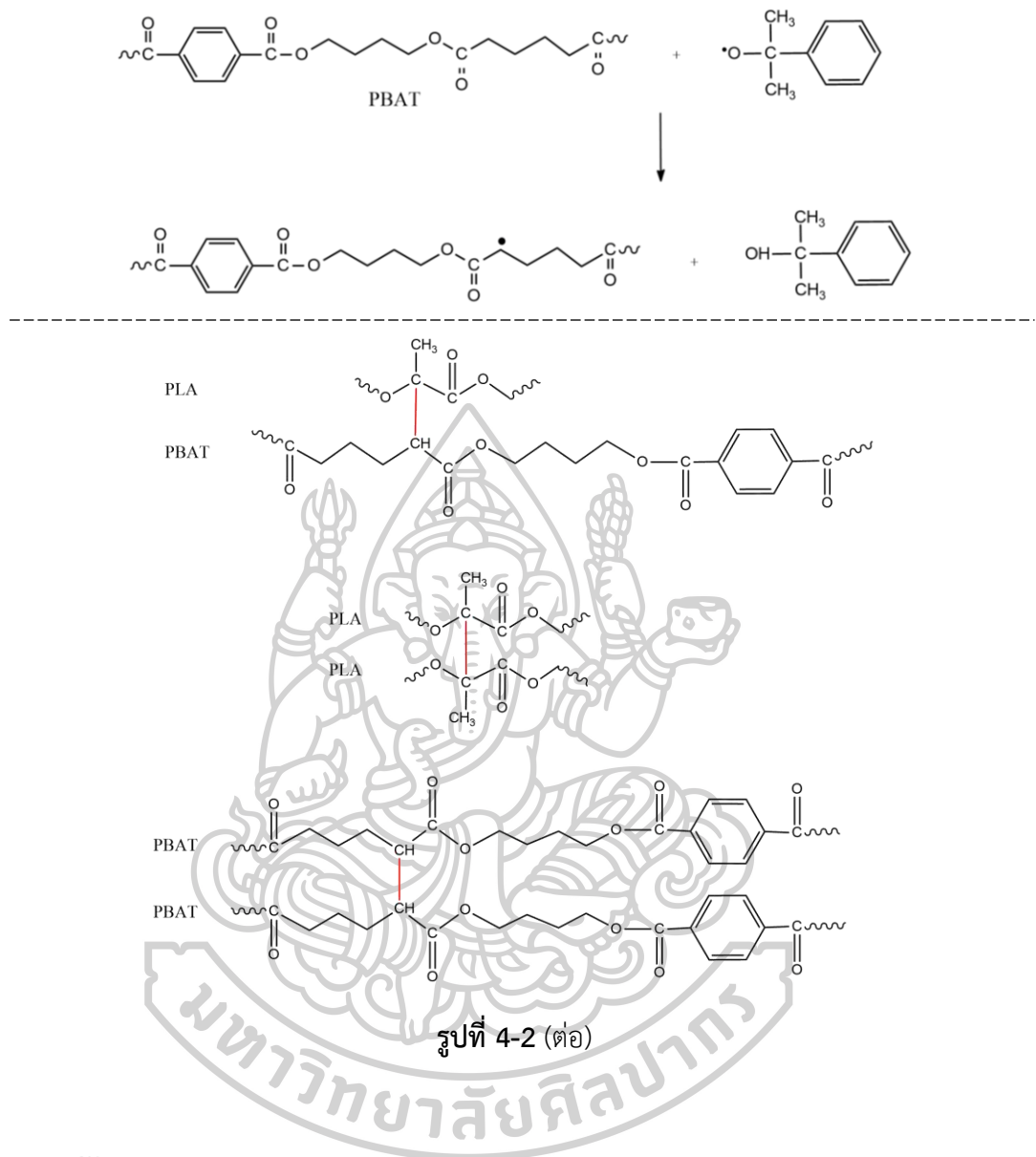
ผลการศึกษาโครงสร้างทางเคมีของ PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ปริมาณ 0 0.03 0.06 และ 0.1 phr ด้วยเทคนิค FTIR แสดงดังรูปที่ 4-1 พบว่า PLA/PBAT ปรากฏพีคที่เลขคลื่น (wavenumber) 2996 1762 1459 และ 1089 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคแสดงเอกลักษณ์ของ C-H stretching, C=O stretching, CH_3 bending (C=C aromatic) และ C-O stretching ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yun-Xuan Weng และคณะ [46] และเมื่อพิจารณาการเติม DCP ลงใน PLA/PBAT จะไม่พบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมีจากการทดสอบด้วยเทคนิค FTIR ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dandan Wu และคณะ [47] ที่ทำการศึกษาผลของการเติม Reactive

compatibilizer ต่อสมบัติของ PBAT/PLA โดยเติม DCP ปริมาณ 0.3 phr พบว่า FTIR spectra ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับ FTIR spectrum ของ PBAT/PLA

โดยเมื่อ DCP ได้รับความร้อนในระหว่างการผลิตนั้นจะเกิดการแตกตัวเป็น Free radical ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่ PLA และ PBAT โดยการดึงเอาอะตอมไฮโดรเจนออก ทำให้บนสายโซ่ของ PLA และ PBAT มี Free radical เกิดขึ้น ดังนั้น PLA radical และ PBAT radical จึงเข้าทำปฏิกิริยากัน อาจเกิดเป็น PLA-PBAT, PLA-PLA และ/หรือ PBAT-PBAT ดังรูปที่ 4-2 โดย Radical จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง α -C ของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อ Free radical เข้าทำปฏิกิริยากันจะเกิดเป็นพันธะ C-C ซึ่งพันธะดังกล่าวไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ FTIR spectrum เนื่องจากโครงสร้างของ PLA และ PBAT ปรากฏพิกัด C-C เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังอาจเกิดการขาดออกของสายโซ่ (chain scission) เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาจาก Free radical ในสายโซ่ของ PLA และ PBAT ได้ดังรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง PLA radical และ PBAT radical โดยมี DCP เป็น Free-radical initiator [48]

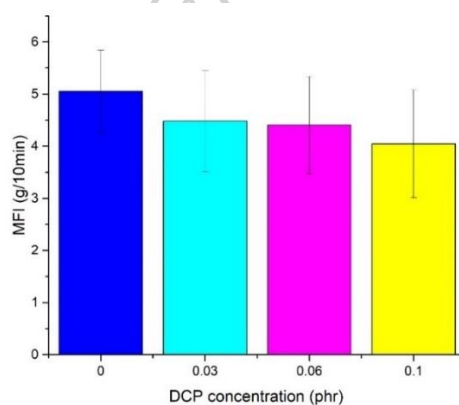


รูปที่ 4-3 กลไกการเกิดการขาดออกของสายโซ่ของ PLA และ PBAT เมื่อทำปฏิกิริยากับ DCP [48]

2. การศึกษาดัชนีการไหล (melt flow index; MFI)

ตารางที่ 4-1 ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ปริมาณต่าง ๆ

Sample	MFI (g/10min)
PLA/PBAT/D0	5.05 ± 0.98
PLA/PBAT/D03	4.48 ± 0.98
PLA/PBAT/D06	4.41 ± 0.93
PLA/PBAT/D1	4.05 ± 1.04



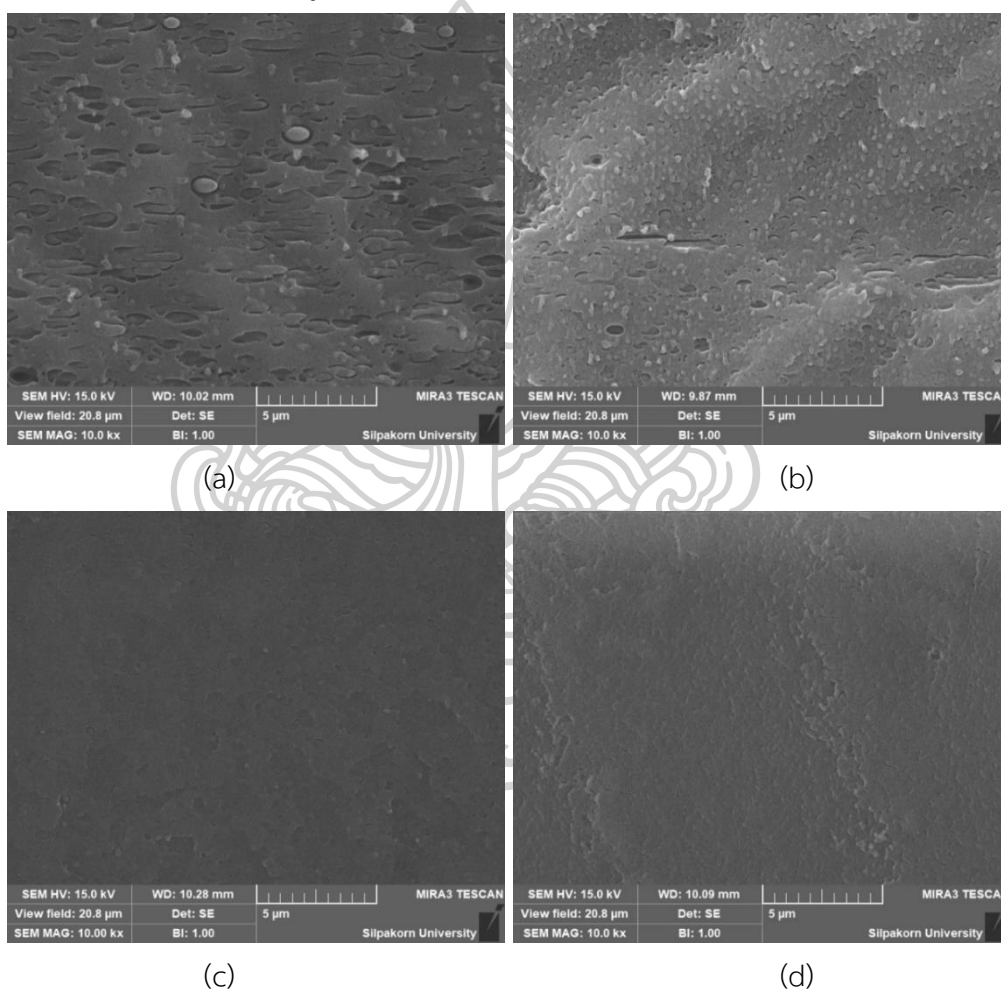
รูปที่ 4-4 ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ปริมาณต่าง ๆ

จากการศึกษาดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT แสดงดังรูปที่ 4-4 พบว่าเมื่อมีการเติม DCP มากขึ้น ส่งผลให้ดัชนีการไหลมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ DCP ทำหน้าที่เป็น Free radical initiator ดังปฏิกิริยาที่แสดงในรูปที่ 4-2 ซึ่งจะพบการเชื่อมโยงของสายโซ่พอลิเมอร์ เกิดเป็นโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น ทำให้การไหลของพอลิเมอร์ผสมเกิดได้ยากขึ้น ดังนั้นเมื่อใช้ปริมาณ DCP มากขึ้น จะทำให้เกิด Free radical ในปริมาณที่มากขึ้น โมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงส่งผลให้ดัชนีการไหลมีแนวโน้มลดลง แต่อย่างไรก็ตามไม่ได้มีค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

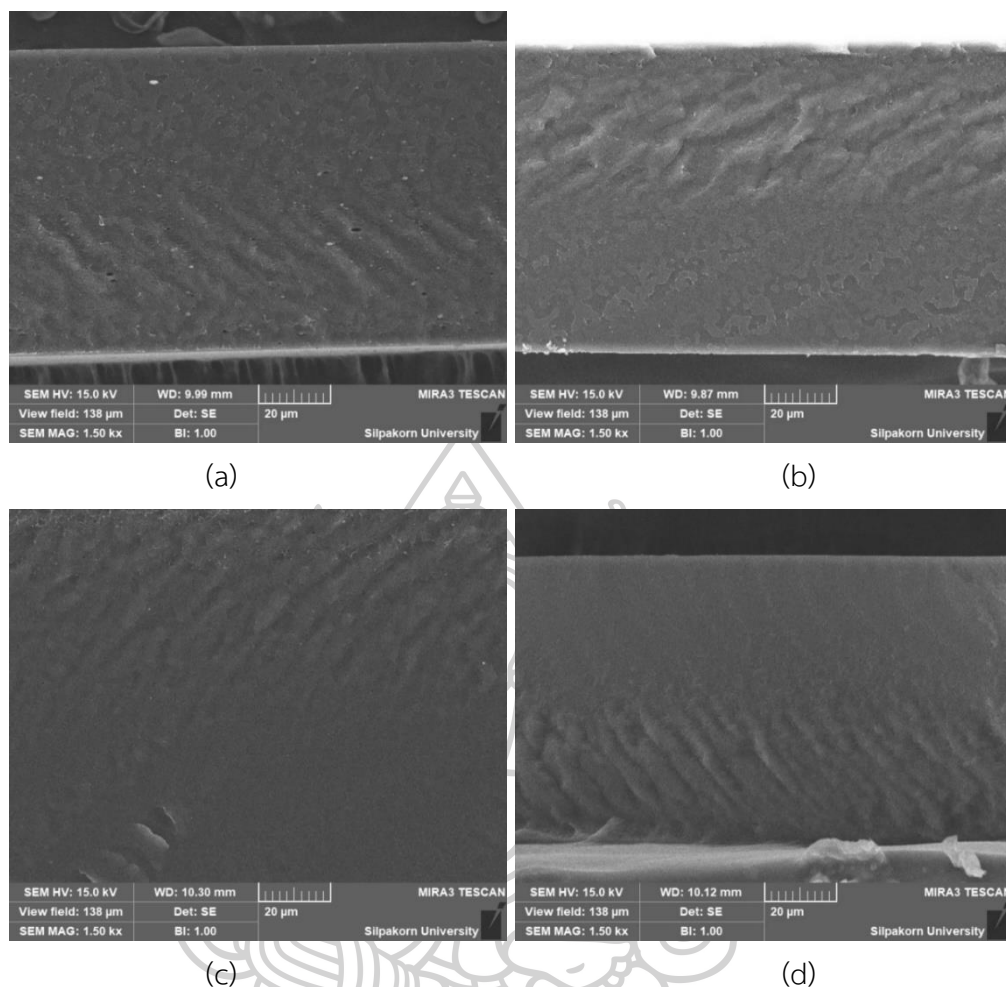
3. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PLA/PBAT ได้ทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) โดยชิ้นงานฟิล์มถูกนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลว และทำให้แตกหักอย่างรวดเร็ว โดยรูปที่ 4-5 แสดงภาพภาคตัดขวางของชิ้นงานที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT อัตราส่วน 70 : 30 ที่ไม่มีการเติม

Dicumyl peroxide (DCP) (รูป 4-5 (a)) มีการแยกออกเป็น 2 วัฏภาคอย่างชัดเจน โดย PLA เป็นวัฏภาคหลักและ PBAT เป็นวัฏภาคกระจาย นอกจากนี้ยังพบร่องรอยของการหลุดออกของ PBAT เกิดเป็นช่องว่างขึ้น ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่า PLA และ PBAT ไม่มีความเข้ากัน (immiscible blend) [49] และเมื่อเติม DCP ปริมาณที่มากขึ้นลงใน PLA/PBAT จะทำให้ฟิล์มของพอลิเมอร์ผสม PLA และ PBAT มีความเข้ากันได้มากขึ้นและมีการยึดติดระหว่างวัฏภาคเพิ่มมากขึ้น [36] โดยวัฏภาคกระจายของ PBAT มีขนาดที่เล็กลงตามปริมาณการเติม DCP (รูป 4-5 (b-c)) จนแทบจะเป็นวัฏภาคเดียวที่ปริมาณการเติม DCP 0.1 phr (รูปที่ 4-5 (d))



รูปที่ 4-5 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง (cross section) ที่ได้จากเทคนิค SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ในปริมาณ (a) 0, (b) 0.03, (c) 0.06 และ (d) 0.1 phr ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

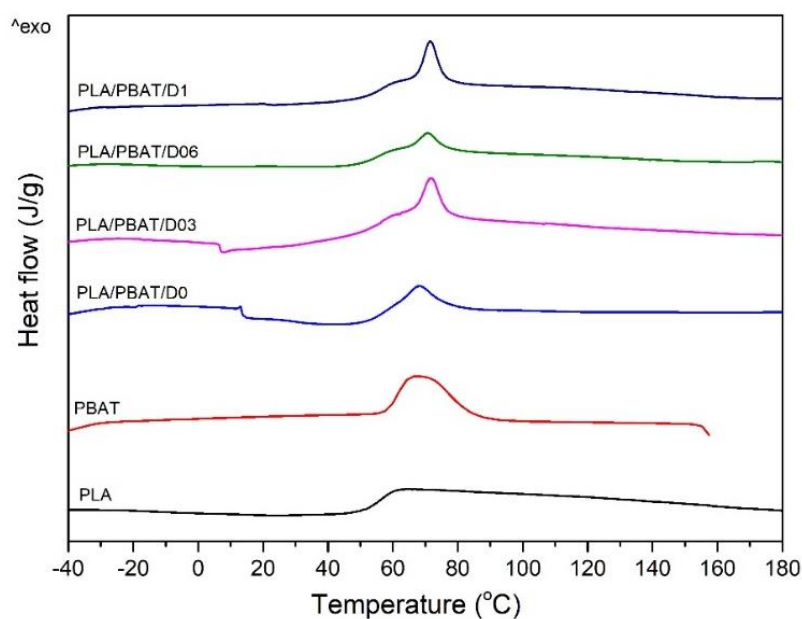


รูปที่ 4-6 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง (cross section) ที่ได้จากเทคนิค SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ในปริมาณ (a) 0, (b) 0.03, (c) 0.06 และ (d) 0.1 phr ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

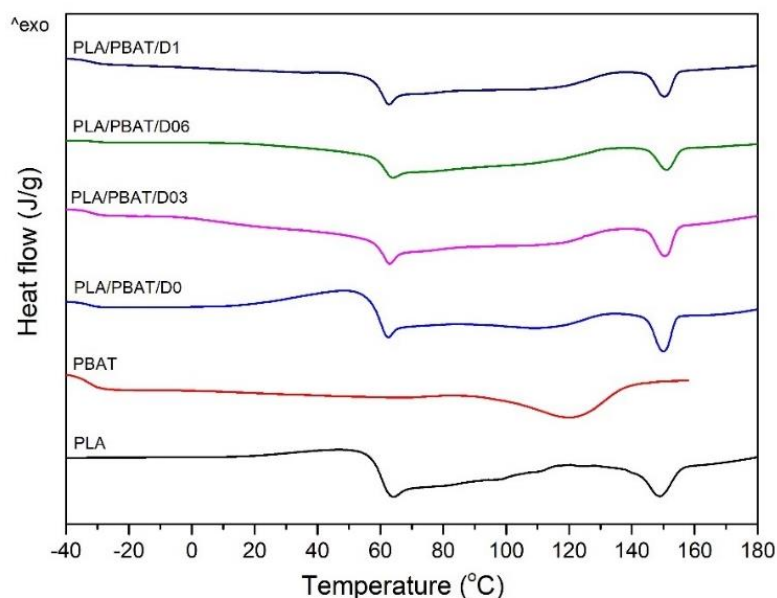
เพื่อที่จะแสดงให้เห็นรูปแบบการแตกหักของฟิล์มจึงได้ทำการศึกษาภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 1,500 เท่า โดยแสดงดังรูปที่ 4-6 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่ไม่มีการเติม DCP จะยังพบการแบ่งแยกวัฏภาคระหว่าง PLA และ PBAT นอกจากนี้ยังพบร่องรอยการหลุดออกของวัฏภาคกระจายของ PBAT และพื้นผิวการแตกหักมีความขรุขระ และเมื่อปริมาณการเติม DCP มากขึ้น การแบ่งแยกระหว่างวัฏภาคเกิดน้อยลง บริเวณพื้นผิวการแตกหักมีบริเวณที่มีความเรียบมากขึ้น บ่งบอกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีลักษณะการแตกหักแบบเปราะมากขึ้น (brittle failure) ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4-5 โดยที่ปริมาณการเติม DCP 0.1 phr แทบจะไม่พบการแบ่งแยกวัฏภาคระหว่าง PLA กับ PBAT (รูปที่ 4-5 (d)) เป็นการบ่งบอกว่า Interfacial adhesion ระหว่าง PLA และ PBAT ดีขึ้นเมื่อเติม

DCP มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Piming Ma และคณะ [36] ที่ทำการศึกษาความเข้ากันได้ของ PLA และ PBAT โดยใช้ DCP เป็น Free-radical initiator พบว่าขนาดวัฏภาคกระจายของ PBAT ลดลงจาก 1.0 ไมโครเมตร เป็น 0.6 ไมโครเมตร และกระจายตัวสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อเติม DCP 0.1%wt โดยพบความแตกต่างระหว่างวัฏภาคน้อยลง ซึ่งบ่งบอกว่าวัฏภาคมีการยึดเกาะกันได้แข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากการเกิด In-situ compatibilization โดยปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดบริเวณ Interface วัฏภาคกระจายของ PBAT และวัฏภาคหลักของ PLA ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงเป็นสายโซ่ที่ยาวขึ้นหรือเกิดเป็นสายโซ่กิ่งหรือเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่บางส่วน [36]

4. การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)



รูปที่ 4-7 DSC Thermograms ในขั้นตอนการทำให้เย็นตัวของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4-8 DSC Thermograms ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ปริมาณต่าง ๆ

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อน ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4-7, 4-8 และตารางที่ 4-2 เมื่อพิจารณาค่า Crystallization temperature (T_c) ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D0 พบว่าปรากฏ T_c เพียง 1 ตำแหน่ง ซึ่งเป็นตำแหน่งการตกผลึกของ PBAT เนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกับ T_c ของ Pure PBAT (โดย Pure PLA มี T_c เท่ากับ 102.20 องศาเซลเซียส [50]) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Phasawat Chaiwutthinan และคณะ [49] ที่ทำการศึกษาค่าผลของอัตราส่วนการผสมของ PLA และ PBAT จาก DSC thermograms พบว่า Pure PLA ไม่ปรากฏพิกัด T_c เนื่องจาก PLA มีอัตราการตกผลึกช้า และอัตราการเย็นตัวที่ใช้ในการทดสอบ (10 องศาเซลเซียส/นาที) เร็วจนกระทั่ง PLA ไม่สามารถตกผลึกได้ทัน และเมื่อพิจารณา PLA/PBAT อัตราส่วน 70 : 30 พบว่าปรากฏ T_c ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ T_c ของ Pure PBAT เช่นกัน

ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ปริมาณต่าง ๆ

Sample	T _c (°C)		ΔH _c (J/g)		T _g (°C)		T _{cc} (°C)		ΔH _{cc} (J/g)		T _m (°C)		X _c (%)		Normalized X _c (%)		
	PBAT	PBAT	PBAT	PLA	PLA	PBAT	PBAT	PLA	PLA	PLA	PBAT	PLA	PBAT	PLA	PBAT	Total	PLA
PLA	-	-	60.05	-	116.44	2.67	148.91	-	3.86	-	3.86	-	3.86	-	3.86	3.86	
PBAT	67.45	17.32	-	-32.41	-	-	-	120.85	-	11.14	11.14	-	-	-	-	-	
PLA/PBAT/D0	68.24	3.70	58.11	-33.31	133.55	0.66	150.19	110.06	3.49	4.91	8.40	-	-	-	-	2.47	
PLA/PBAT/D03	71.75	4.56	59.24	-31.59	134.92	0.22	150.73	110.00	2.76	4.56	7.32	-	-	-	-	2.43	
PLA/PBAT/D06	68.92	2.49	60.43	-31.05	132.77	0.71	150.74	110.60	3.03	2.95	5.98	-	-	-	-	1.94	
PLA/PBAT/D1	71.59	4.70	60.05	-32.93	134.22	0.63	150.54	111.90	2.41	3.83	6.24	-	-	-	-	1.44	

และเมื่อพิจารณาค่า T_c ของ PBAT ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม DCP พบว่ามีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D0 แสดงให้เห็นว่า PBAT ตกผลึกได้เร็วขึ้น อาจเนื่องจากการเติม DCP ส่งผลให้มีการตัดสายโซ่บางส่วน เป็นสายโซ่ที่สั้นลง ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการผสม ดังนั้นสายโซ่ดังกล่าวจึงสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า T_g ที่มีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติม DCP นอกจากนี้ยังทำให้พอลิเมอร์ผสมตกผลึกได้ง่ายขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dandan Wu และคณะ [47] ที่พบว่าเมื่อเติม DCP 0.3 phr ลงใน PBAT/PLA อัตราส่วน 80 : 20 โดยเปรียบเทียบการผสม 2 รูปแบบ คือ One-step mixing (PBAT/PLA/DCP) และ Two-step mixing ((PBAT/DCP)/PLA) พบว่า T_c ของ PBAT/PLA/DCP (76.0 องศาเซลเซียส) และ (PBAT/DCP)/PLA (86.0 องศาเซลเซียส) มีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PBAT/PLA (68.1 องศาเซลเซียส) ซึ่งผู้วิจัยได้เสนอว่าอาจเนื่องมาจากการเติม DCP ส่งผลให้ความหนืดของ PBAT เพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนจึงเกิดได้น้อยลง จึงทำให้ผลึกของ PBAT เสถียรมากขึ้น นอกจากนี้บริเวณสายโซ่กึ่งยังเป็น Nucleating point ซึ่งมีส่วนที่ทำให้ T_c มีค่ามากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณ DCP เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลให้ค่า T_c เปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Deyun Ji และคณะ [50] ที่ทำการศึกษาค่าผลของการเติม Dicumyl peroxide ต่อสมบัติของ PLA/PBS พบว่า PLA/PBS ไม่ปรากฏผลึก T_c ของ PLA เมื่อใช้อัตราการเย็นตัวเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส/นาทิจึง เนื่องจาก PLA มีอัตราการตกผลึกช้า ซึ่งอัตราการเย็นตัวที่ใช้ในการทดสอบดังกล่าวเร็วจนกระทั่ง PLA ไม่สามารถตกผลึกได้ทัน แต่สำหรับ PBS ปรากฏ T_c เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส และเมื่อเติม DCP ลงใน PLA/PBS พบว่าปรากฏผลึก T_c โดยเมื่อเติม DCP ในปริมาณมากขึ้น (น้อยกว่า 0.3 phr) ไม่ส่งผลให้ T_c เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากปริมาณโครงสร้างสายโซ่กึ่งหรือเชื่อมขวางมีจำนวนน้อย อาจยังไม่ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเปรียบเทียบกับเติมในปริมาณมากกว่า 0.3 phr ซึ่งพบว่า T_c มีค่ามากขึ้น เนื่องจากวิฤภาคของ PLA จะเริ่มเกิดการตกผลึก และสามารถตกผลึกได้เร็วมากขึ้นอย่างชัดเจน

เมื่อพิจารณาค่า Glass transition temperature (T_g) ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D0 พบว่าค่า T_g ของ PLA และ PBAT มีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ Pure PLA และ Pure PBAT แต่อย่างไรก็ตามไม่พบว่า T_g ของ PLA และ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมขยับเข้าหากัน บ่งบอกว่า PLA และ PBAT ไม่มีความเข้ากันได้ (immiscible blend) ซึ่งสอดคล้องกับภาพ SEM (รูปที่ 4-4 (a)) ที่พบการแบ่งแยกของวิฤภาค PLA และ PBAT อย่างชัดเจน และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yinxin

Deng และคณะ [48] ที่ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนการผสมระหว่าง PBAT และ PLA เมื่อพิจารณา PBAT/PLA ที่อัตราส่วน 20 : 80 พบว่าค่า T_g ของพอลิเมอร์ผสมไม่มีการเปลี่ยนแปลง บ่งบอกว่า PLA และ PBAT ไม่สามารถผสมเข้ากันได้

เมื่อพิจารณาผลของการเติม DCP ลงในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT พบว่าค่า T_g ของ PLA และ PBAT มีค่ามากขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ PLA/PBAT/D0 ซึ่งอาจจะเนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาส่งผลให้เกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่เป็นโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้นหรือเกิดเป็นสายโซ่กิ่งหรือมีการเชื่อมขวาง จึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ MFI ที่มีค่าลดลง แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับค่า T_c ที่มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA/PBAT/D0 เนื่องจากการเติม DCP ส่งผลให้พอลิเมอร์ตกผลึกได้เร็วขึ้น ซึ่งส่งผลให้สายโซ่ส่วน Amorphous เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น จึงทำให้ T_g มีค่าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเติม DCP ปริมาณมากขึ้นไม่ส่งผลให้ T_g ของ PLA และ PBAT มีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน บ่งบอกว่าในระดับโมเลกุล ภูมิภาคทั้งสองยังไม่มี ความเข้ากันได้ ซึ่งระหว่าง PLA กับ PBAT ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอาจจะอยู่ที่บริเวณพื้นผิวระหว่างภูมิภาค (interphase) เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามในระดับไมโคร (microscale) ที่ได้จากภาพ SEM พบว่าภูมิภาคหลักของ PLA และภูมิภาคกระจายของ PBAT เข้ากันได้ดีมากขึ้นเมื่อปริมาณ DCP มากขึ้น

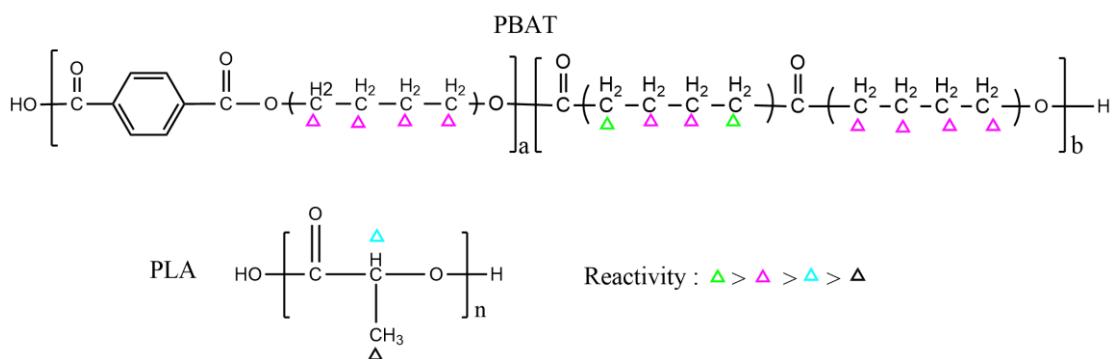
เมื่อพิจารณาการให้ความร้อนในครั้งที่ 2 พบว่ามีการเกิดพีค Cold crystallization temperature (T_{cc}) ซึ่งเป็นตำแหน่งของ PLA โดยพบว่า T_{cc} ของ PLA ใน PLA/PBAT/D0 มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ Pure PLA บ่งบอกว่า PLA ในพอลิเมอร์ผสมตกผลึกในขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่ 2 ได้ช้าลง อาจเนื่องจากเมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วจะทำให้เกิดโมเลกุลที่ยาวขึ้นหรือมีสายโซ่กิ่งหรือเกิดการเชื่อมโยงขึ้น ส่งผลให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น จึงส่งผลให้ PLA ตกผลึกได้ยากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเติม DCP มากขึ้นไม่ส่งผลให้ T_{cc} มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณา Melting temperature (T_m) ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D0 พบว่า T_m ของ PLA ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อเปรียบเทียบกับ Pure PLA แต่สำหรับ PBAT มีค่าน้อยลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับ Pure PBAT ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Phasawat Chaiwutthinan และคณะ [49] ที่ทำการศึกษาผลของการผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วนการผสมต่าง ๆ พบว่าเมื่อผสม PLA/PBAT อัตราส่วน 70 : 30 ไม่ส่งผลให้ T_m ของ PLA เปลี่ยนแปลงไป ส่วน T_m ของ PBAT มีแนวโน้มลดลงตามอัตราส่วนการผสม อาจเนื่องมาจากการผสมกันระหว่าง PLA และ PBAT ทำให้เป็นภูมิภาคที่ไม่ต่อเนื่องมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ Pure PBAT ที่เป็นพอลิเมอร์เนื้อเดียว

(homopolymer) ดังนั้นจึงทำให้สายโซ่ของ PBAT เกิดผลึกได้ยากขึ้น จึงส่งผลให้ T_m ของ PBAT มีค่าลดลง รวมถึงทำให้ปริมาณผลึกของ PBAT มีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่า T_m ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT เมื่อเติม DCP มากขึ้น พบว่า T_m ของ PLA และ PBAT ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA/PBAT/D0

และเมื่อพิจารณาปริมาณผลึก (degree of crystallization, X_c) พบว่าเมื่อเติม DCP ลงใน PLA/PBAT ส่งผลให้ปริมาณผลึกของ PLA ลดลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ Pure PLA แต่สำหรับ PBAT ปริมาณผลึกลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับ Pure PBAT บ่งบอกว่า PBAT อาจจะมีควมว่องไวต่อ DCP มากกว่า PLA ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ DanDan Wu และคณะ [47] ที่ได้มีการกล่าวถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาของ DCP ว่า PBAT และ PLA มีความสามารถในการตอบสนองต่อ DCP ได้แตกต่างกัน โดย PBAT มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า เนื่องจาก PBAT มีปริมาณอะตอม H มากกว่า PLA โดยเฉพาะอย่างยิ่งหมู่ $-CH_2-$ ในตำแหน่งแอลฟา ซึ่งมีความสัมพันธ์กับหมู่คาร์บอนิลของ Adipic acid นั้นว่องไวต่อปฏิกิริยามากที่สุด แต่สำหรับ PLA มีเพียงหมู่ Methyl ซึ่งมีความว่องไวและเกิด Free radical ต่ำ ดังรูปที่ 4-9 ดังนั้นโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาของ PBAT ใน PLA/PBAT จึงมากกว่า PLA ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเชื่อมต่อเป็นสายโซ่กิ่งได้มากกว่า PLA ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่ PBAT ยากขึ้น จึงทำให้ปริมาณผลึกของ PBAT ลดลงเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าลดลงของ PLA และสำหรับปริมาณผลึกโดยรวมของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP มากขึ้น พบว่ามีค่าลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่เป็นโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมจึงเคลื่อนที่ได้ยากมากขึ้น และทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดผลึกได้น้อยลง

เมื่อพิจารณาตัดปริมาณผลึกที่เกิดจากขั้นตอนการเย็นตัว (Normalized X_c) ซึ่งสามารถคำนวณได้เฉพาะ PLA เท่านั้น เนื่องจาก PBAT ไม่ปรากฏ T_{cc} โดยพบว่า Normalized X_c (%) ของ PLA มีแนวโน้มลดลงเมื่อเติม DCP ปริมาณมากขึ้น บ่งบอกว่าในขั้นตอนการให้ความร้อนในครั้งที่ 2 PLA ตกผลึกได้ยากขึ้น เมื่อเติม DCP มากขึ้น อาจเนื่องจาก PLA สามารถเกิดปฏิกิริยากับ DCP ได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณผลึกของ PBAT พบว่า Normalized X_c (%) ของ PLA ยังคงมีส่วนการลดลงที่น้อยกว่า $\%X_c$ ของ PBAT บ่งบอกว่า PLA ยังคงว่องไวต่อ DCP ได้น้อยกว่า PBAT



รูปที่ 4-9 ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของ PLA และ PBAT [47]

5. การศึกษาสมบัติเชิงกล

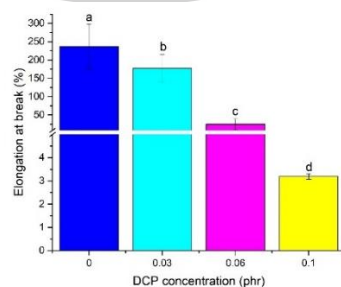
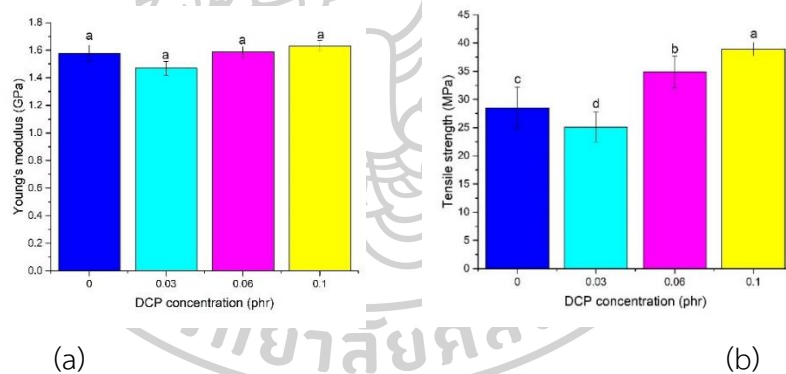
จากการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบการดึงยืด ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4-10 และตารางที่ 4-3 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่ไม่มีการเติม DCP มีค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูป (Young's modulus) ความต้านทานต่อแรงดึงยืด (tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) เท่ากับ 1.58 GPa, 28.48 MPa และ 236.47 % ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yixin Deng และคณะ [50] ที่ทำการศึกษาค่าของอัตราส่วนการผสม PLA และ PBAT ซึ่งพบว่า PLA ที่มีค่า modulus สูง (1672 MPa) และ PBAT ที่มีค่า modulus ต่ำ (50 MPa) เมื่อผสมกันในอัตราส่วน PLA/PBAT เท่ากับ 70 : 30 ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าอยู่ระหว่าง PLA และ PBAT

เมื่อพิจารณาปริมาณการเติม DCP ที่มากขึ้นส่งผลให้ค่า Young's modulus และ Tensile strength ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT มีค่ามากขึ้น เนื่องจากปริมาณของ Free radical ที่มากขึ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่มากขึ้น จึงทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเมื่อได้รับแรงดึงยืด สายโซ่พอลิเมอร์จึงเคลื่อนที่ผ่านกันได้ยากมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Takeshi Semba และคณะ [51] ที่ทำการศึกษาค่าของการเกิดการเชื่อมขวางต่อสมบัติเชิงกลของ PLA/Polycaprolactone (PCL) พบว่าที่อัตราส่วน PLA : PCL 70 : 30 โดยมีการเติม DCP มากขึ้น ส่งผลให้ Tensile modulus และ Tensile strength มีค่ามากขึ้น เนื่องจาก DCP ปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PCL จึงส่งผลให้ Interfacial adhesion ระหว่างวัฏภาคดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับภาพ Atomic force microscopy (AFM) หลังจากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า PCL ถูกดึงยืดไปตามทิศทางการดึง และยังคงยึดติดกับวัฏภาคของ PLA เป็นลักษณะวงรี บ่งบอกว่า Tensile stress ถูกส่งผ่าน Interface ของ PLA/PCL และจากงานวิจัยของ Dandan Wu และคณะ [47]

พบว่าค่า Tensile strength ของ PBAT/PLA อัตราส่วน 80 : 20 ที่มีการเติม DCP 0.3 phr มีค่ามากขึ้น เนื่องจาก Free-radical branching reaction ทำให้เกิด PBAT-g-PLA ซึ่งทำหน้าที่ในการเชื่อม Interface ระหว่าง PLA และ PBAT จึงทำให้ Interfacial adhesion ของพอลิเมอร์ดีขึ้นและสามารถรับแรงในการดึงยึดได้มากขึ้น

ตารางที่ 4-3 สมบัติการดึงยึดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม DCP ปริมาณต่าง ๆ

Sample	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PLA/PBAT/D0	1.58 ± 0.06^a	28.48 ± 3.67^c	236.47 ± 61.86^a
PLA/PBAT/D03	1.47 ± 0.05^a	25.10 ± 2.65^d	177.16 ± 38.21^b
PLA/PBAT/D06	1.59 ± 0.04^a	34.86 ± 2.79^b	24.58 ± 15.15^c
PLA/PBAT/D1	1.63 ± 0.04^a	38.92 ± 1.20^a	3.19 ± 0.12^d



(c)

รูปที่ 4-10 สมบัติเชิงกล (a) Young's modulus, (b) Tensile strength, (c) Elongation at break ของฟิล์ม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ปริมาณต่าง ๆ

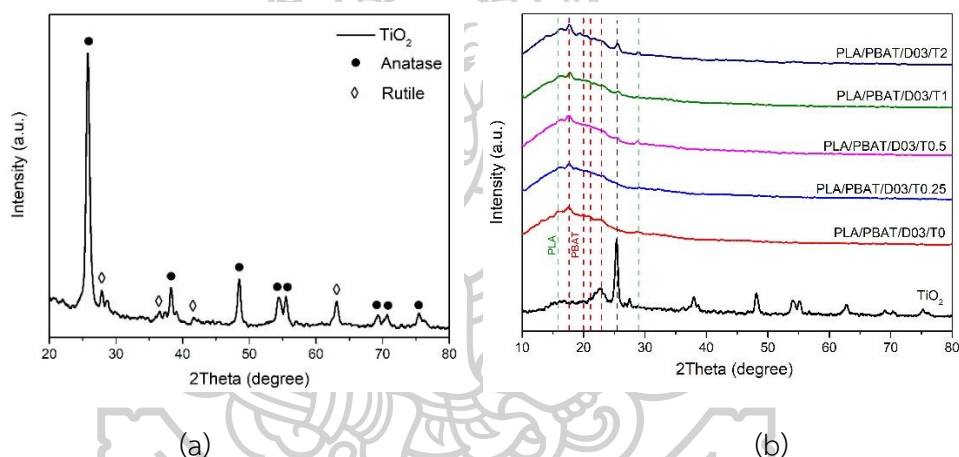
เมื่อพิจารณาค่า Elongation at break ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP ปริมาณมากขึ้น พบว่า Elongation at break มีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณ DCP มากขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณ Free radical มากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่มากขึ้น ซึ่งอาจเกิดเป็นสายโซ่กิ่งหรือเกิดการเชื่อมโยงเป็นสายโซ่ที่ยาวขึ้น ทำให้เมื่อฟิล์มพอลิเมอร์ได้รับแรงดึงยืด จึงทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ผ่านกันได้ยากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มขาดและเปราะมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับภาพ SEM (รูปที่ 4-6 (b-d)) ที่พบว่าเมื่อเติม DCP มากขึ้น พื้นผิวการแตกหักของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT มีความเรียบมากขึ้น บ่งบอกว่าฟิล์มมีความเปราะมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dandan Wu และคณะ [47] ที่ทำการศึกษาผลของการเติม Compatibilizer (DCP) ต่อสมบัติต่างๆ ของ PBAT/PLA พบว่าเมื่อเติม DCP ส่งผลให้ค่า Elongation at break มีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับ PBAT/PLA ที่ไม่เติม DCP

จากการศึกษาผลของการเติม DCP ในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ในตอนที่ 1 พบว่าการเติม DCP มากขึ้นส่งผลให้ PLA และ PBAT มีความเข้ากันได้มากขึ้น โดยพบวิวัฒนาการกระจายของ PBAT มีขนาดเล็กลงตามปริมาณการเติม DCP แต่อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของ FTIR spectra เนื่องจากเมื่อ DCP ได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวเป็น Free radical และเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์บริเวณ α -carbon ทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยพันธะ C-C ดังนั้นพีคที่ปรากฏใน FTIR spectrum จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจากปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่มากขึ้น ทำให้เกิดการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวได้ยากขึ้น จึงส่งผลให้ดัชนีไหลมีค่าลดลงเมื่อเติม DCP ในปริมาณมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อเติม DCP ปริมาณมากกว่า 0.03 phr จะทำให้ค่า Elongation at break ลดลงอย่างมาก เนื่องจากอาจเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่มากขึ้น เมื่อฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้รับแรงดึงยืด จึงส่งผลให้สายโซ่เคลื่อนที่ผ่านกันได้ยากขึ้น ทำให้ฟิล์มขาดได้ง่ายขึ้น และฟิล์มมีความเปราะมากขึ้น ดังนั้นเพื่อจะยังคงความยืดหยุ่นของฟิล์มเอาไว้ และฟิล์มดังกล่าวยังคงมีคุณสมบัติที่ผ่านข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม “ถุงพลาสติกสำหรับบรรจุอาหาร” มาตรฐานอุตสาหกรรมเลขที่ 1027-2553 ซึ่งระบุไว้ว่าต้องมีค่าความทนทานต่อแรงดึง ณ จุดขาดที่มากกว่าหรือเท่ากับ 11.8 MPa และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่มากกว่าหรือเท่ากับ 150% จึงเลือกปริมาณการเติม DCP ที่เหมาะสมสำหรับระบบ PLA/PBAT คือ 0.03 phr สำหรับการทดลองต่อไป

ตอนที่ 2 ศึกษาสมบัติของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณต่างๆ

จากผลการทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม Dicumyl peroxide (DCP) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่เติม DCP 0.03 phr มีลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และอัตราการไหลที่เหมาะสม ดังนั้นในการทดลองส่วนที่ 2 จึงใช้ปริมาณการเติม DCP 0.03 phr สำหรับศึกษาสมบัติของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่เติม TiO_2 0.25 0.5 1 และ 2 phr จากนั้นทำการศึกษาโครงสร้างผลึก สมบัติทางแสง สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ลักษณะทางสัณฐานวิทยา ผลของเวลาในการฉายรังสียูวีเอตต่อการทำงานของ TiO_2 และสมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์

1. การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)



รูปที่ 4-11 XRD patterns ของ (a) ผง TiO_2 และ (b) ฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ

จากผลการทดสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD พบว่า TiO_2 (เกรด P25) มีโครงสร้างผลึกปรากฏขึ้น 2 รูปแบบ กล่าวคือ Anatase ซึ่งปรากฏพิกัดเด่นชัดบริเวณ 2θ เท่ากับ 25.66 38.32 48.52 54.51 55.57 69.26 70.63 75.36 องศา และ Rutile ปรากฏพิกัดเด่นชัดบริเวณ 2θ เท่ากับ 27.89 36.52 41.68 63.05 องศา ตามลำดับ ดังรูปที่ 4-11 (a) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Leon White และคณะ [52] ที่ได้มีการศึกษาโครงสร้างผลึกของ TiO_2 ทางการค้า P25 (80% anatase, 20% rutile)

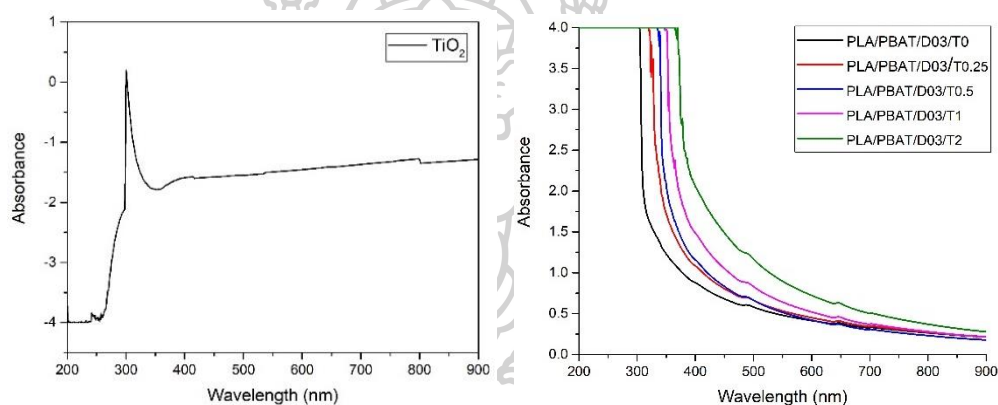
สำหรับ XRD pattern ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ปรากฏพิกัดเอกลักษณ์ของ PLA ที่ 2θ เท่ากับ 16.08 28.82 องศา และ PBAT ที่ 2θ เท่ากับ 17.72 19.90 21.04 และ 22.91 องศา

ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sima Kashi และคณะ [53] ที่ได้มีการศึกษาโครงสร้างผลึกของ PLA และ PBAT พบว่า XRD pattern ของ PLA ปรากฏพีคเอกลักษณ์ที่ 2θ เท่ากับ 16.7 องศา และ PBAT ปรากฏพีคเอกลักษณ์ที่ 2θ เท่ากับ 17.6 20.5 23.4 และ 25.0 องศา และเมื่อที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ ลงในฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT พบว่ามีพีคเอกลักษณ์ของ TiO_2 ปรากฏที่ 2θ เท่ากับ 25.66 องศา โดยพีคดังกล่าวมีความเข้มมากขึ้นตามปริมาณการเติม TiO_2 ดังรูปที่ 4-10(b) และยังคงปรากฏพีคเอกลักษณ์ของ PLA และ PBAT บ่งบอกว่าการเติม TiO_2 ไม่ส่งผลให้โครงสร้างผลึกของ PLA และ PBAT เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shan Wang และคณะ [54] ที่พบว่าเมื่อเติม TiO_2 ปริมาณมากขึ้นถึง 40%wt ลงใน Polypropylene (PP) ส่งผลให้ XRD pattern ของ PP/ TiO_2 ปรากฏพีคเอกลักษณ์ของ PP อย่างชัดเจน บ่งบอกว่าการเติม TiO_2 ไม่ส่งผลให้โครงสร้างผลึกของ PP เปลี่ยนแปลงไป

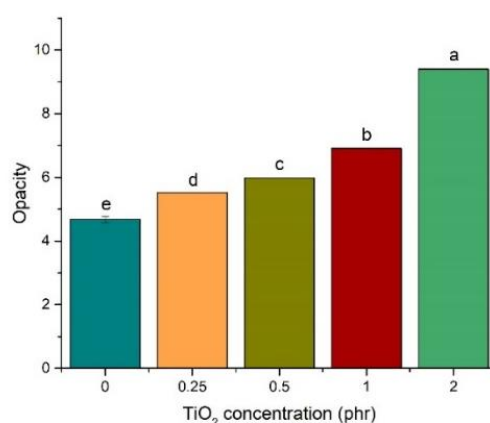
2. การศึกษาความสามารถในการดูดกลืนแสงและความทึบแสงของฟิล์มคอมพอสิตจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-Vis spectroscopy

ผลของการศึกษาการดูดกลืนรังสีในช่วง UV-Vis และค่าความทึบแสงด้วยเครื่อง UV-Vis spectrometer ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 0 0.25 0.5 1 และ 2 phr โดยจากรูปที่ 4-12(a) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการดูดกลืนรังสีในช่วง UV-Vis ของผง TiO_2 พบว่า TiO_2 มีค่าการดูดกลืนรังสีสูงสุดที่ความยาวคลื่น 301 นาโนเมตร โดยมีค่าความยาวคลื่นที่จุดเริ่มต้นของขอบการดูดกลืนแสงยูวี (absorption edge threshold) เท่ากับ 338.85 นาโนเมตร ซึ่งมีค่า Band gap energy เท่ากับ 3.93 eV ซึ่งถือว่าเป็นค่า Intrinsic band gap ของ TiO_2 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ [55] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ M.Atif และคณะ [56] ที่พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการดูดกลืนรังสีในช่วง UV-Vis ของ TiO_2 มีค่าการดูดกลืนรังสีสูงสุดที่ความยาวคลื่น 300 นาโนเมตร และมีค่าความยาวคลื่นที่จุดเริ่มต้นของการเริ่มดูดกลืนแสงยูวีประมาณ 350 นาโนเมตร และจากรูปที่ 4-12(b) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าการดูดกลืนรังสีในช่วง UV-Vis ของฟิล์มคอมพอสิต พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT จะเริ่มมีค่าการดูดกลืนแสงลดลงหลังจากที่ความยาวคลื่นเกิน 304 นาโนเมตร และเมื่อปริมาณการเติม TiO_2 มากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มคอมพอสิตมีแนวโน้มที่จะดูดกลืนรังสียูวีที่ความยาวคลื่นมากขึ้น บ่งบอกว่าฟิล์มคอมพอสิตสามารถดูดกลืนรังสียูวีได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Akbar Vejdani และคณะ [57] ที่ทำการศึกษาผลของ TiO_2 ต่อสมบัติของฟิล์ม Gelatin/agar bilayer พบว่าฟิล์ม Neat gelatin/agar มีค่าการส่องผ่านของแสง (transmittance)

สูงมาก (ประมาณ 90%) แต่เมื่อเติม TiO_2 ลงไปในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ค่า Transmittance ลดลง เนื่องจาก TiO_2 เป็นอนุภาคโลหะที่มีค่า Aspect ratio สูงและมีโครงสร้างที่เป็นผลึก อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่า Transmittance ของฟิล์มคอมพอสิตต์ลดลง โดย TiO_2 สามารถสะท้อนแสงที่กระจายลงบน Interface ได้ดี เนื่องจาก TiO_2 มีพื้นผิวจำเพาะ (specific surface) ขนาดใหญ่และมีดัชนีหักเหของแสงสูง และเมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่นช่วง 200-300 นาโนเมตร พบว่าฟิล์มคอมพอสิตต์ Gelatin/agar/ TiO_2 มีค่า Transmittance ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม Gelatin/agar bilayer บ่งบอกว่า TiO_2 มีแนวโน้มที่จะดูดกลืนรังสียูวี เนื่องจากแสงความยาวคลื่นสั้น (UV) มีพลังงานมากกว่าแสงความยาวคลื่นยาว (infrared) ซึ่งการมีอยู่ของ TiO_2 ในฟิล์มคอมพอสิตต์ส่งผลให้เกิดกระบวนการ Photocatalysis ได้โดยการดูดซับแสง UV ไว้มากขึ้น



(a) (b)



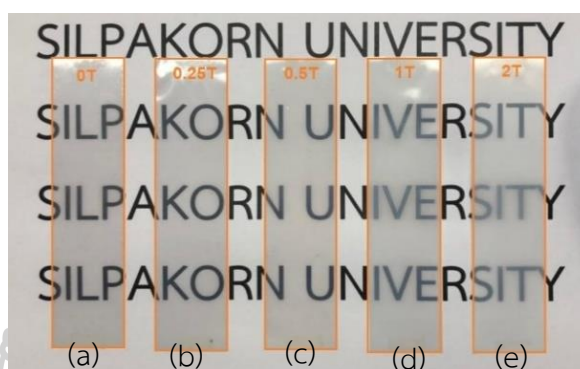
(c)

รูปที่ 4-12 ผลการทดสอบฟิล์มที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrometer (a) การดูดกลืนรังสีในช่วง UV-Vis ของผง TiO_2 , (b) การดูดกลืนรังสีในช่วง UV-Vis ของฟิล์มคอมพอสิตต์ และ (c) ความทึบแสงของฟิล์มคอมพอสิตต์ PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ

นอกจากนี้ความทึบแสงของฟิล์มคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT มีค่ามากขึ้นตามปริมาณการเติม TiO_2 ดังแสดงในตารางที่ 4-4 ซึ่งสอดคล้องกับความทึบแสงของฟิล์มคอมพอลิเมอร์ต่อการมองเห็นดังรูปที่ 4-12 และเมื่อพิจารณาค่าสีจากระบบ CIELAB พบว่าการเติม TiO_2 ในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ค่า L (lightness) ซึ่งเป็นตัวแทนของความสว่างมีค่ามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของ TiO_2 ที่มีสีขาว และเมื่อพิจารณาค่า a (redness, greenness) และค่า b (yellowness, blueness) พบว่าเมื่อเติม TiO_2 มากขึ้น ส่งผลให้ค่า a มีค่าสูงที่สุดที่ปริมาณการเติม TiO_2 2 phr และ b มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเติม TiO_2 2 phr บ่งบอกว่าฟิล์มคอมพอลิเมอร์มีสีออกแดงและฟ้ามากขึ้น ทั้งนี้ความทึบแสงของฟิล์มคอมพอลิเมอร์ต่อการมองเห็นและค่าสีจากระบบ CIELAB ดังกล่าวสอดคล้องกับค่า Opacity และค่า Absorbance ที่ 600 นาโนเมตร ดังตารางที่ 4-4 และรูปที่ 4-13 ซึ่งพบว่าฟิล์มคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณมากขึ้น มีค่า Absorbance ที่ 600 นาโนเมตร มากขึ้น จึงส่งผลให้ค่า Opacity มีค่ามากขึ้น บ่งบอกว่าฟิล์มคอมพอลิเมอร์มีความสามารถให้แสงส่องผ่านได้ยากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhou และคณะ [58] ที่ทำการศึกษาผลของการเติม TiO_2 ลงใน Whey protein และ Kefiran-whey protein พบว่าการเสริมแรงด้วยธาตุที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 1 ใน 10 ของความยาวคลื่นแสงในช่วง Visible light ไม่ส่งผลให้เกิดการกระเจิงของแสง ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของ Opacity เมื่อเติม TiO_2 ที่ความเข้มข้นต่ำอาจสัมพันธ์กับคุณสมบัติการดูดซับหรือการสะท้อนแสงของ TiO_2 แต่อย่างไรก็ตามค่า Opacity มีค่าสูงมากเมื่อเติม TiO_2 ความเข้มข้นสูงลงในฟิล์มคอมพอลิเมอร์ อาจเป็นผลมาจากการรวมตัวของอนุภาค TiO_2 ภายในเมทริกซ์ ซึ่งเป็นการขัดขวางการส่องผ่านของแสง

จากรูปที่ 4-12 (b) เมื่อทำการลากเส้นประขนานกับเส้นกราฟการดูดกลืนรังสี UV (extrapolate) จะทำให้ทราบค่าความยาวคลื่นของแสงที่จุดเริ่มต้นของขอบการดูดกลืน (high absorption edge threshold) โดยสามารถนำไปคำนวณหาค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (band gap energy, E_g) ได้ดังสมการ $E_g = 1239.6/\lambda$ โดยจะพบว่า E_g มีค่าลดลงเมื่อปริมาณการเติม TiO_2 มากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4-4 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kiran Gupta และคณะ [59] ที่ทำการศึกษา Photocatalytic activity ของ TiO_2 และ Ag-doped TiO_2 พบว่า TiO_2 , Ag- TiO_2 (3%) และ Ag- TiO_2 (7%) มีค่า Band gap energy เท่ากับ 3.15 2.80 และ 2.70 eV ตามลำดับ นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Ram Jeewan Sengwa และคณะ [60] พบว่าการเติม TiO_2 ปริมาณมากขึ้นถึง 15%wt ใน Poly(ethylene oxide) (PEO)/poly(vinyl pyrrolidone) (PVP) ส่งผลให้ E_g มีค่า 4.77 eV ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ PEO/PVP ที่มีการเติม TiO_2 1%wt ซึ่งมีค่า E_g เท่ากับ 5.03 eV และ

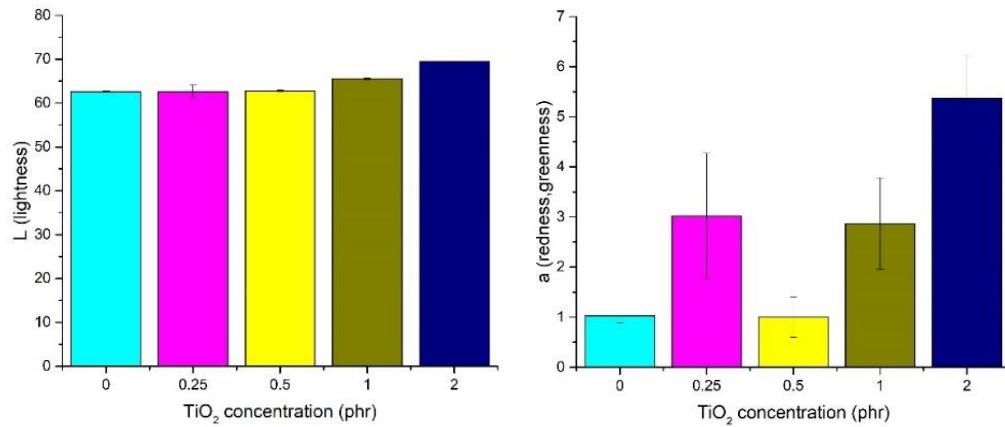
จากงานวิจัยของ R.J. Sengwa และคณะ [61] พบว่าการเติม TiO_2 ปริมาณมากขึ้นถึง 5%wt ลงใน Poly (methyl methacrylate) (PMMA) พบว่า Band gap energy มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณ TiO_2 มากขึ้น ส่งผลให้ Electron เคลื่อนที่จาก Valence band ไปยัง Conduction band ได้ง่ายขึ้น จึงส่งผลให้ Band gap energy มีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้ฟิล์มคอมพอสิตมีความสามารถในการเกิดกระบวนการ Photolysis มากขึ้น



รูปที่ 4-13 ความทึบแสงของฟิล์มคอมพอสิตต่อการมองเห็นเมื่อเติม TiO_2 (a) 0, (b) 0.25, (c) 0.5, (d) 1 และ (e) 2 phr

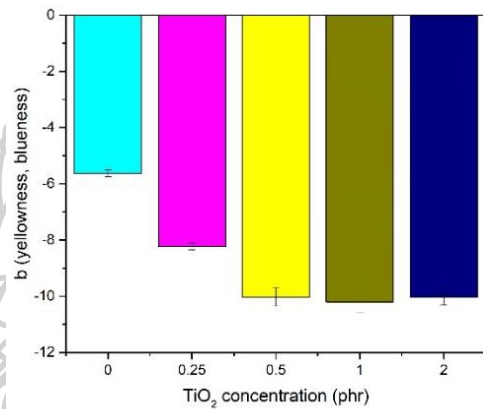
ตารางที่ 4-4 ค่าการดูดกลืนรังสีในช่วง UV-Vis ค่าความทึบแสง ความยาวคลื่นที่จุดเริ่มต้นของขอบการดูดกลืนรังสียูวีและค่าแถบพลังงานของฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติม TiO_2 ที่ปริมาณต่างๆ

Sample	Absorbance at 600 nm	Opacity	Absorption edge threshold (nm)	Band gap energy ; E_g (eV)
TiO_2	-	-	338.85	3.93 ± 0.02
PLA/PBAT/D03/T0	0.406 ± 0.007^e	4.68 ± 0.09^e	311.56	3.99 ± 0.02^a
PLA/PBAT/D03/T0.25	0.449 ± 0.001^c	5.52 ± 0.01^d	344.13	3.60 ± 0.00^b
PLA/PBAT/D03/T0.5	0.419 ± 0.001^d	5.98 ± 0.01^c	353.07	3.55 ± 0.05^b
PLA/PBAT/D03/T1	0.518 ± 0.001^b	6.91 ± 0.01^b	361.71	3.42 ± 0.01^c
PLA/PBAT/D03/T2	0.721 ± 0.001^a	9.40 ± 0.02^a	392.03	3.19 ± 0.04^d



(a)

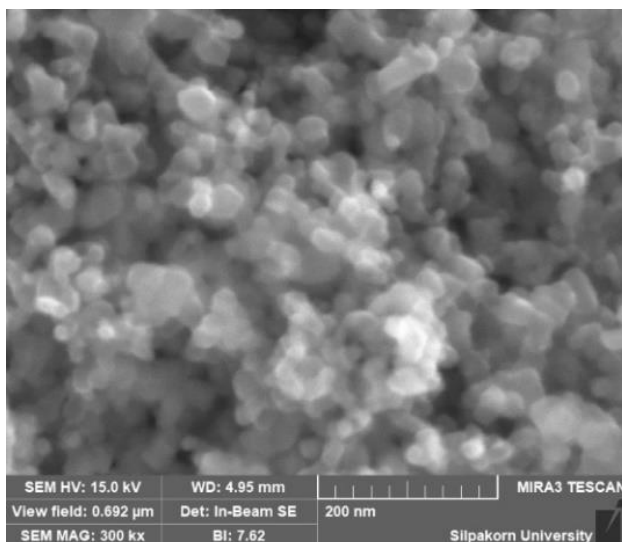
(b)



(c)

รูปที่ 4-14 ค่าสีจากการวัดด้วยระบบ CIELAB ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ (a) L (lightness), (b) a (redness, greenness) และ (c) b (yellowness, blueness)

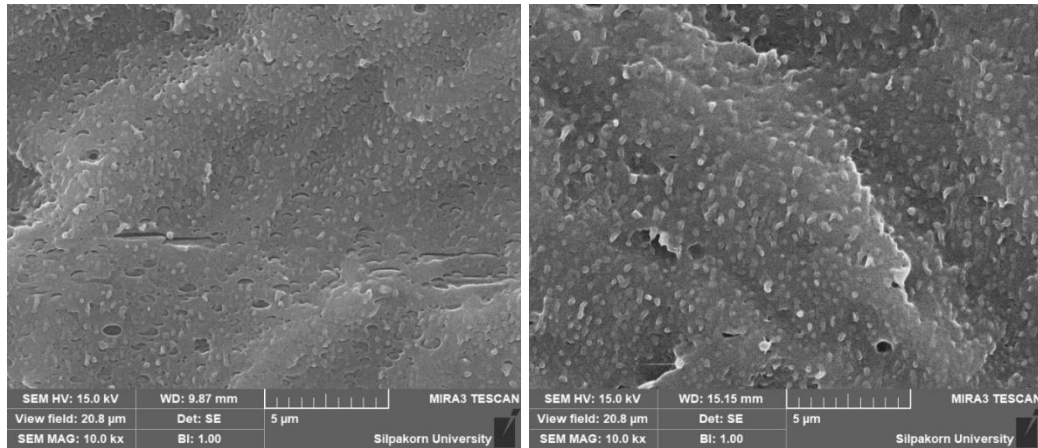
3. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM



รูปที่ 4-15 ภาพถ่ายที่ได้จากเทคนิค SEM ของผง TiO_2 nanoparticle ที่กำลังขยาย 300,000 เท่า

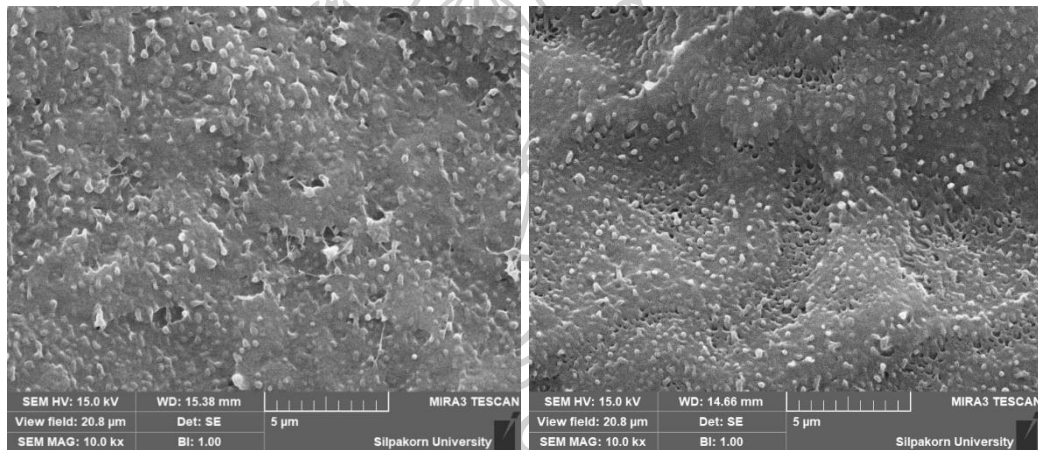
ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาซึ่งทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) ของผง TiO_2 แสดงดังรูปที่ 4-15 พบว่าที่กำลังขยาย 300,000 เท่า อนุภาคของ TiO_2 มีลักษณะกลม และมีขนาดที่สม่ำเสมอประมาณ 20 นาโนเมตร และจากรูปที่ 4-16, 4-17 แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า และ 1,500 เท่า ตามลำดับ โดยชั้นงานฟิล์มถูกนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลว และทำให้แตกหักอย่างรวดเร็วซึ่งไม่พบลักษณะกลมของ TiO_2 กระจายตัวอยู่ในฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT เนื่องจาก TiO_2 มีขนาดระดับนาโนเมตร และมีข้อจำกัดในการศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค SEM กล่าวคือกำลังขยายที่มากเกินไปจะทำให้พอลิเมอร์หลอมและผิวหน้าเสียหาย

จากรูปที่ 4-16 แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03/T0 มีร่องรอยการแยกออกเป็น 2 ภูมิภาคระหว่าง PLA และ PBAT อย่างชัดเจน บ่งบอกว่า PLA และ PBAT มียังมีความเข้ากันไม่ได้ (รูปที่ 4-16(a)) และเมื่อพิจารณาฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 มากขึ้นดังรูปที่ 4-16(b-d) พบว่าแทบจะไม่พบร่องรอยการแยกของภูมิภาค PLA และ PBAT แต่พบลักษณะเม็ดขนาดเล็กฝังอยู่ภายในภูมิภาคต่อเนื่องของ PLA โดยเม็ดขนาดเล็กดังกล่าวคาดว่าเป็นภูมิภาคกระจายของ PBAT เนื่องจากมีลักษณะการยึดออกเมื่อฟิล์มเกิดการแตกหักหลังจากถูกแช่ในไนโตรเจนเหลว



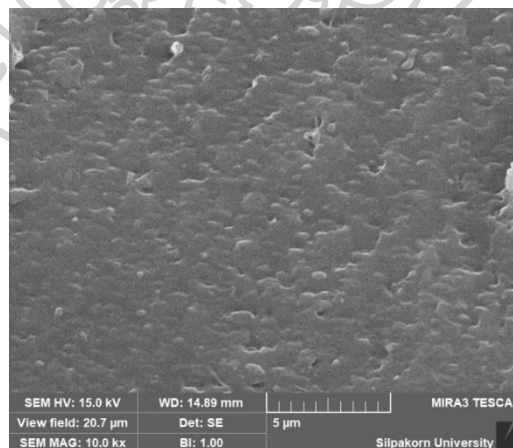
(a)

(b)



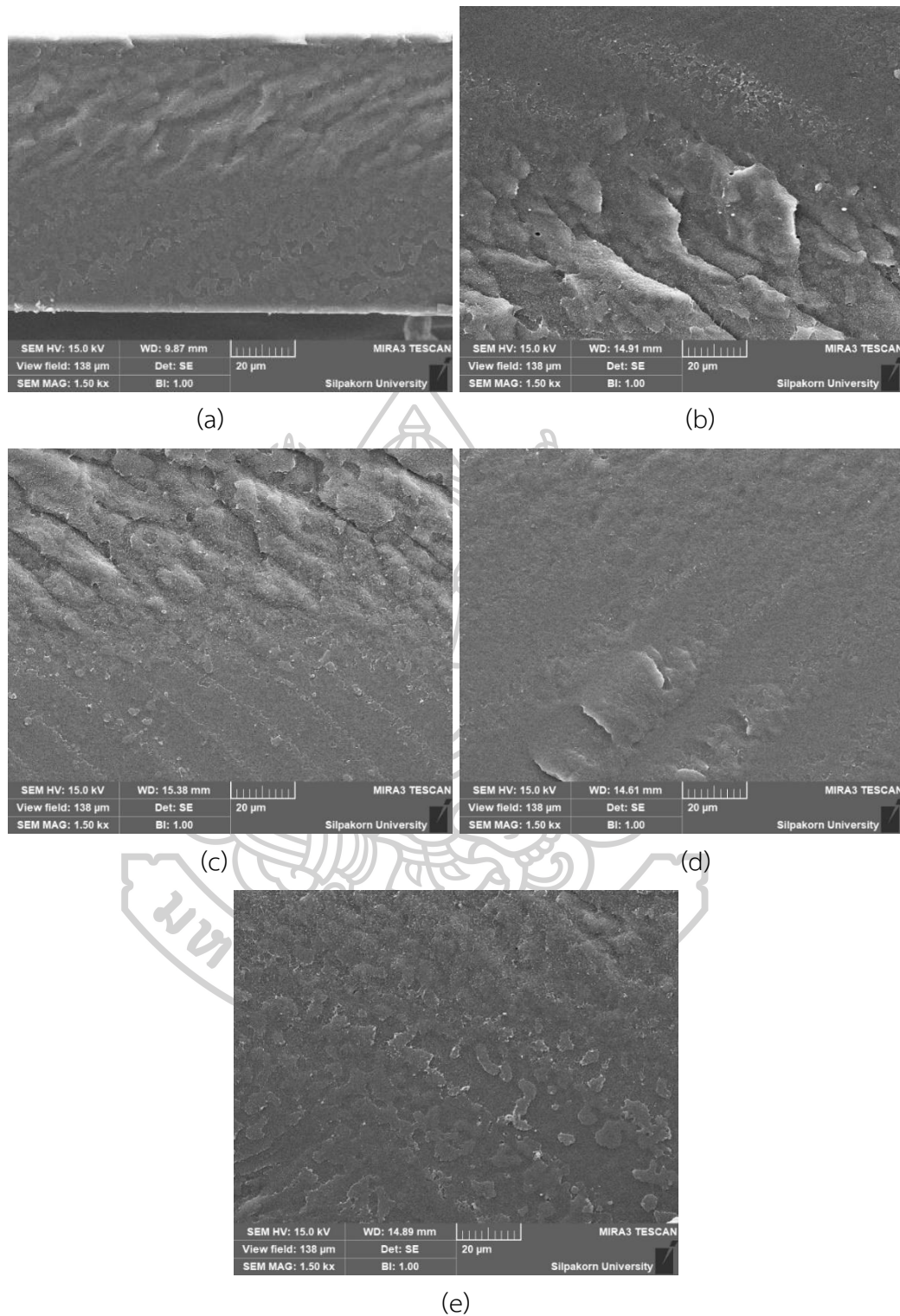
(c)

(d)

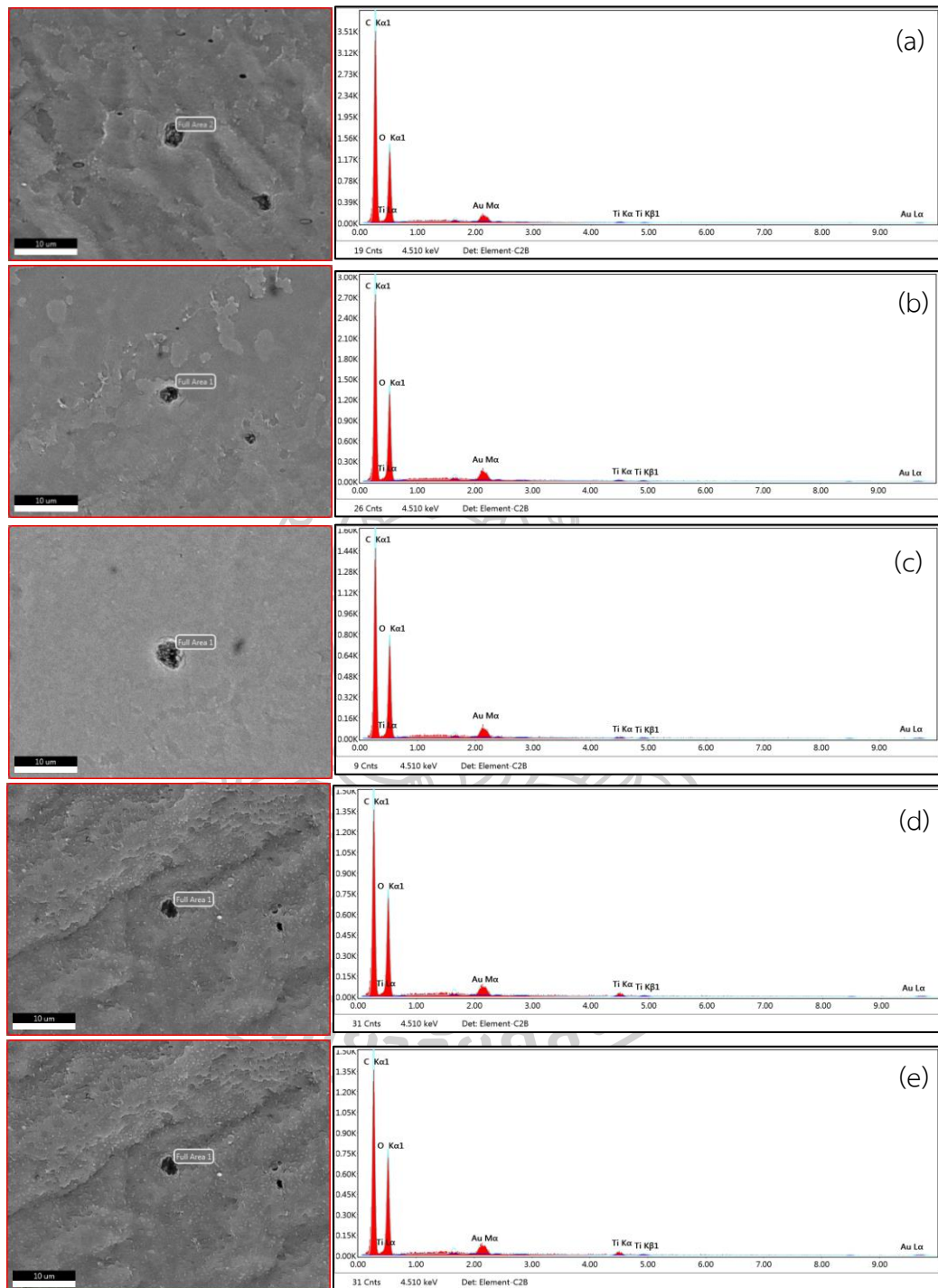


(e)

รูปที่ 4-16 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง (cross section) ที่ได้จากเทคนิค SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (a) PLA/PBAT และฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณ (b) 0.25, (c) 0.5, (d) 1 และ (e) 2 phr ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูปที่ 4-17 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง (cross section) ที่ได้จากเทคนิค SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (a) PLA/PBAT และฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณ (b) 0.25, (c) 0.5, (d) 1 และ (e) 2 phr ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

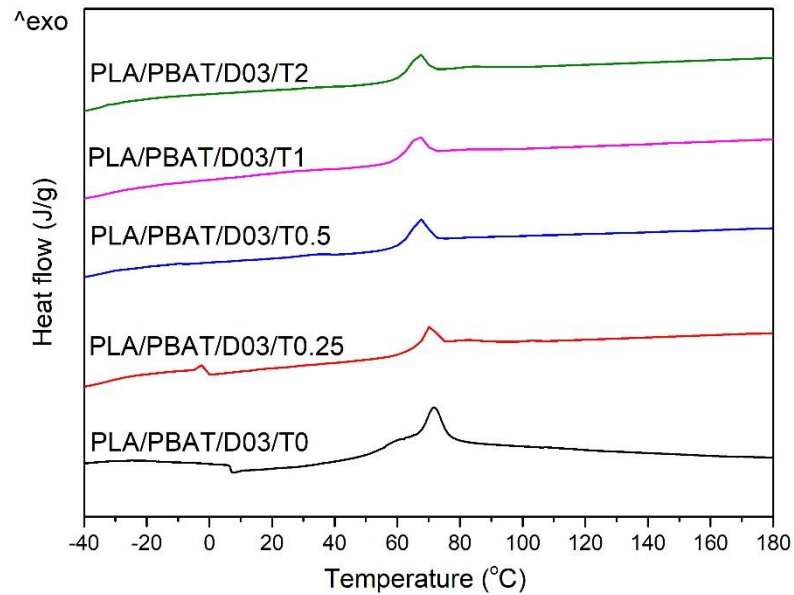


รูปที่ 4-18 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง (cross section) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการนับ (count) และ X-ray energy (eV) จากเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO₂ ในปริมาณ (a) 0.25, (b) 0.5, (c) 1 และ (d) 2 phr

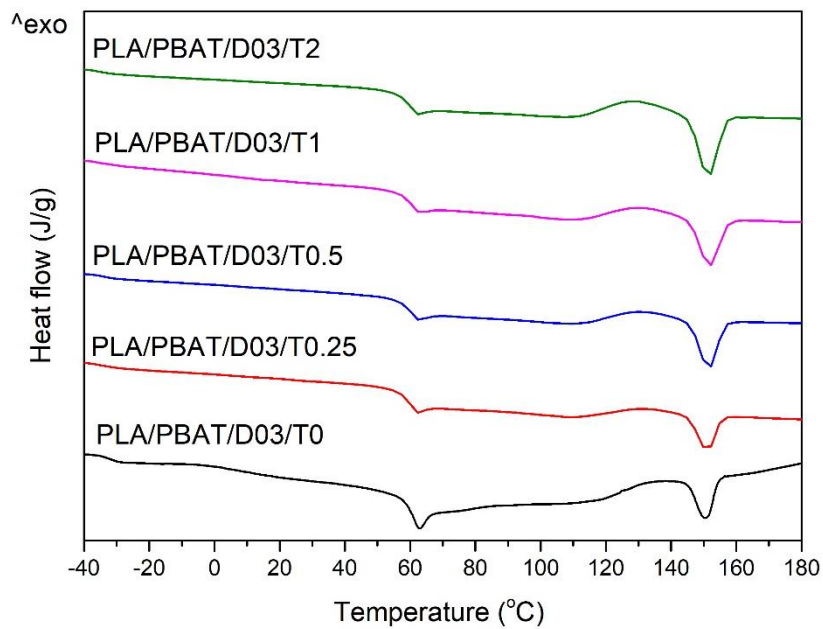
และเมื่อพิจารณาการเติม TiO_2 ถึง 2 phr ดังรูปที่ 4-16(e) พบร่องรอยการแยกของวัฏภาคระหว่าง PLA และ PBAT อย่างไรก็ตามไม่พบวัฏภาคของ PBAT ที่ชัดเจนเหมือนกับที่ปรากฏดังในรูปที่ 4-16(b-d) บ่งบอกว่าเมื่อปริมาณ TiO_2 มากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT มีความเข้ากันได้มากขึ้น โดยพบว่าวัฏภาคหลักของ PLA และวัฏภาคกระจายของ PBAT มีการยึดเกาะกันได้ดีมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vedrana Lovincic Milovanovic และคณะ [62] ที่ทำการศึกษาผลของการเติม TiO_2 และ CaCO_3 ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัฏภาคกระจายของ PLA/PE-LD (low density polyethylene) พบว่าเมื่อเติม TiO_2 5%wt ส่งผลให้วัฏภาคกระจายของ PE-LD มีขนาดเล็กลง โดยอยู่ในช่วง 2 – 3 ไมโครเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับ PLA/PE-LD ที่มีขนาดวัฏภาคกระจายอยู่ในช่วง 5 – 15 ไมโครเมตร บ่งบอกว่า TiO_2 ทำหน้าที่เป็น Compatibilizer ส่งผลให้ PLA และ PE-LD มีความสม่ำเสมอของพื้นผิวการแตกหักและระหว่างวัฏภาคของ PLA และ PE-LD มีการยึดเกาะกันได้ดีมากขึ้น

เพื่อที่จะแสดงให้เห็นรูปแบบการแตกหักของฟิล์มจึงได้ทำการศึกษาคัดขวางที่กำลังขยาย 1,500 เท่า โดยแสดงดังรูปที่ 4-17 พบว่าฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติม TiO_2 มากขึ้น มีลักษณะการแตกหักแบบเรียบมากขึ้น (brittle failure) เนื่องจากเมื่อปริมาณ TiO_2 มากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT มีความเข้ากันได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4-16(b-e) ซึ่งพบว่าวัฏภาคหลักของ PLA และวัฏภาคกระจายของ PBAT มีการยึดเกาะกันได้ดีมากขึ้น นอกจากนี้จากผลการศึกษาด้วยเทคนิค Energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS) แสดงดังรูปที่ 4-18 พบว่าบริเวณพื้นผิวการแตกหักของชิ้นงานปรากฏตำแหน่งพิกแสดงเอกลักษณ์ของธาตุ Ti ดังแสดงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการนับ (count) และ X-ray energy (eV) และพบว่าพิกที่แสดงตำแหน่งของ Ti มีความสูงเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของ TiO_2

4. การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



รูปที่ 4-19 DSC Thermograms ในขั้นตอนการทำให้เย็นตัวของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4-20 DSC Thermograms ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ

ตารางที่ 4-5 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มคอมพอลิเมอร์ที่มีการเติม TiO₂ ปริมาณต่างๆ

Sample	T _c (°C)		ΔH _c (J/g)		T _g (°C)		T _{cc} (°C)		ΔH _{cc} (J/g)		T _m (°C)		X _c (%)		Normalized X _c (%)
	PBAT	PBAT	PBAT	PBAT	PLA	PBAT	PLA	PBAT	PLA	PLA	PBAT	PLA	PBAT	PLA	
PLA/PBAT/D03/T0	71.75	4.56	59.24	-31.59	134.92	0.22	150.73	110.00	2.76	4.56	7.32	2.43			
PLA/PBAT/D03/T0.25	71.00	1.89	58.88	-35.34	132.19	1.24	150.95	109.52	6.19	5.82	12.01	4.28			
PLA/PBAT/D03/T0.5	67.82	2.39	59.24	-33.89	131.04	2.62	151.61	109.03	8.61	5.49	14.10	4.59			
PLA/PBAT/D03/T1	66.98	2.39	59.44	-35.37	129.70	2.57	151.93	108.53	9.65	4.77	14.42	5.70			
PLA/PBAT/D03/T2	67.32	1.27	59.18	-34.78	128.37	4.51	151.41	106.19	12.01	2.02	14.03	5.08			

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อน ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4-19, 4-20 และตารางที่ 4-5 เมื่อพิจารณาค่า Glass transition temperature (T_g) ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 พบว่า T_g ของ PLA และ PBAT มีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03/T0 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ioanna-Georgia Athanasoulia และคณะ [63] ที่พบว่าค่า T_g ของฟิล์มคอมพอสิต PLLA/ TiO_2 มีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ Neat PLLA บ่งบอกว่าการมี TiO_2 ส่งผลให้สายโซ่ส่วน Amorphous ของ PLLA เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น และเมื่อพิจารณาฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 มากขึ้น ไม่ส่งผลให้ค่า T_g เปลี่ยนแปลง บ่งบอกว่า TiO_2 ไม่ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่ส่วน Amorphous เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Carmen Fonseca และคณะ [64] ที่ทำการศึกษาผลของการเติม TiO_2 ลงใน PLA พบว่าเมื่อเติม TiO_2 ปริมาณ 1-8 %wt ไม่ส่งผลให้ค่า T_g ของฟิล์มคอมพอสิตเปลี่ยนแปลง

เมื่อพิจารณาค่า Crystallization temperature (T_c) ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณมากขึ้น พบว่าปรากฏ T_c 1 ตำแหน่ง ซึ่งเป็นตำแหน่งการตกผลึกของ PBAT (T_c ของ PLA เท่ากับ 102.20 [50]) และพบว่าค่า T_c มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการเติม TiO_2 มากขึ้น บ่งบอกว่า TiO_2 ทำให้สายโซ่ของ PBAT เกิดผลึกได้ช้าลงหรือไปหน่วงการเกิดผลึกของ PBAT โดยไม่ปรากฏพีค T_c ของ PLA เนื่องจาก PLA มีอัตราการตกผลึกช้า และอัตราการเย็นตัวที่ใช้ในการทดสอบ (10 องศาเซลเซียส/นาท) เร็วจนกระทั่ง PLA ไม่สามารถตกผลึกทัน และเมื่อพิจารณาค่า Melting temperature (T_m) ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณมากขึ้น พบว่าปรากฏ T_m 2 ตำแหน่ง โดยเป็นตำแหน่งของ PLA และ PBAT โดยพบว่า T_m ของ PLA ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของ TiO_2 แต่ T_m ของ PBAT จะมีค่าลดลงจาก 110.00 องศาเซลเซียส ไปเป็น 109.52 องศาเซลเซียส (ที่ปริมาณ TiO_2 0.25 phr) ซึ่งสอดคล้องกับผลของ T_c ที่บ่งบอกว่า TiO_2 ทำให้ PBAT เกิดผลึกได้ช้าลง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเติม TiO_2 เพิ่มขึ้นก็ไม่ได้ส่งผลต่อ T_m ของ PBAT แต่อย่างใด

และเมื่อพิจารณาปริมาณผลึก (degree of crystallization, X_c) พบว่าเมื่อปริมาณ TiO_2 มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณผลึกของ PLA ในฟิล์มคอมพอสิตเพิ่มขึ้นอย่างมาก บ่งบอกว่า TiO_2 ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) ให้กับ PLA ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vedrana Lovincic Milovanovic และคณะ [62] ที่ทำการศึกษาผลของการเติม TiO_2 และ $CaCO_3$ ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุภาคกระจายของ PLA/PE-LD (low density polyethylene) พบว่าเมื่อเติม TiO_2 5%wt ไม่ส่งผลต่อ T_g ของพอลิเมอร์ผสม แต่อย่างไรก็ตามปริมาณผลึกมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ pure PLA และ PLA/PE-LD อาจเป็นผลมาจาก TiO_2 ขอบก่อผลึกกับสายโซ่ของ

PLA และจากงานวิจัยของ Worasak Phetwarotai และคณะ [65] ซึ่งทำการศึกษาผลของการเติมสารก่อผลึก (nucleating agent) ใน PLA และ PLA/PBAT โดยเติม TiO_2 ปริมาณ 1 2 และ 4 phr พบว่าเมื่อเติม TiO_2 ถึง 4 phr ลงใน PLA ส่งผลให้มีปริมาณผลึกสูงถึง 40.2% เมื่อเปรียบเทียบกับ Neat PLA (19.8%) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเติม TiO_2 4 phr ลงใน PLA/PBAT พบว่าปริมาณผลึกลดลงเล็กน้อย โดยมีปริมาณผลึกประมาณ 36% บ่งบอกว่า TiO_2 เป็นสารก่อผลึกให้กับ PLA เนื่องจากการมี PBAT ในฟิล์มพอลิเมอร์ไม่ทำให้ปริมาณผลึกเพิ่มสูงขึ้น

5. การศึกษาสมบัติเชิงกล

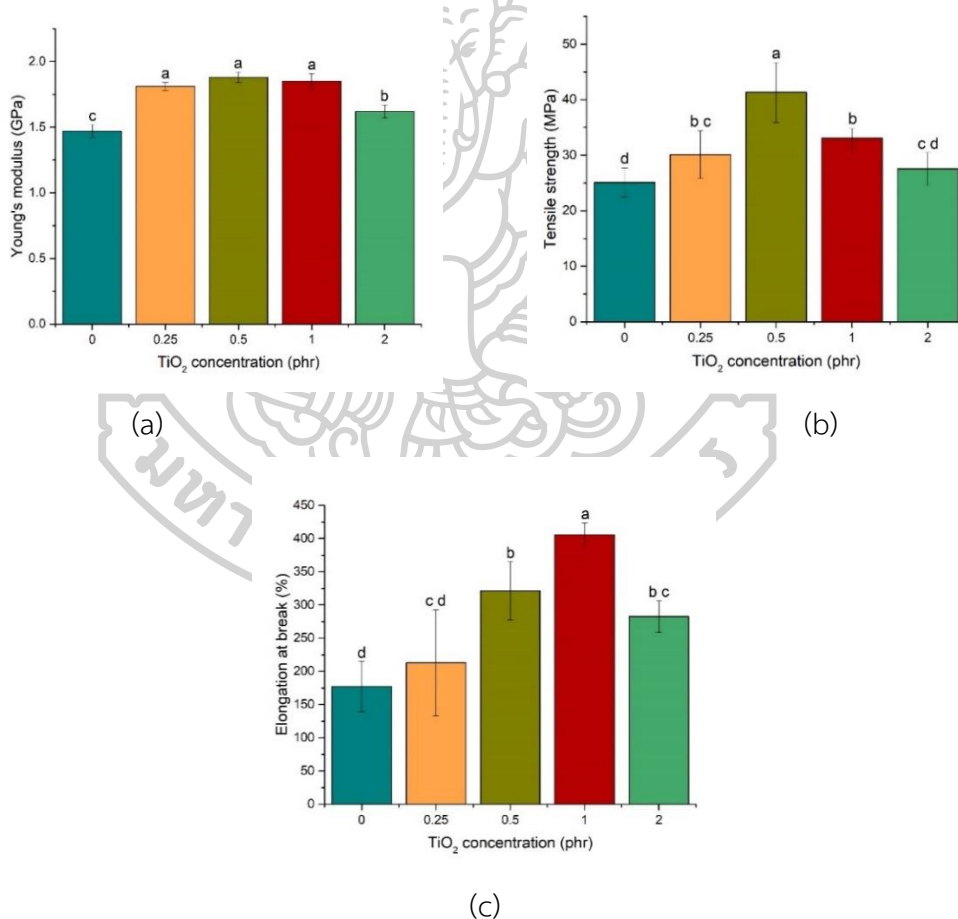
ตารางที่ 4-6 สมบัติการดึงยึดของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ

Sample	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PLA/PBAT/D03/T0	1.47 ± 0.05^c	25.10 ± 2.65^d	177.16 ± 38.21^d
PLA/PBAT/D03/T0.25	1.81 ± 0.03^a	$30.12 \pm 4.32^{b,c}$	$212.97 \pm 79.87^{c,d}$
PLA/PBAT/D03/T0.5	1.88 ± 0.04^a	41.32 ± 5.40^a	321.28 ± 44.01^b
PLA/PBAT/D03/T1	1.85 ± 0.06^a	33.05 ± 1.75^b	405.57 ± 17.89^a
PLA/PBAT/D03/T2	1.62 ± 0.05^b	$27.55 \pm 2.93^{c,d}$	$282.60 \pm 23.73^{b,c}$

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบสมบัติการดึงยึด ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4-21 และตารางที่ 4-6 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03/T0 มีค่าความทนทานต่อการเปลี่ยนรูป (Young's modulus) ความต้านทานต่อแรงดึงยึด (tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวก่อนการแตกหัก (elongation at break) เท่ากับ 1.47 GPa, 25.10 MPa และ 177.16% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีปริมาณการเติม TiO_2 มากขึ้น ส่งผลให้ค่า Young's modulus และ Tensile strength มีค่ามากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ PLA/PBAT/D03/T0 โดยมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 1.88 GPa และ 41.32 MPa ที่ปริมาณการเติม TiO_2 0.5 phr บ่งบอกว่า TiO_2 กระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์และมีการยึดเกาะกันระหว่างวัฏภาค PLA และ PBAT ที่ดี (good interfacial adhesion) ซึ่งสอดคล้องกับภาพ SEM (รูปที่ 4-16) ที่พบว่าเมื่อเติม TiO_2 ปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT มีความเข้ากันได้และยึดเกาะกันได้ดีมากขึ้น นอกจากนี้การเติมสารเสริมแรง (reinforcing agent) ให้กับวัสดุ จะส่งผลให้วัสดุมีความ Rigid มากขึ้น โดยสารเสริมแรงจะดูดซับพลังงานในขณะที่พอลิเมอร์ได้รับแรงดึงยึด จึงส่งผลให้ค่า Young's modulus

และ Tensile strength ของฟิล์มคอมพอสิตมีค่ามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Carmen Fonseca และคณะ [64] ที่มีการศึกษาผลของการเติม TiO_2 ต่อสมบัติของ PLA พบว่าการเติม TiO_2 ที่ปริมาณ 5%wt ใน PLA ส่งผลให้ค่า Young's modulus เพิ่มขึ้น 55% เมื่อเปรียบเทียบกับ Neat PLA แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 มากถึง 2 phr ส่งผลให้ค่า Young's modulus ของฟิล์มคอมพอสิตมีค่าลดลง และสำหรับค่า Tensile strength มีแนวโน้มลดลงเมื่อเติม TiO_2 มากกว่า 0.5 phr เนื่องจากอาจมีการรวมกลุ่มกันของ TiO_2 ส่งผลให้การยึดเกาะกันของวัฏภาคอ่อนแอลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Worasak Phetwarotai และคณะ [66] ที่พบว่าเมื่อเติม TiO_2 มากกว่า 1 phr ส่งผลให้ฟิล์มคอมพอสิต PLA มีค่า Tensile strength ลดลง เนื่องจากอาจมีการรวมกลุ่มกันของอนุภาค TiO_2 ทำให้ความสามารถในการรับแรงน้อยลง

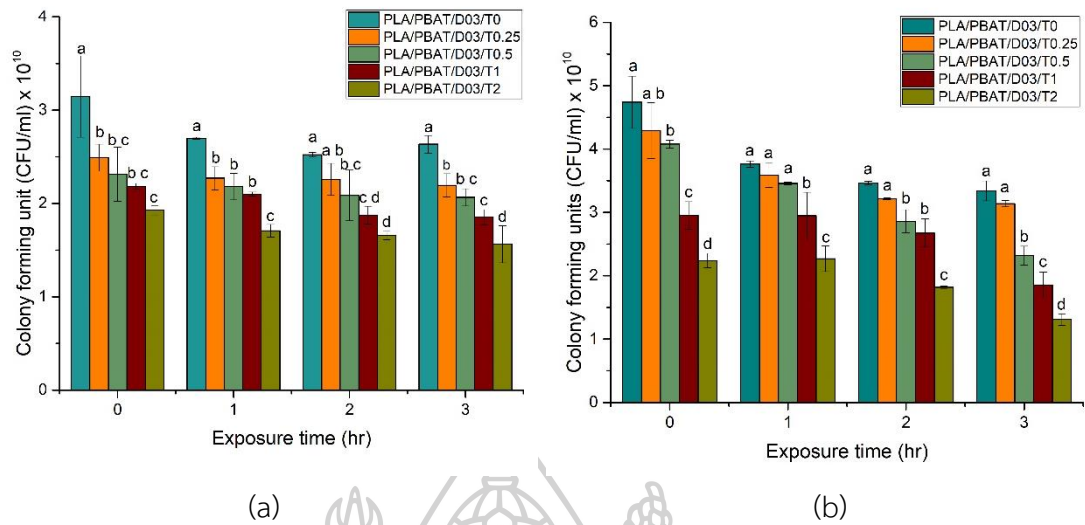


รูปที่ 4-21 สมบัติเชิงกล (a) Young's modulus, (b) Tensile strength และ (c) Elongation at break ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ที่ปริมาณต่างๆ

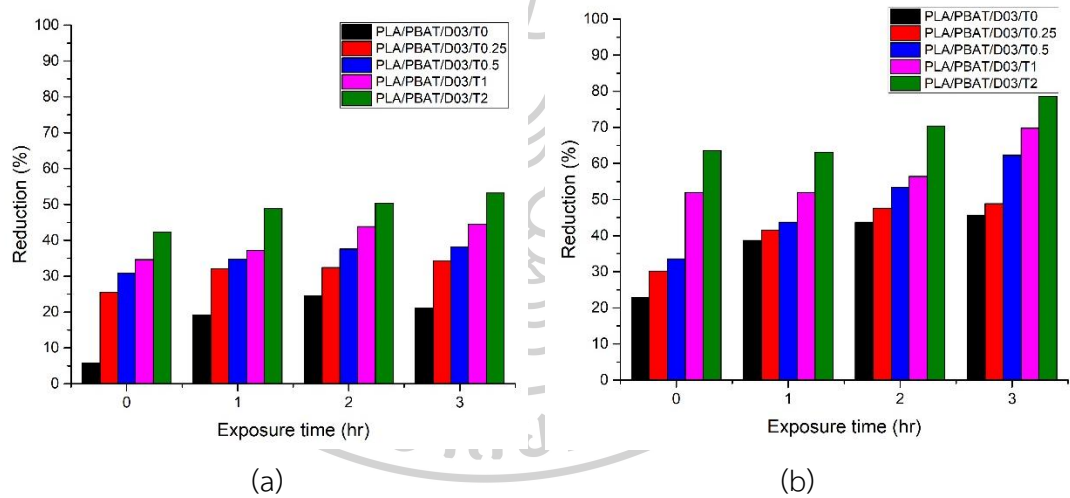
และเมื่อพิจารณา Elongation at break ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT พบว่าเมื่อปริมาณ TiO_2 มากขึ้น ส่งผลให้ค่า Elongation at break สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Vedrala Lovincic Milovanovic และคณะ [62] ที่ทำการศึกษาผลของการเติม TiO_2 และ $CaCO_3$ ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุกระจายของ PLA/PE-LD (low density polyethylene) พบว่าเมื่อเติม TiO_2 5%wt ส่งผลให้ Strain at break มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA/PE-LD เนื่องจากการเติม TiO_2 ส่งผลให้วัสดุกระจายของ PE-LD มีขนาดเล็กลง โดยอยู่ในช่วง 2 – 3 ไมโครเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับ PLA/PE-LD ที่มีขนาดวัสดุกระจายอยู่ในช่วง 5 – 15 ไมโครเมตร บ่งบอกว่า TiO_2 ทำหน้าที่เป็น Compatibilizer ส่งผลให้ Interaction ระหว่างวัสดุดีขึ้น จึงทำให้ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสมยึดเกาะกันได้ดีมากขึ้น ทั้งนี้สอดคล้องกับภาพถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ดังรูปที่ 4-17 ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณ TiO_2 มากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT มีความเข้ากันได้มากขึ้น และเมื่อพิจารณาปริมาณการเติม TiO_2 มากขึ้นถึง 2 phr พบว่า Elongation at break ของฟิล์มคอมพอสิตลดลง อาจเป็นผลมาจากการรวมตัวกันของ TiO_2 ซึ่งส่งผลให้ TiO_2 และพอลิเมอร์เมทริกซ์มีความสามารถในการยึดเกาะ (wetting) ระหว่างวัสดุที่ไม่ดี ทำให้อนุภาคของ TiO_2 กลายเป็นจุดศูนย์รวมแรงเค้น (stress concentration) จึงทำให้ฟิล์มขาดออกจากกันได้ง่ายยิ่งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Worasak Phetwarotai และคณะ [66] พบว่าการเติม TiO_2 ลงใน PLA/PBAT ถึง 1 phr ส่งผลให้ค่า Elongation at break เพิ่มขึ้นถึง 40% แต่เมื่อเติมเกินปริมาณ 1 phr พบว่าค่า Elongation at break มีค่าลดลง เนื่องจากการรวมตัวกันและกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของ TiO_2

6. การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

ศึกษาสมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ที่ปริมาณต่างๆ ที่ได้รับการฉายรังสียูวีเอที่เวลาต่างๆ โดยใช้ *Escherichia coli* (*E.coli*) เป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมลบ และ *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) เป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมบวก



รูปที่ 4-22 จำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียที่นับได้ต่อมิลลิลิตร (CFU/ml) ของฟิล์มคอมพอลิस्ट PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO₂ ปริมาณต่างๆ ที่ได้รับการฉายรังสียูวีเอที่เวลาแตกต่างกัน โดยทำการทดสอบกับเชื้อแบคทีเรีย (a) *E.coli* (b) *S.aureus*

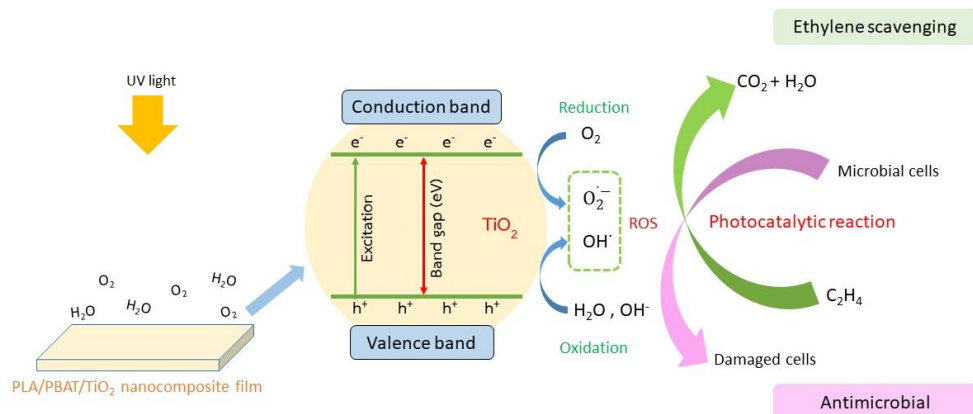
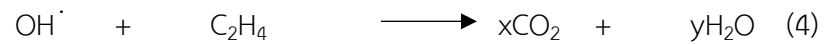
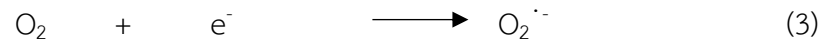


รูปที่ 4-23 เปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรีย (a) *E.coli* และ (b) *S.aureus* ของฟิล์มคอมพอลิस्ट PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO₂ ปริมาณต่างๆ ที่ได้รับการฉายรังสียูวีเอที่เวลาแตกต่างกัน

ความสามารถในการยับยั้งการเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่ไม่เติม TiO₂ และไม่มีการฉายรังสียูวีเอจะใช้เป็นตัวควบคุม (control) เพื่อทำการเปรียบเทียบกับฟิล์มคอมพอลิस्ट PLA/PBAT ที่เติม TiO₂ ปริมาณต่างๆ และถูกฉายด้วยรังสียูวีเอที่เวลาต่างๆ ซึ่งผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* แสดงในหน่วยโคโลนีต่อมิลลิลิตร (CFU/ml) ดังรูปที่ 4-22 และเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย แสดงดังรูปที่

4-23 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่ไม่เติม TiO_2 และไม่มีการฉายรังสียูวีเอ มีประสิทธิภาพน้อยมากในการยับยั้งการเติบโตของเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อฉายรังสียูวีเอนานขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรียมากขึ้น อาจเนื่องมาจากปริมาณเวลาการฉายรังสียูวีเอนานขึ้น ส่งผลให้เชื้อแบคทีเรียตามธรรมชาติที่มีบนผิวฟิล์มตายได้มากขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณการเติม TiO_2 โดยที่ยังไม่มีการฉายรังสียูวีเอ พบว่าปริมาณที่มากขึ้นส่งผลต่อการยับยั้งการเติบโตของเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด กล่าวคือ ฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่เติม TiO_2 0.25 phr มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* เท่ากับ 25.45 และ 30.11 % ตามลำดับ ส่วนฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่เติม TiO_2 2 phr มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* เท่ากับ 42.29 และ 63.52 % ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลของเวลาในการฉายรังสียูวีเอที่ระยะเวลาต่างๆ พบว่าเวลาในการฉายรังสียูวีเอส่งผลต่อการยับยั้งการเติบโตของเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด กล่าวคือฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่เติม TiO_2 2 phr และไม่มีการฉายรังสียูวีเอ มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* เท่ากับ 42.29 และ 63.52 % ตามลำดับ ส่วนฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่เติม TiO_2 2 phr และฉายรังสียูวีเอ 3 ชั่วโมง มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* เท่ากับ 53.22 และ 78.63 % ตามลำดับ

สำหรับกลไกการยับยั้งการเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของ TiO_2 นั้นเกิดกระบวนการ Photocatalytic degradation ดังสมการที่ 1 – 4 และรูปที่ 4-24 โดยเป็นกระบวนการที่ใช้แสงในการกระตุ้นให้ e^- จากชั้น Valence band ข้ามไปยัง Conduction band ซึ่งจะส่งผลทำให้ชั้น Valence band เกิด Hole (h^+) เหลืออยู่หลังจากที่ e^- ถูกกระตุ้นไปแล้ว โดย h^+ ดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ H_2O หรือ Hydroxide ion (OH^-) ได้ ทำให้เกิด Hydroxyl radical ($\text{OH}\cdot$) ส่วน e^- ที่ถูกกระตุ้นไปยัง Conduction band จะสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับ O_2 ได้ ทำให้เกิด Superoxide ion (O_2^-) โดย $\text{OH}\cdot$ และ O_2^- คือ Reactive oxygen species (ROS) ซึ่งสามารถเกิด Oxidation กับ Polyunsaturated phospholipid ของเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้สัญญาณวิทยาของเชื้อจุลินทรีย์เปลี่ยนแปลงไป และทำให้เกิดการรั่วไหลของ Cytoplasm ซึ่งทำให้เซลล์หยุดการเจริญเติบโตในที่สุดและตายในที่สุด และนอกจากนี้ ROS สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ Ethylene เกิดเป็น CO_2 และ H_2O ได้ด้วย [33, 67-69]



รูปที่ 4-24 แผนภาพกลไกการเกิด Photocatalytic degradation ของ Ethylene และ Antimicrobial activity ของ PLA/PBAT/TiO₂ nanocomposite [33]






ในการกระตุ้น e⁻ ไปยัง Conduction band นั้น ขึ้นอยู่กับช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (band gap) ของสารที่ได้รับการกระตุ้นและพลังงานในการกระตุ้น จากการทดลองพบว่าเวลาในการฉายรังสียูวีที่มากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเติบโตของเชื้อแบคทีเรียมากขึ้น เนื่องจากมีพลังงานที่สามารถกระตุ้น e⁻ ได้มากขึ้น ทั้งนี้ปริมาณการเติม TiO₂ ที่มากขึ้น สอดคล้องกับ Band gap energy ที่น้อยลงจากผลการทดสอบด้วยเทคนิค UV-Vis จึงทำให้ฟิล์มคอมพอสิตที่เติม TiO₂ มากขึ้น มีความสามารถในการยับยั้งการเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kiran Gupta และคณะ [59] ที่ทำการศึกษา Photocatalytic activity ของ TiO₂ และ Ag-doped TiO₂ พบว่า TiO₂, Ag-TiO₂ (3%) และ Ag-TiO₂ (7%) มีค่า Band gap energy เท่ากับ 3.15 2.8 และ 2.7 eV ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า Ag-TiO₂ (7%) มีความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ *S. aureus*, *E. coli* และ *P. aeruginosa* มากที่สุด เนื่องจากการลดลงของ Band gap energy เป็นการลด Recombination rate และเพิ่มปริมาณ e⁻ และ h⁺ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเพิ่มมากขึ้น

7. การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและความสามารถในการดูดซับแก๊สเอทิลีน

ศึกษาสมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและความสามารถในการดูดซับแก๊สเอทิลีนของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ที่ปริมาณต่างๆ ที่ได้รับการฉายรังสียูวีเอที่เวลาต่าง ๆ โดยใช้ผลสตรอว์เบอร์รี่สำหรับการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและใช้กล้วยสำหรับการศึกษาความสามารถในการดูดซับแก๊สเอทิลีน เนื่องจาก TiO_2 มีความสามารถในการเป็น Ethylene scavenger ด้วยการเกิด Photocatalytic degradation

จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของผลสตรอว์เบอร์รี่ที่เปลี่ยนแปลงไปดังตารางที่ (4-7)–(4-11) เมื่อพิจารณาเชื้อราบนผลสตรอว์เบอร์รี่ที่ไม่มีการเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิต โดยทำการวางไว้ในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส พบว่าผลสตรอว์เบอร์รี่มีลักษณะเหี่ยวและเกิดเชื้อราบนผิวเมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน แต่เมื่อพิจารณาเชื้อราบนผลสตรอว์เบอร์รี่ที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่ถูกปิดผนึกพบว่าเกิดเชื้อราเมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน เนื่องจากสตรอว์เบอร์รี่เป็นผลไม้ที่มีความชื้นสูง เมื่อถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มที่ถูกปิดผนึกจึงเกิดเชื้อราได้ง่าย และเมื่อพิจารณาการเติม TiO_2 มากขึ้น ส่งผลให้เกิดเชื้อราช้าลง และเมื่อพิจารณาการฉายรังสียูวีเอนานขึ้นและเติม TiO_2 มากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มคอมพอสิตมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราบนผิวสตรอว์เบอร์รี่ได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chamorn Maneerat และคณะ [70] ที่ทำการศึกษา Antifungal activity ของ TiO_2 Photocatalysis ในการต้านเชื้อรา *Penicillium expansum* เมื่อพิจารณาปริมาณ Colony ของเชื้อรา *Penicillium expansum* บน Potato dextrose agar (PDA) พบว่าเมื่อมีปริมาณ TiO_2 มากขึ้น ส่งผลให้ Colony ของเชื้อรามีจำนวนน้อยลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ PDA ที่ไม่มี TiO_2 และเมื่อพิจารณาการฉายรังสียูวีเอรวมกับการมี TiO_2 มากขึ้นพบว่าปริมาณ Colony ของเชื้อราลดลงอย่างมาก เนื่องจาก TiO_2 เกิดปฏิกิริยา Photocatalytic reaction จึงทำให้เกิด ROS ซึ่งมีความสามารถในการทำลายโครงสร้างต่างๆของเชื้อรา ส่งผลให้เชื้อราตายในที่สุด

ตารางที่ 4-7 การเกิดเชื้อราบนผลสตรอว์เบอร์รี่ที่ไม่มีการเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิต โดยทำการวางไว้ในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส

วัน	0	1	3	5	7
Blank					

ตารางที่ 4-8 การเกิดเชื้อราบนผลสตรอว์เบอร์รี่ที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก โดยไม่มีการฉายรังสียูวีเอ โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส

Day	Composite films				
	PLA/PBAT /D03/T0	PLA/PBAT/ D03/T0.25	PLA/PBAT /D03/T0.5	PLA/PBAT /D03/T1	PLA/PBAT /D03/T2
0					
1					
3					
5					
7					

ตารางที่ 4-9 การเกิดเชื้อราบนผลสตรอว์เบอร์รี่ที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก และได้รับการฉายรังสียูวีเอ 1 ชั่วโมง โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส

Day	Composite films				
	PLA/PBAT /D03/T0	PLA/PBAT/ D03/T0.25	PLA/PBAT /D03/T0.5	PLA/PBAT /D03/T1	PLA/PBAT /D03/T2
0					
1					
3					
5					
7					

ตารางที่ 4-10 การเกิดเชื้อราบนผลสตรอว์เบอร์รี่ที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก และได้รับการฉายรังสียูวีเอ 2 ชั่วโมง โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส

Day	Composite films				
	PLA/PBAT /D03/T0	PLA/PBAT/ D03/T0.25	PLA/PBAT /D03/T0.5	PLA/PBAT /D03/T1	PLA/PBAT /D03/T2
0					
1					
3					
5					
7					

ตารางที่ 4-11 การเกิดเชื้อราบนผลสตรอว์เบอร์รี่ที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก และได้รับการฉายรังสียูวีเอ 3 ชั่วโมง โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส

Day	Composite films				
	PLA/PBAT /D03/T0	PLA/PBAT/ D03/T0.25	PLA/PBAT /D03/T0.5	PLA/PBAT /D03/T1	PLA/PBAT /D03/T2
0					
1					
3					
5					
7					









































ศึกษาความสามารถในการดูดซับแก๊สเอทิลีน โดยใช้กล้วยเป็นตัวแทนในการศึกษา เนื่องจากกล้วยเป็นผลไม้ประเภท Climacteric ซึ่งระหว่างการสุกจะมีการสร้างแก๊สเอทิลีนภายในเนื้อเยื่อ โดยผลไม้ประเภทนี้สามารถถูกเก็บเกี่ยวได้ตั้งแต่ผลยังไม่สุก ดังนั้นเมื่อเก็บเกี่ยวแล้วจึงมีพฤติกรรมที่ทำให้ผลสุกได้ต่อไป [9] แต่สำหรับสตรอว์เบอร์รี่เป็นผลไม้ประเภท Non-Climacteric ซึ่งมีการสร้างแก๊สเอทิลีนในเนื้อเยื่อในปริมาณและอัตราที่ต่ำ จึงจำเป็นต้องเก็บเกี่ยวผลเมื่อสุกแล้วเท่านั้น และเมื่อสุกแล้วจะไม่มีอาการหายใจหรือสร้างเอทิลีนเพิ่มอีก ดังนั้นจึงใช้กล้วยเป็นตัวแทนในการศึกษาการดูดซับแก๊สเอทิลีน

จากการสังเกตลักษณะปรากฏของกล้วยที่เปลี่ยนแปลงไปดังตารางที่ (4-12)–(4-16) พบว่าลักษณะปรากฏของกล้วยที่ไม่มีการเก็บรักษาไว้ภายในฟิล์มคอมพอสิต โดยทำการวางไว้ในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส เริ่มสุกและเปลี่ยนสีเมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน จากนั้นค่อยๆมีจุดดำบนผิว และผลมีความนิ่มในวันที่ 15 และเมื่อพิจารณาฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณมากขึ้น พบว่ากล้วยเปลี่ยนสีและสุกช้าลง เนื่องจาก TiO_2 มีความสามารถในการดูดซับแก๊สเอทิลีน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ถูกฉายรังสียูวีเอ ส่งผลให้กล้วยเปลี่ยนสีและสุกช้าลงมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่มีการฉายรังสียูวีเอ เนื่องจากรังสียูวีเอกระตุ้นให้ TiO_2 เกิดกระบวนการ Photocatalytic degradation ดังแสดงในรูปที่ 4-24 โดยเป็นการกระตุ้นให้ e^- จากชั้น Valence band ข้ามไปยัง Conduction band และทำให้ชั้น Valence band เกิด Hole (h^+) เหลืออยู่หลังจากที่ e^- ถูกกระตุ้นไปแล้ว โดย h^+ ดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ H_2O หรือ Hydroxide ion (OH^-) ได้ ทำให้เกิด Hydroxyl radical ($\text{OH}\cdot$) ส่วน e^- ที่ถูกกระตุ้นไปยัง Conduction band จะสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับ O_2 ได้ ทำให้เกิด Superoxide ion (O_2^-) โดย $\text{OH}\cdot$ และ O_2^- คือ Reactive oxygen species (ROS) โดย ROS ดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ Ethylene เกิดเป็น CO_2 และ H_2O ได้ และจากค่า Band gap energy จากการทดสอบด้วยเทคนิค UV-Vis พบว่าเมื่อปริมาณ TiO_2 มากขึ้น ส่งผลให้ Band gap energy มีค่าน้อยลง e^- จึงสามารถข้ามไปยัง Conduction band ได้ง่ายขึ้น จึงมีโอกาสดังกล่าวเกิด ROS และทำลายเอทิลีนได้มากขึ้น


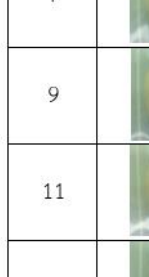



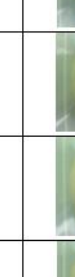
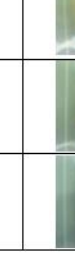






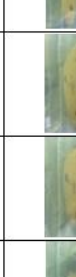



















ตารางที่ 4-12 ลักษณะปรากฏของกล้วยที่ไม่มีการรักษาไว้ภายในฟิล์มคอมพอสิต โดยทำการวางไว้ในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส











































ตารางที่ 4-13 ลักษณะปรากฏของกล้วยที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก และไม่ได้รับการฉายรังสียูวีเอ โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส

Day	Composite films				
	PLA/PBAT /D03/T0	PLA/PBAT/ D03/T0.25	PLA/PBAT /D03/T0.5	PLA/PBAT /D03/T1	PLA/PBAT /D03/T2
1					
3					
5					
7					
9					
11					
13					
15					









































ตารางที่ 4-14 ลักษณะปรากฏของกล้วยที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก และได้รับการฉายรังสียูวีเอ 1 ชั่วโมง โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส

Day	Composite films				
	PLA/PBAT /D03/T0	PLA/PBAT/ D03/T0.25	PLA/PBAT /D03/T0.5	PLA/PBAT /D03/T1	PLA/PBAT /D03/T2
1					
3					
5					
7					
9					
11					
13					
15					

ตารางที่ 4-15 ลักษณะปรากฏของกล้วยที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก และได้รับการฉายรังสียูวีเอ 2 ชั่วโมง โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส

Day	Composite films				
	PLA/PBAT /D03/T0	PLA/PBAT/ D03/T0.25	PLA/PBAT /D03/T0.5	PLA/PBAT /D03/T1	PLA/PBAT /D03/T2
1					
3					
5					
7					
9					
11					
13					
15					

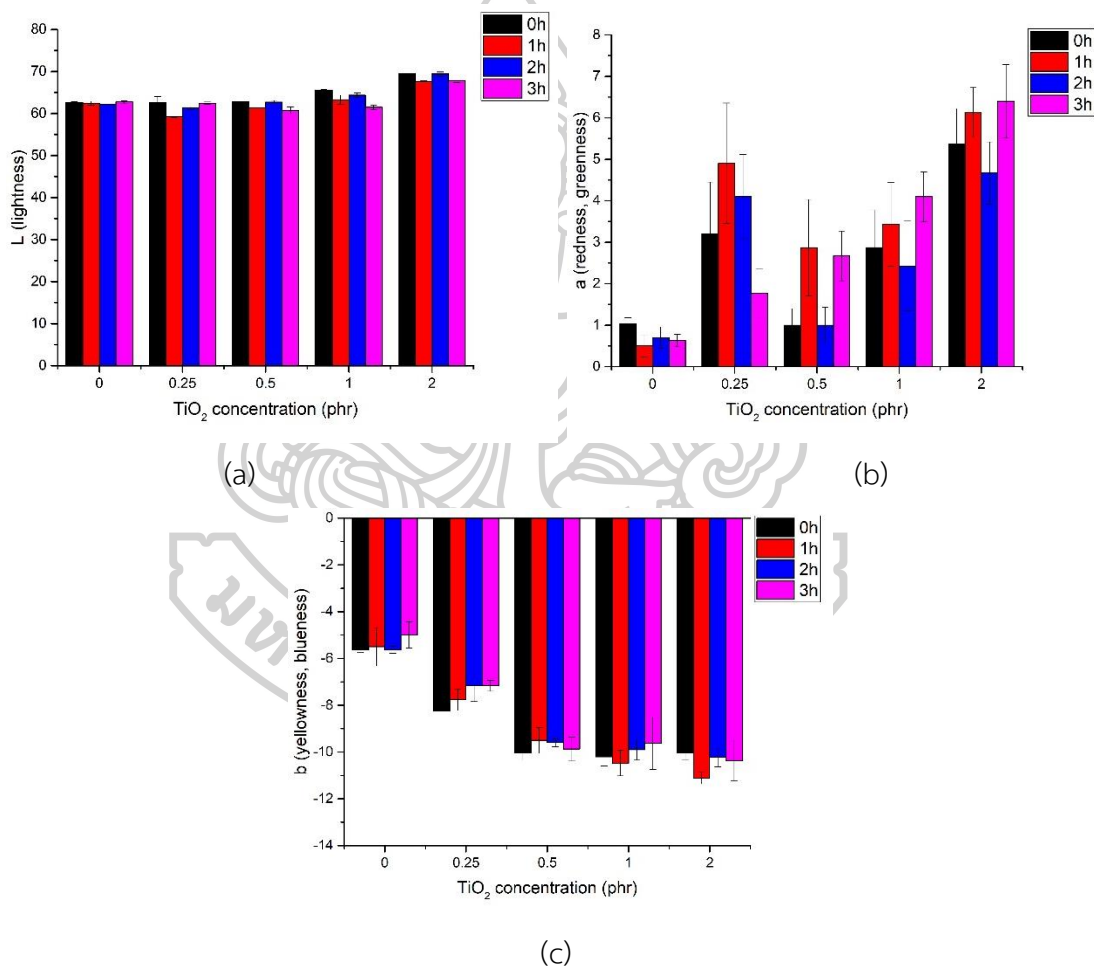
ตารางที่ 4-16 ลักษณะปรากฏของกล้วยที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก และได้รับการฉายรังสียูวีเอ 3 ชั่วโมง โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส

Day	Composite films				
	PLA/PBAT /D03/T0	PLA/PBAT/ D03/T0.25	PLA/PBAT /D03/T0.5	PLA/PBAT /D03/T1	PLA/PBAT /D03/T2
1					
3					
5					
7					
9					
11					
13					
15					

8. การศึกษาผลของเวลาในการฉายรังสียูวีเอที่มีต่อสมบัติทางแสงและการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิตที่ปริมาณ 1 2 และ 3 ชั่วโมง

ศึกษาผลของเวลาในการฉายรังสียูวีเอต่อสมบัติทางแสงและการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ โดยทำการฉายรังสียูวีเอเป็นเวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบดังกล่าว เพื่อประกอบการพิจารณาเลือกเวลาดังกล่าวในการฉายรังสียูวีเอเพื่อกระตุ้นการทำงานของ TiO_2

8.1 การศึกษาค่าสีด้วยระบบ CIELAB



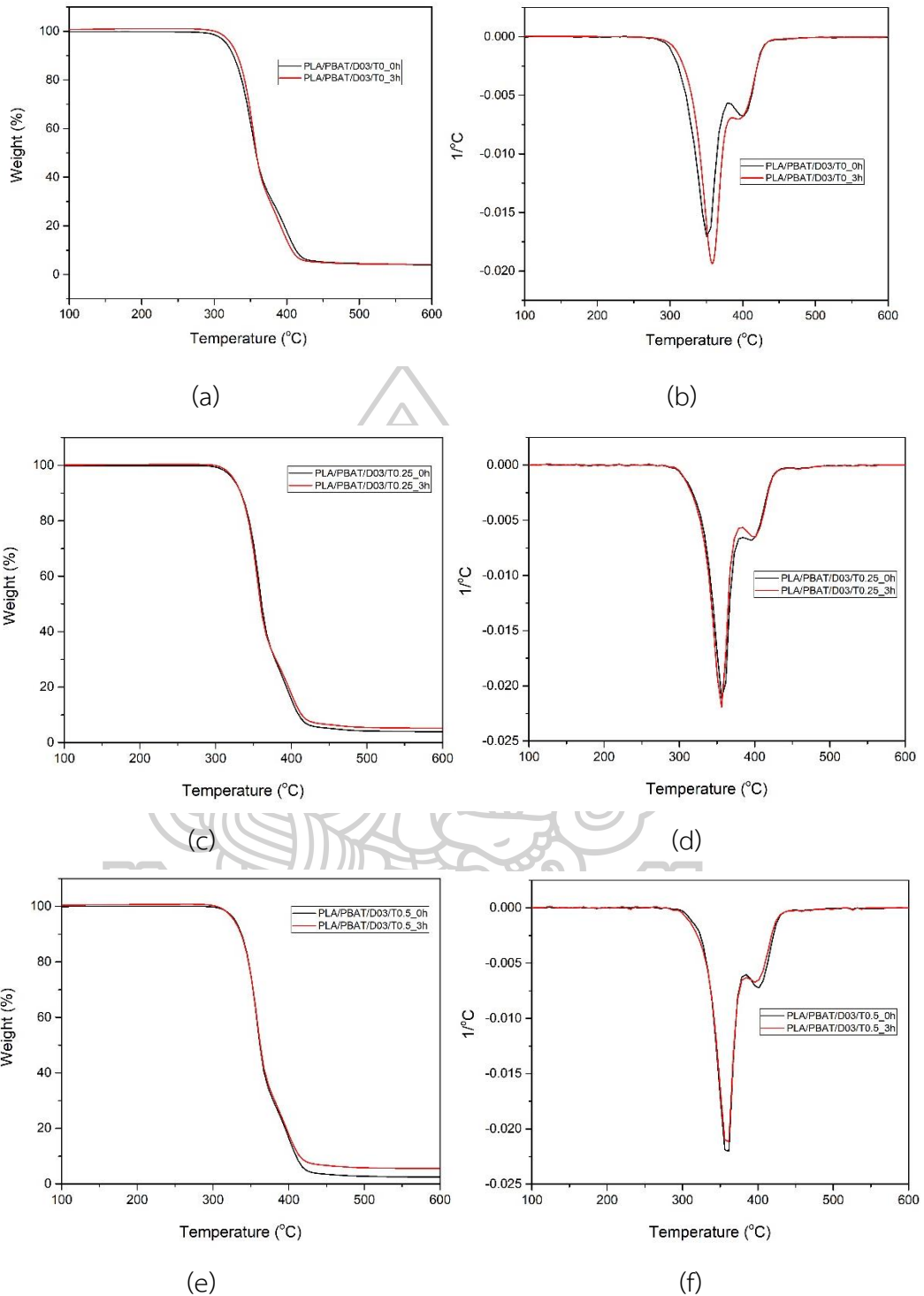
รูปที่ 4-25 ค่าสีจากการวัดด้วยระบบ CIELAB ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณ 0 0.25 0.5 1 และ 2 phr หลังจากการฉายรังสียูวีเอที่เวลาต่างๆ (a) L (lightness), (b) a (redness, greenness) และ (c) b (yellowness, blueness)

จากผลการวัดสีของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ เมื่อผ่านการฉายรังสียูวีเอที่เวลา 1 2 และ 3 ชั่วโมง ด้วยระบบ CIELAB แสดงดังรูปที่ 4-25 เมื่อพิจารณาค่า L (lightness) พบว่าเมื่อปริมาณ TiO_2 มากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มคอมพอสิตมีค่า L มากขึ้นเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามเวลาในการฉายรังสียูวีเอที่มากขึ้นไม่ส่งผลต่อค่า L ของฟิล์มคอมพอสิต และสำหรับค่า a (แดง-เขียว) พบว่าฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 มากขึ้น ส่งผลให้ค่า a มีค่ามากขึ้น และมีค่ามากที่สุดเมื่อฉายรังสียูวีเอ 3 ชั่วโมง และเมื่อพิจารณาค่า b (เหลือง-น้ำเงิน) พบว่าเมื่อเติม TiO_2 ปริมาณมากขึ้นในฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ส่งผลให้ b มีค่าน้อยลง แต่เมื่อฉายรังสียูวีเอนานขึ้น ไม่ส่งผลให้ค่า b แตกต่างกัน ดังนั้นเวลาในการฉายรังสียูวีเอนานขึ้นถึง 3 ชั่วโมง และปริมาณการเติม TiO_2 ที่มากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มคอมพอสิตมีสีออกแดงมากขึ้นเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานของฟิล์มคอมพอสิต

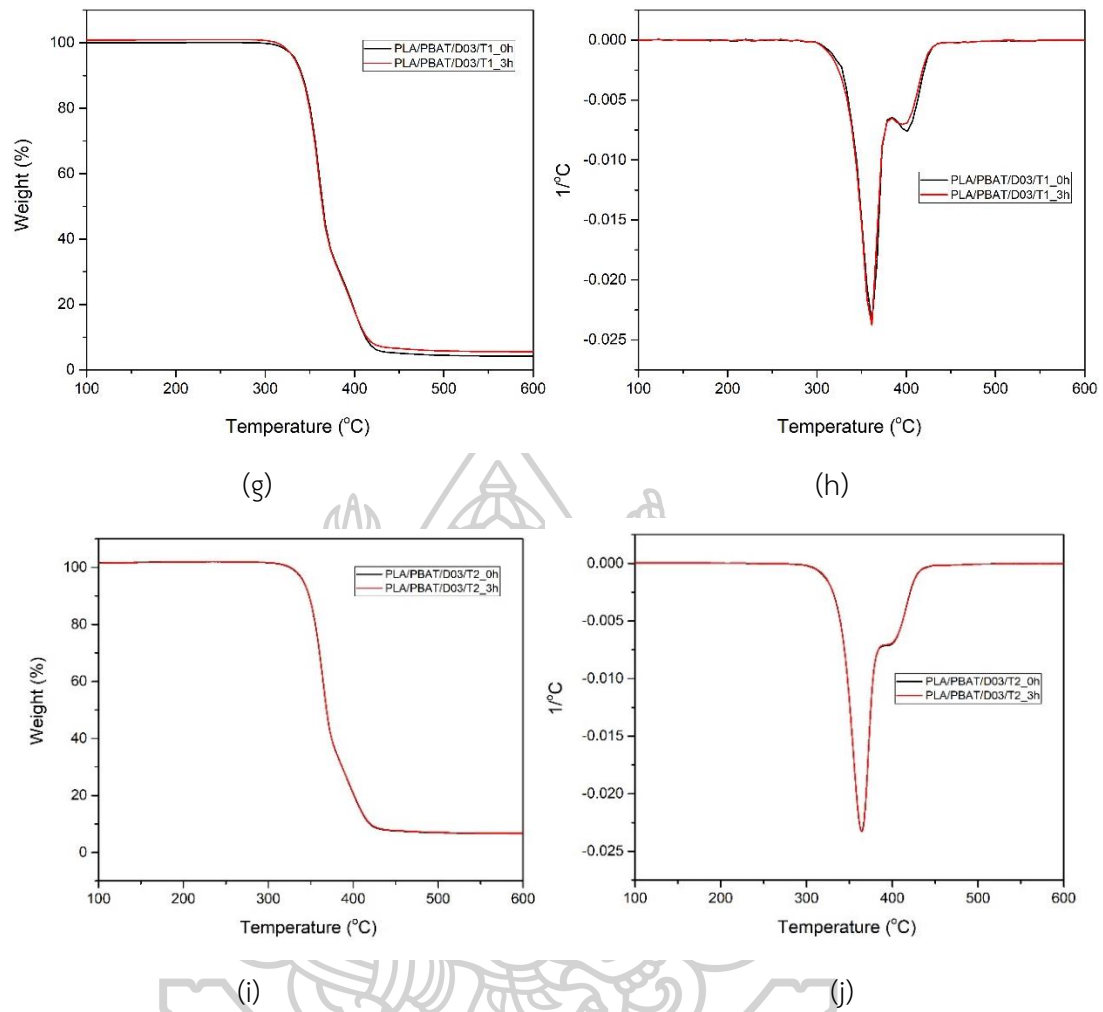
8.2 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

ตารางที่ 4-17 อุณหภูมิการสลายตัว (T_d) ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ ที่ผ่านการฉายรังสียูวี 0 และ 3 ชั่วโมง จากเทคนิค TGA

Sample	T_d (°C)			
	UV exposure time			
	0 h		3 h	
	PLA	PBAT	PLA	PBAT
PLA/PBAT/D03/T0	351.83	402.33	354.73	400.92
PLA/PBAT/D03/T0.25	357.33	402.00	355.30	402.33
PLA/PBAT/D03/T0.5	359.00	402.67	358.83	402.17
PLA/PBAT/D03/T1	361.17	402.83	360.17	402.17
PLA/PBAT/D03/T2	363.92	401.87	364.01	401.38



รูปที่ 4-26 TGA thermograms ของฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณ (a, b) 0, (c, d) 0.25, (e, f) 0.5 (g, h) 1 และ (i, j) 2 phr สำหรับฟิล์มที่ผ่านการฉายรังสียูวีเอ 0 และ 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4-26 (ต่อ)

จากผลการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ ซึ่งผ่านการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 0 และ 3 ชั่วโมง ด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) แสดงดังรูปที่ 4-26 และตารางที่ 4-17 เมื่อพิจารณาฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติม TiO_2 มากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature; T_d) ของ PLA มีค่ามากขึ้น บ่งบอกว่า TiO_2 ช่วยทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของ PLA ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของ PBAT อาจเนื่องจาก TiO_2 มีความเข้ากันได้กับวัฏภาคของ PLA มากกว่า PBAT ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Antonella Marra และคณะ [29] ที่ทำการศึกษาผลของ TiO_2 และ ZnO ต่อการย่อยสลายของ PLA พบว่าเมื่อฉายรังสียูวีเป็นเวลา 17 วัน ไม่ส่งผลต่อการลดลงของน้ำหนัก (%weight loss) ของฟิล์มคอมพอสิต PLA ที่มีการเติม TiO_2 และเมื่อพิจารณาการเติม TiO_2 2 phr พบว่า T_d ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT มีค่ามากขึ้น อาจเนื่องจาก

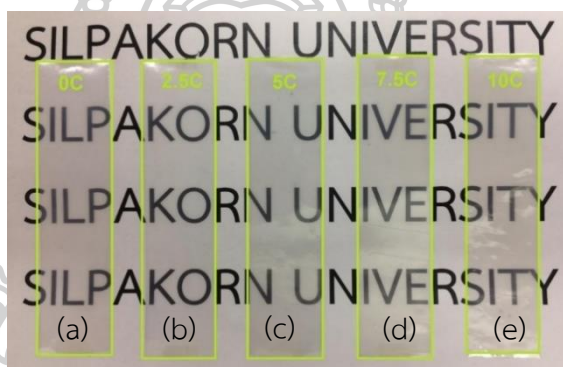
ในช่วงแรก TiO_2 อาจทำหน้าที่เป็น Barrier ในการป้องกันความร้อน และทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ที่ติดอยู่กับ TiO_2 เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohammed Zorah และคณะ [71] ที่ทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของ PLA โดยการเติม TiO_2 ซึ่งพบว่าเมื่อเติม TiO_2 ปริมาณ 0.5-7.5 %wt ส่งผลให้ T_{onset} และ $T_{50\%}$ ของ PLA มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากในช่วงแรก TiO_2 อาจทำหน้าที่เป็น Barrier ในการป้องกันความร้อน และทำให้สายโซ่ PLA ที่ติดอยู่กับ TiO_2 เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น และเมื่อพิจารณาเวลาในการฉายรังสียูวีเอ พบว่าเมื่อฉายรังสียูวีเอนานขึ้น ไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิตเมื่อมีการเติม TiO_2 ปริมาณต่างๆ ถึงแม้ว่าเมื่อ TiO_2 ได้รับการฉายรังสียูวีเอจะช่วยเร่งให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวได้เร็วขึ้น [72] แต่สำหรับงานวิจัยนี้ พบว่าการฉายรังสียูวีเอเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ไม่ได้ส่งผลให้ฟิล์มคอมพอสิตมีเสถียรภาพทางความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไป

จากการศึกษาผลของการเติม TiO_2 ในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ในการทดลองตอนที่ 2 พบว่าการเติม TiO_2 ในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ส่งผลให้ PLA และ PBAT มีความเข้ากันได้มากขึ้น วัฏภาคของพอลิเมอร์ผสมสามารถจึงยึดเกาะกันได้ดีมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break มีค่าสูงสุดที่ปริมาณการเติม TiO_2 ที่เหมาะสมปริมาณหนึ่งๆ แต่อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงกลของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT มีค่าลดลงเมื่อเติม TiO_2 มากเกินกว่าปริมาณที่เหมาะสมดังกล่าว นอกจากนี้เมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณมากขึ้นและฉายรังสียูวีเอปริมาณนานขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มคอมพอสิตยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และดูดซับแก๊สเอทิลีนได้มากขึ้น จึงมีประสิทธิภาพในการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับสินค้าทางการเกษตรได้ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากบรรจุภัณฑ์ควรมีคุณสมบัติในการมองเห็นสินค้าภายใน ซึ่งความขุ่นของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT แปรผันตามปริมาณการเติม TiO_2 จึงทำการเลือก TiO_2 ปริมาณ 1 phr เนื่องจากฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติม TiO_2 1 phr มีความสามารถในการต้านจุลชีพได้ดีและมีความสามารถในการดูดซับแก๊สเอทิลีนได้มาก จึงสามารถชะลอการสุกของกล้วยได้นานขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มคอมพอสิตดังกล่าวยังคงผ่านข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม “ถุงพลาสติกสำหรับบรรจุอาหาร” มาตรฐานอุตสาหกรรมเลขที่ 1027-2553 ซึ่งระบุไว้ว่าต้องมีค่าความทนทานต่อแรงดึง ณ จุดขาดที่มากกว่าหรือเท่ากับ 11.8 MPa และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่มากกว่าหรือเท่ากับ 150% และพบว่าปริมาณการฉายรังสียูวีเอ 3 ชั่วโมง ไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์ม และลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม จึงเลือกช่วงเวลา 3 ชั่วโมงในการฉายรังสียูวีเอเพื่อกระตุ้นให้เกิดกระบวนการ Photocatalytic ซึ่งจะถูกนำไปศึกษาต่อในการทดลองตอนที่ 4 ต่อไป

ตอนที่ 3 ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยในปริมาณต่างๆ

ในตอนที 3 จะทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ในอัตราส่วน 70/30 ที่มีการเติม DCP 0.03 phr โดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย (cinnamom oil, CEO) เป็น 2.5 5 7.5 และ 10 phr จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางแสง ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน เสถียรภาพทางความร้อน และสมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์

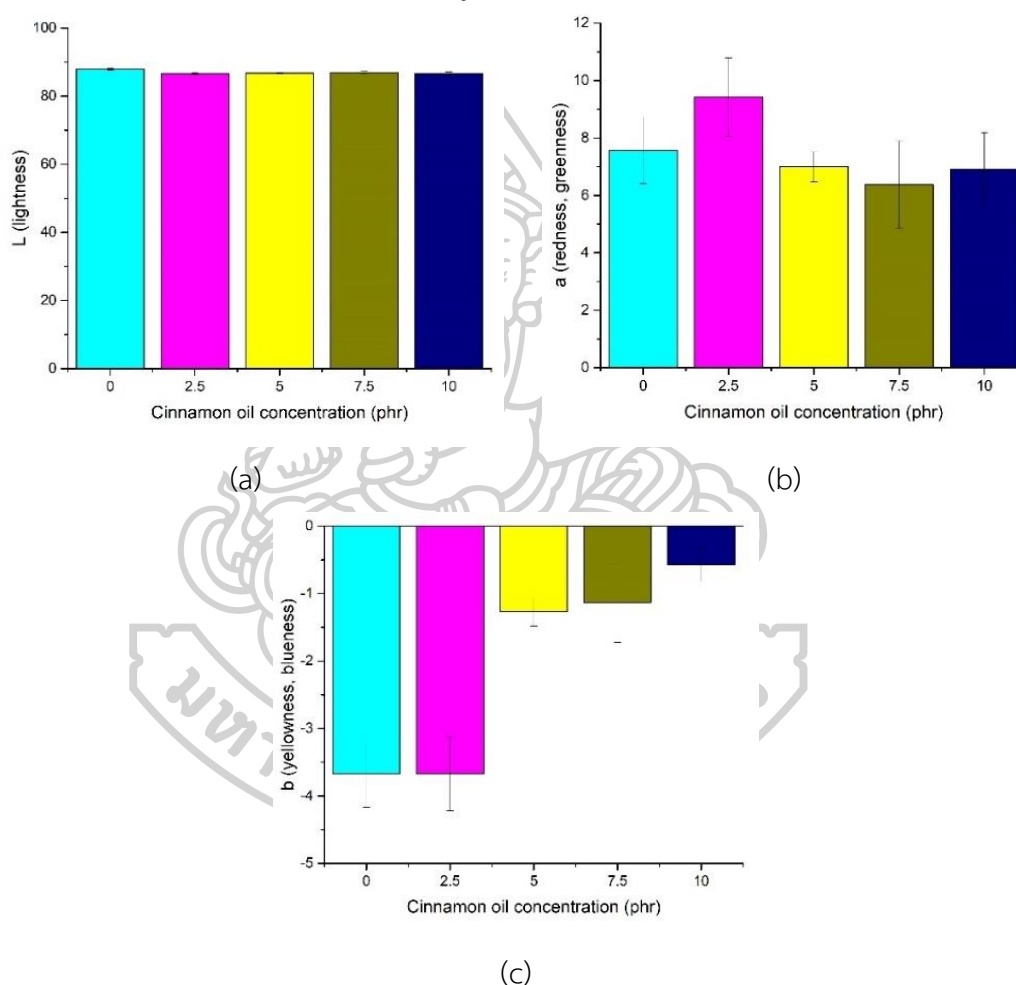
1. การศึกษาสมบัติทางแสงและค่าสีจากระบบ CIELAB ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่างๆ



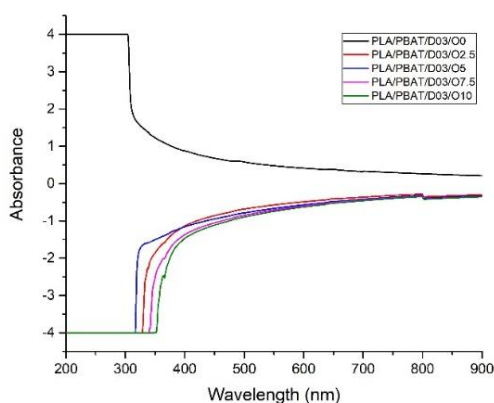
รูปที่ 4-27 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมต่อการมองเห็นเมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย (a) 0, (b) 2.5, (c) 5, (d) 7.5 และ (e) 10 phr

จากผลการทดสอบทางแสงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีต่อการมองเห็นดังแสดงในรูปที่ 4-27 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีสีเหลืองมากขึ้นตามปริมาณน้ำมันหอมระเหยอบเชยที่เติมลงไป เนื่องจากน้ำมันหอมระเหยเป็นของเหลวที่มีสีเหลืองเข้ม และจากผลการวัดสีของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่างๆ ด้วยระบบ CIELAB แสดงดังรูปที่ 4-28 เมื่อพิจารณาค่า L (lightness) พบว่าเมื่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยอบเชยมากขึ้นไม่ส่งผลต่อค่า L ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และสำหรับค่า a (แดง-เขียว) พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยมากขึ้น ส่งผลให้ค่า a มีแนวโน้มที่ลดลง และเมื่อพิจารณาค่า b (เหลือง-น้ำเงิน) พบว่าเมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย ปริมาณมากขึ้นในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ส่งผลให้ b มีค่าเพิ่มขึ้น (ติดลบน้อยลง) บ่งบอกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 มีสีออกเหลืองมากขึ้นตามปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยที่มากขึ้น เนื่องจากลักษณะทาง

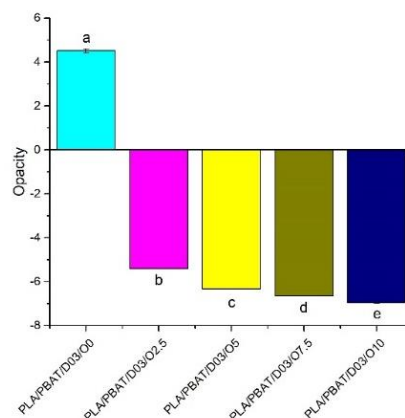
กายภาพของน้ำมันหอมระเหยอบเชยมีสีเหลืองเข้ม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบทางแสงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีต่อการมองเห็น และเมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดกลืนรังสีในช่วง UV-Vis ดังรูปที่ 4-29(a) พบว่าเมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มการดูดกลืนรังสีที่ 600 นาโนเมตร น้อยลง จึงส่งผลให้ค่า Opacity ที่ค่าการดูดกลืนรังสี 600 นาโนเมตร มีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีความใสมากขึ้นเมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยมากขึ้นดังรูปที่ 4-27



รูปที่ 4-28 ค่าสีจากการวัดด้วยระบบ CIELAB ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่างๆ (a) L (lightness), (b) a (redness, greenness) และ (c) b (yellowness, blueness)



(a)



(b)

รูปที่ 4-29 ผลการทดสอบฟิล์มที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่างๆ ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrometer (a) การดูดกลืนรังสีในช่วง UV-Vis และ (b) ความทึบแสง

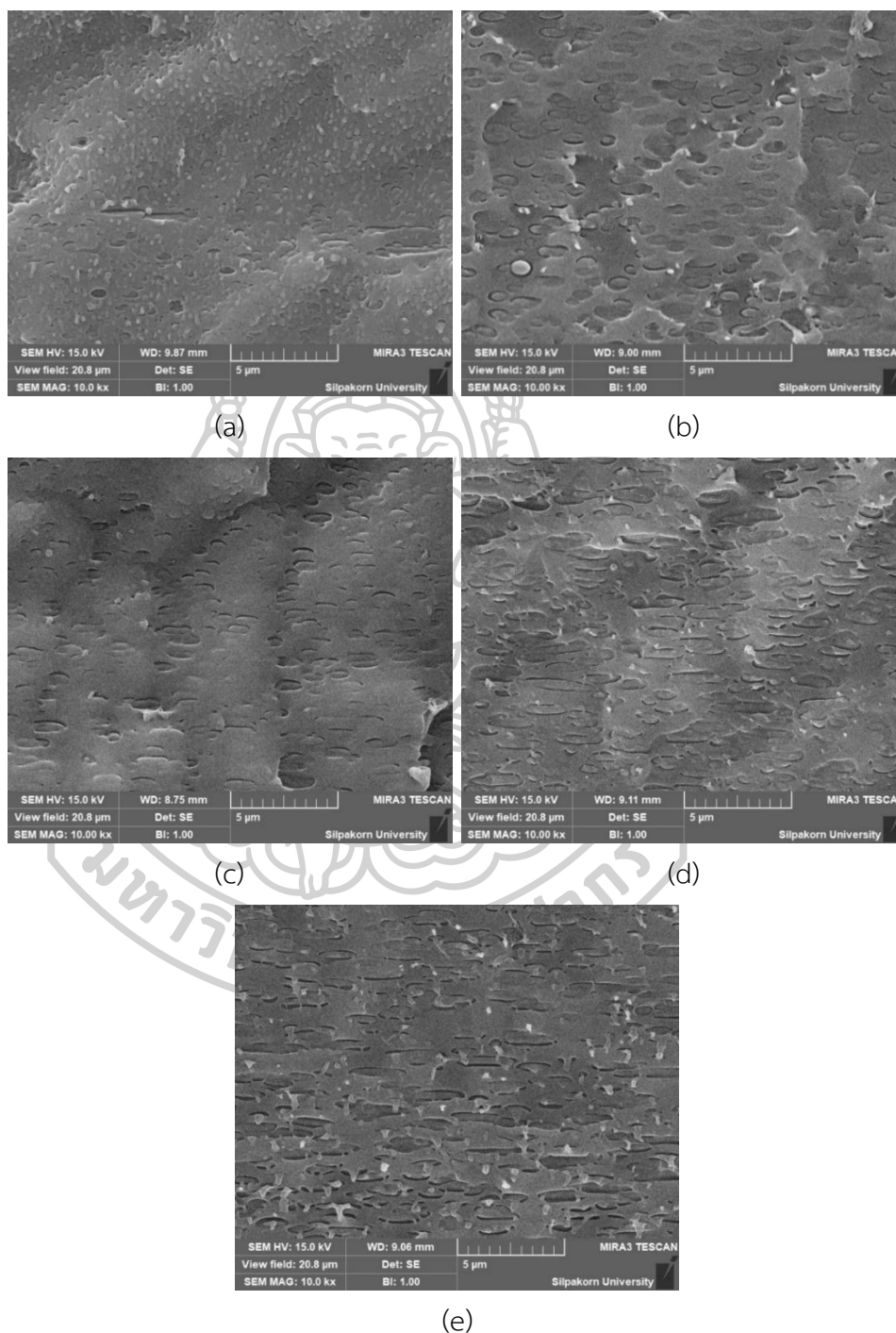
ตารางที่ 4-18 ค่าการดูดกลืนรังสีในช่วง UV-Vis และค่าความทึบแสงของฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยที่ปริมาณต่างๆ

Sample	Absorbance at 600 nm	Opacity
PLA/PBAT/D03/O0	0.406 ± 0.007^a	4.51 ± 0.09^a
PLA/PBAT/D03/O2.5	-0.486 ± 0.001^b	-5.41 ± 0.01^b
PLA/PBAT/D03/O5	-0.569 ± 0.001^b	-6.32 ± 0.01^c
PLA/PBAT/D03/O7.5	-0.598 ± 0.001^b	-6.65 ± 0.01^d
PLA/PBAT/D03/O10	-0.627 ± 0.001^b	-6.96 ± 0.02^e

2. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

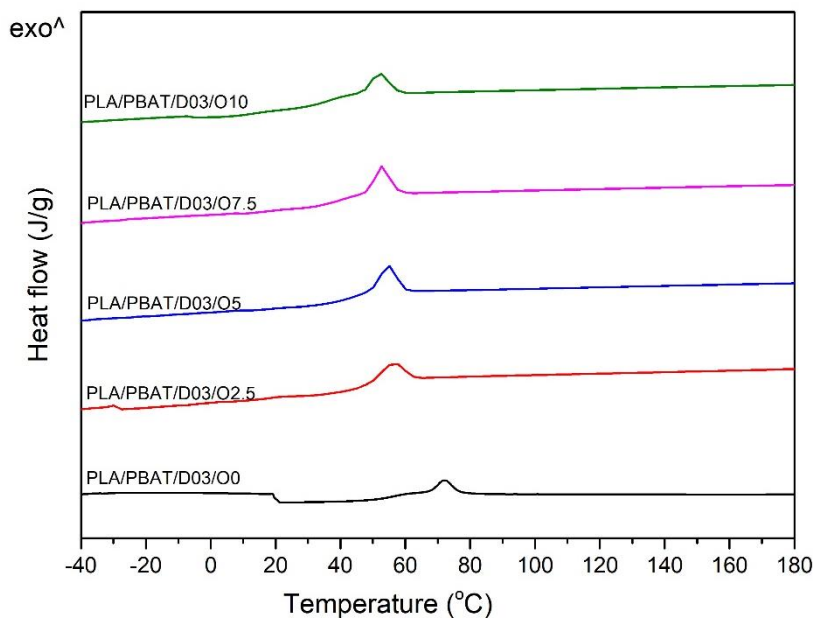
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่างๆ ได้ทำการศึกษากับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) โดยชิ้นงานฟิล์มถูกนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลว และทำให้แตกหักอย่างรวดเร็ว โดยรูปที่ 4-30 แสดงภาพถ่ายภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 10,000 เท่า เมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยในปริมาณต่างๆ พบว่ามีร่องรอยการมีอยู่ของหยดน้ำมันภายในฟิล์ม โดยมีลักษณะเป็นช่องว่างแทรกอยู่ในเนื้อฟิล์ม เนื่องจากพอลิเมอร์และน้ำมันหอมระเหยอบเชยไม่สามารถผสมเข้ากันได้ และเมื่อพิจารณาการเติมน้ำมันหอมระเหย

อบเซยมากขึ้น พบว่าฟิล์มมีช่องว่างดังกล่าวมากขึ้น และพบลักษณะการยึดออกของเนื้อพอลิเมอร์มากขึ้นโดยเฉพาะในภูมิภาคของ PBAT ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน

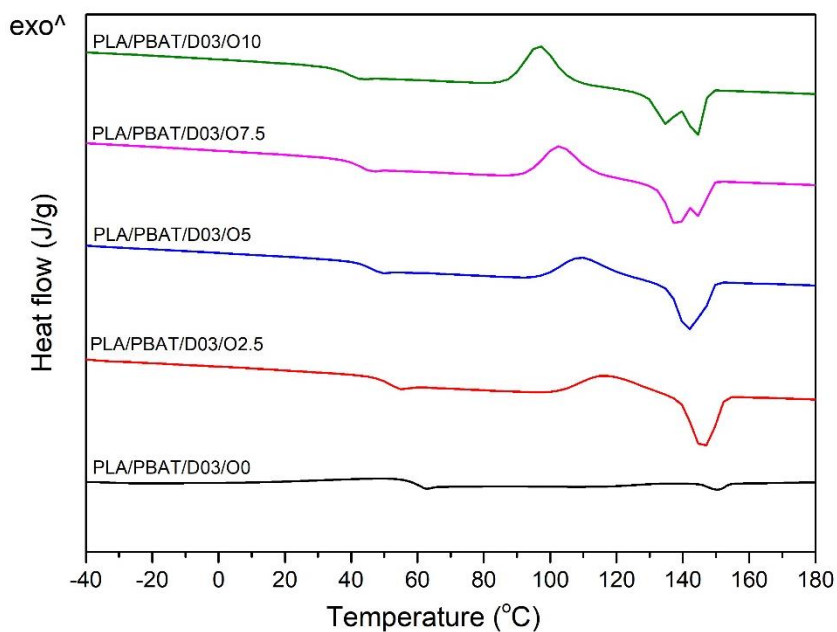


รูปที่ 4-30 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง (cross section) ที่ได้จากเทคนิค SEM ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม (a) PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเซยในปริมาณ (a) 0, (b) 2.5, (c) 5, (d) 7.5 และ (e) 10 phr ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

3. การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



รูปที่ 4-31 DSC Thermograms ในขั้นตอนการทำให้เย็นตัวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4-32 DSC Thermograms ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่าง ๆ

ตารางที่ 4-19 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มโพลีเอสเตอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม CEO ปริมาณต่างๆ จากเทคนิค DSC

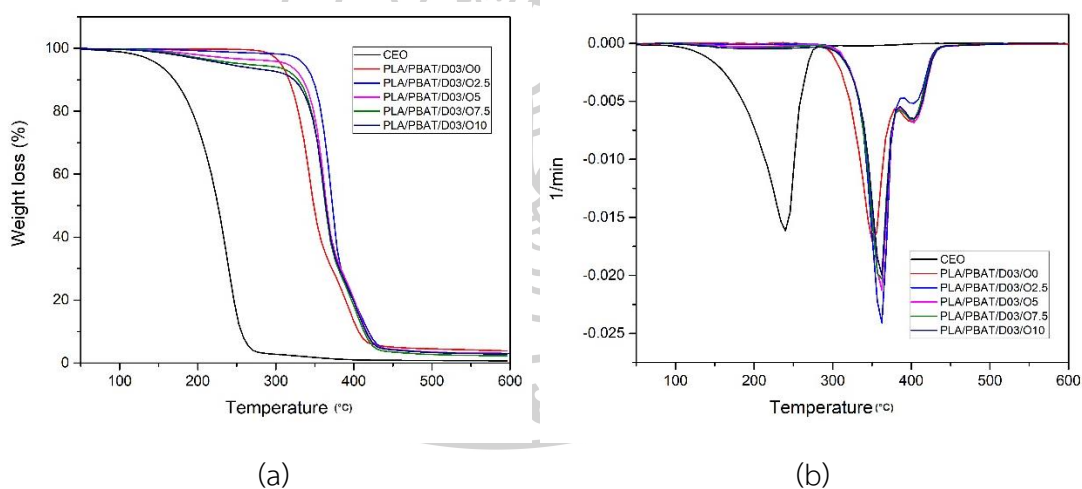
Sample	T _c (°C)		ΔH _c (J/g)		T _g (°C)		T _{cc} (°C)		ΔH _{cc} (J/g)		T _m (°C)		X _c (%)		Normalized X _c (%)	
	PBAT	PBAT	PBAT	PBAT	PLA	PBAT	PLA	PBAT	PLA	PLA	PBAT	PLA	PBAT	PLA		PBAT
PLA/PBAT/D03/O0	71.75	4.56	59.24	-31.59	134.92	0.22	150.73	110.00	2.76	4.56	7.32	2.43				
PLA/PBAT/D03/O2.5	56.67	3.07	51.38	-39.70	116.53	12.33	145.93	-	23.50	-	23.50	4.56				
PLA/PBAT/D03/O5	55.03	4.63	45.16	-41.19	109.37	12.97	141.61	-	24.42	-	24.42	4.50				
PLA/PBAT/D03/O7.5	52.70	4.33	41.63	-42.29	102.89	14.07	138.27, 144.52	-	27.24	-	27.24	5.62				
PLA/PBAT/D03/O10	52.01	3.71	38.44	-39.67	96.76	15.73	134.67, 144.11	-	28.83	-	28.83	4.67				

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4-31, 4-32 และตารางที่ 4-19 เมื่อพิจารณาค่า Glass transition temperature (T_g) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยมากขึ้น พบว่าค่า T_g มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากน้ำมันหอมระเหยอบเชยทำหน้าที่เป็น Plasticizer ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Panitee Suwanamornlert และคณะ [73] ที่ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์ม PLA/Poly(butylene-succinate-co-adipate) (PBSA) เมื่อมีการเติม Thymol oil พบว่าเมื่อเติม Thymol มากขึ้น ส่งผลให้ T_g ของฟิล์มพอลิเมอร์ PLA/PBSA มีค่าลดลง เนื่องจากอิทธิพลการเป็น Plasticizer ของ Thymol oil ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดได้ง่ายขึ้น เมื่อพิจารณาค่า Crystallization temperature (T_c) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยมากขึ้น พบว่าค่า T_c มีแนวโน้มลดลง เช่นเดียวกัน โดยตำแหน่ง T_c ดังกล่าวเป็นตำแหน่งการตกผลึกของ PBAT ซึ่งบ่งบอกว่า PBAT เกิดการตกผลึกได้ยากขึ้น อาจเนื่องจากผลึกของ PLA (โดย Pure PLA มี T_c เท่ากับ 102.20 องศาเซลเซียส [50]) ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ PBAT จึงทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น และตกผลึกได้ช้าลง

เมื่อพิจารณาค่า Melting temperature (T_m) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยมากขึ้น พบว่า ปรากฏ T_m ของ PLA เท่านั้น เนื่องจากมีการเกิดพีค Cold crystallization temperature (T_{cc}) ซึ่งเป็นการตกผลึกอีกครั้งของ PLA [74] เนื่องจากเมื่อพิจารณาปริมาณผลึกโดยรวม ($\%X_c$) ของ PLA มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณน้ำมันหอมระเหยอบเชยมากขึ้น โดยพีค T_{cc} ของ PLA มีความเด่นชัดมากกว่าการหลอมผลึกของ PBAT จึงบดบังพีค T_m ของ PBAT แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03/O7.5 และ PLA/PBAT/D03/O10 ปรากฏ T_m 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งอุณหภูมิต่ำและตำแหน่งอุณหภูมิสูง โดยตำแหน่งอุณหภูมิต่ำแสดงถึงการหลอมผลึกที่มีความสมบูรณ์ต่ำ และตำแหน่งอุณหภูมิสูงแสดงถึงการหลอมเหลวผลึกอย่างสมบูรณ์ อาจเกิดจากในขั้นตอนการทำให้เย็นตัว อาจทำให้ PLA ตกผลึกได้ไม่สมบูรณ์ เมื่อ PLA ถูกให้ความร้อนในครั้งที่ 2 จึงปรากฏพีคการคายพลังงาน (exothermic peak) ซึ่งบ่งบอกว่ามีผลึกบางส่วนยังตกผลึกไม่สมบูรณ์ โดยเมื่อผลึกดังกล่าวได้รับความร้อนสูงขึ้นจะหลอมและรวมกับผลึกที่เกิดขึ้นทั้งหมดอีกครั้ง (recrystallized) จึงทำให้เกิดพีคการดูดความร้อน (endothermic peak) ซึ่งแสดงถึงการหลอมผลึกอย่างสมบูรณ์ในที่สุด [75] และเมื่อพิจารณาปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยที่เพิ่มมากขึ้น พบว่า T_{cc} มีค่าลดลง เนื่องจากสายโซ่ของ PLA มีการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น จึงเริ่มมีการตกผลึก

ได้เร็วมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mónica Hernández-López และคณะ [74] ที่มีการศึกษาสมบัติของ PLA/PBAT อัตราส่วน 60 : 40 เมื่อมีการเติมน้ำมันหอมระเหยสน (pine essential oil, pine EO) พบว่าเมื่อเติม Pine EO ส่งผลให้ไม่ปรากฏพีค T_m ของ PBAT คาดว่าเกิดจาก PLA มีการเกิด T_{cc} ขึ้นในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับ T_m ของ PBAT จึงส่งผลให้สังเกต T_m ของ PBAT ได้ยาก บ่งบอกว่าในขั้นตอนการทำให้เย็นตัวและอัตราการเย็นตัวนั้นส่งผลให้ PBAT เกิดผลึกได้สมบูรณ์ แต่ผลึกของ PLA เกิดไม่สมบูรณ์ จึงปรากฏพีค T_{cc} ที่ขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 และพบว่า T_{cc} มีค่าน้อยลงเมื่อปริมาณ Pine EO สูงขึ้น บ่งบอกว่า PLA สามารถตกผลึกได้เร็วขึ้น และเมื่อพิจารณาต่อปริมาณผลึกที่เกิดจากขั้นตอนการเย็นตัว ($\%X_c$ normalized) ของ PLA ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT พบว่าเมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยมากขึ้น ไม่ส่งผลให้ $\%X_c$ normalized ของ PLA เปลี่ยนแปลง บ่งบอกว่าพฤติกรรมการตกผลึกของ PLA ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไป

4. การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA



รูปที่ 4-33 TGA thermograms ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 เมื่อมีการเติมน้ำมันหอมระเหยปริมาณต่างๆ (a) TGA และ (b) DTG

ตารางที่ 4-20 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติม CEO ปริมาณต่างๆ จากเทคนิค TGA

Sample	T _d (°C)		
	CEO	PLA	PBAT
CEO	240.52	-	-
PLA	-	350.00 [76]	-
PBAT	-	-	397.00 [76]
PLA/PBAT/D03/O0	-	351.83	402.33
PLA/PBAT/D03/O2.5	188.48	363.12	402.78
PLA/PBAT/D03/O5	175.67	362.89	403.10
PLA/PBAT/D03/O7.5	182.24	361.76	403.10
PLA/PBAT/D03/O10	182.43	362.81	402.94

ตารางที่ 4-21 ปริมาณการสูญเสียน้ำมันหอมระเหยอบเชยในระหว่างกระบวนการหลอมขึ้นรูปจากเทคนิค TGA

Sample	Initial content		Remaining content at 285 °C (%wt)	Weight loss compared to initial content (%)
	(phr)	(%wt)		
PLA/PBAT/D03/O2.5	2.5	2.44	1.58	35.25
PLA/PBAT/D03/O5	5	4.76	3.92	17.65
PLA/PBAT/D03/O7.5	7.5	6.98	5.69	18.48
PLA/PBAT/D03/O10	10	9.09	6.88	24.31

จากผลการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 4-33, ตารางที่ 4-20 และ 4-21 พบว่าน้ำมันหอมระเหยอบเชยมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนเท่ากับ 240.52 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณาผลของความร้อนจากกระบวนการขึ้นรูป จากตารางที่ 4-21 โดยพิจารณาที่อุณหภูมิ 285 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็น

อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวของน้ำมันหอมระเหยอบเชย (จากรูปที่ 4-33b) โดยพบว่าการสูญเสีย น้ำมันหอมระเหยอบเชยไปในระหว่างกระบวนการเล็กน้อย ทั้งนี้การสูญเสียดังกล่าวไม่ส่งผลต่อความสามารถในการต้านการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และเมื่อพิจารณาเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย พบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (degradation temperature; T_d) ชัดเจน 3 ตำแหน่ง ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิการสลายตัวของน้ำมันหอมระเหยอบเชย [77], PLA (350 องศาเซลเซียส [76]) และ PBAT (397 องศาเซลเซียส [76])

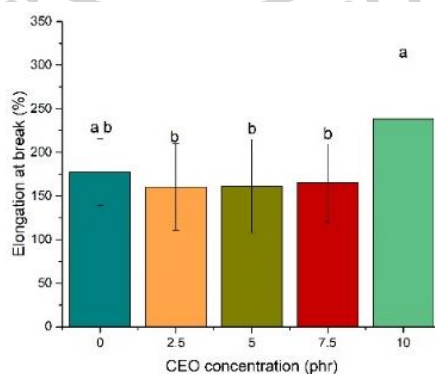
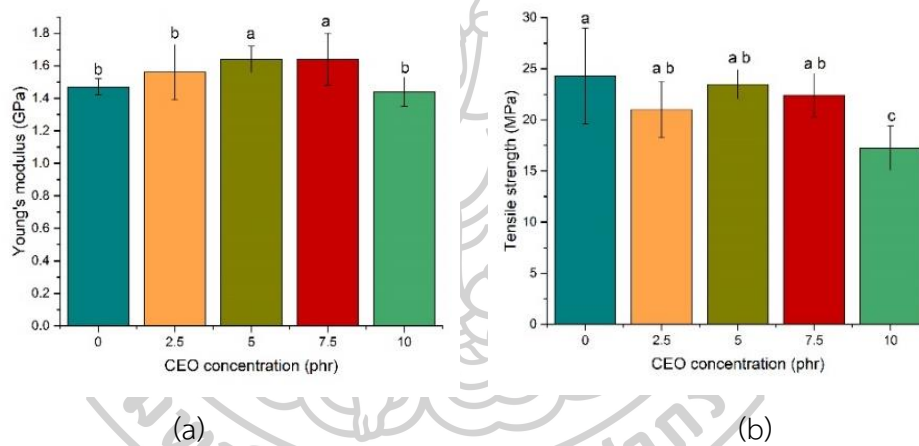
เมื่อพิจารณา T_d ของน้ำมันหอมระเหยอบเชยในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย พบว่ามีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ T_d ของน้ำมันหอมระเหยอบเชย อาจเกิดจากโครงสร้างของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเกี่ยวพันกันของสายโซ่ที่ซับซ้อน จึงทำให้น้ำมันที่อยู่ภายในมีพื้นที่ผิวมากขึ้น และเกิดการระเหยเมื่อได้รับความร้อนได้เร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Monika Strasakova และคณะ [78] ที่ทำการศึกษาผลของการเติมน้ำมันหอมระเหยยี่หว่า (caraway essential oil ; EO) ลงใน Polypropylene matrix/Inert carrier talc (PP/TC) พบว่าเมื่อเติม EO ลงใน PP/TC ทำให้ T_d ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของ EO มีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ T_d ของ EO โดยผู้วิจัยได้ให้ข้อเสนอว่าอาจเกิดจากโครงสร้างที่มีรูพรุนของคอมพอสิต จึงทำให้ EO ระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำลง

โดยการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยลงในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ส่งผลให้ค่า T_d มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03/O0 แต่อย่างไรก็ตามปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยที่มากขึ้นไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Giita Silverajah และคณะ [79] ที่ทำการศึกษสมบัติของ PLA/Epoxidized palm oil พบว่าเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้นเมื่อเติม EPO 1%wt อาจเนื่องมาจาก Interaction ระหว่าง PLA matrix และ EPO อาจทำให้น้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การกระจายตัวของ EPO อย่างสม่ำเสมอใน PLA อาจทำหน้าที่เป็น Barrier sheet ในการป้องกันการเกิด Oxidation รวมถึงอาจขัดขวางการซึมผ่านของ Volatile product จากพอลิเมอร์ผสมและช่วยชะลอกระบวนการสลายตัวด้วยความร้อน

5. การศึกษาสมบัติเชิงกล

ตารางที่ 4-22 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย ปริมาณต่างๆ

Sample	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PLA/PBAT/D03/O0	1.47 ± 0.05 ^b	25.10 ± 2.65 ^a	177.16 ± 38.21 ^{a,b}
PLA/PBAT/D03/O2.5	1.56 ± 0.17 ^b	21.00 ± 2.75 ^{a,b}	160.30 ± 49.78 ^b
PLA/PBAT/D03/O5	1.64 ± 0.08 ^a	23.24 ± 0.95 ^{a,b}	161.36 ± 53.60 ^b
PLA/PBAT/D03/O7.5	1.64 ± 0.16 ^a	22.43 ± 2.12 ^{a,b}	165.08 ± 44.40 ^b
PLA/PBAT/D03/O10	1.44 ± 0.09 ^b	17.25 ± 2.19 ^c	238.28 ± 64.90 ^a



(c)

รูปที่ 4-34 สมบัติเชิงกล (a) Young's modulus, (b) Tensile strength และ (c) Elongation at break ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่าง ๆ

จากผลการศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบการดึงยืด ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4-34 และตารางที่ 4-22 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03/O0 มีค่าความทนทานต่อการเปลี่ยนรูป (Young's modulus), ความต้านทานต่อแรงดึงยืด (Tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวก่อนการแตกหัก (Elongation at break) เท่ากับ 1.47 GPa, 25.10 MPa และ 177.16% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่มีปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยมากขึ้น (0-7.5 phr) ส่งผลให้ค่า Young's modulus มีค่ามากขึ้น เนื่องจากการแข่งขันกันระหว่างการเป็น Plasticizer ของน้ำมันหอมระเหยอบเชยและปริมาณผลึก กล่าวคือการมีน้ำมันหอมระเหยอบเชยใน Polymer matrix เป็นการเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน พบว่าน้ำมันหอมระเหยอบเชยทำให้ผลึกโดยรวมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้น จึงส่งผลให้ค่า Young's modulus มีค่าสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาค่า Tensile strength ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่มีปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยมากขึ้น พบว่าไม่ส่งผลให้ค่า Tensile strength เกิดการเปลี่ยนแปลง อาจเนื่องมาจากปริมาณน้ำมันยังไม่ส่งผลให้ Cohesive layer เปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยเท่ากับ 10 phr ส่งผลให้ค่า Young's modulus และ Tensile strength ต่ำลง เนื่องจากผลของการเป็น Plasticizer ของน้ำมันหอมระเหยอบเชยสูงกว่าผลของปริมาณผลึก จึงส่งผลให้ระยะห่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์มากขึ้น ความสามารถในการรับแรงของวัสดุจึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Paula Judith Pérez Espitia และคณะ [80] ที่พบว่าน้ำมันจะส่งผลให้แรงระหว่างพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ (cohesive force) เปลี่ยนแปลงไป โดยลด Intermolecular cohesion ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงวัสดุ แต่อย่างไรก็ตามจากพฤติกรรมการเป็น Plasticizer ของน้ำมันส่งผลให้สายโซ่ของ PLA เคลื่อนที่ได้ง่ายและมีปริมาณผลึกมากขึ้น ซึ่งจากการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยในปริมาณน้อย Interaction ระหว่างน้ำมันและ Polymer matrix อาจไม่มากพอที่ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ง่าย จึงทำให้อิทธิพลของปริมาณผลึกสูงกว่าการเป็น Plasticizer ของน้ำมันหอมระเหยอบเชย

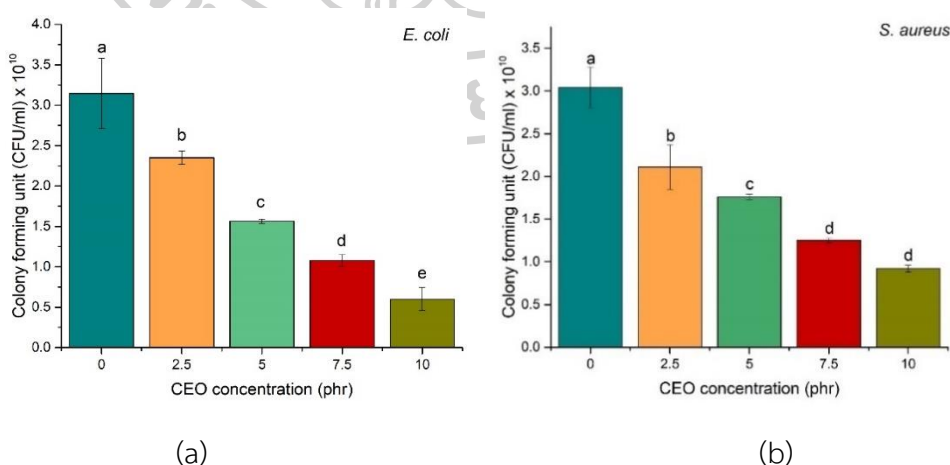
และเมื่อพิจารณาค่า Elongation at break ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT พบว่าเมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยในช่วง 0 -7.5 phr พบว่าค่า Elongation at break แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการแข่งขันกันระหว่างการเป็น Plasticizer ของน้ำมันและปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ โดยอิทธิพลของการเป็น Plasticizer ของน้ำมันถูกรบกวนด้วยปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้น จึงไม่ส่งผลให้ค่า Elongation at break เปลี่ยนแปลงไป [80] แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเติมน้ำมันหอมระเหย

เท่ากับ 10 phr ส่งผลให้ Elongation at break มีค่ามากขึ้น เนื่องจากผลของการเป็น Plasticizer ของน้ำมันหอมระเหยอบเชยสูงกว่าผลของปริมาณผลึก จึงส่งผลให้ระยะห่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์มากขึ้น การเกี่ยวพันกันของสายโซ่จึงน้อยลง และเคลื่อนผ่านกันได้ง่ายขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า Young's modulus และ Tensile strength ที่มีค่าลดลง

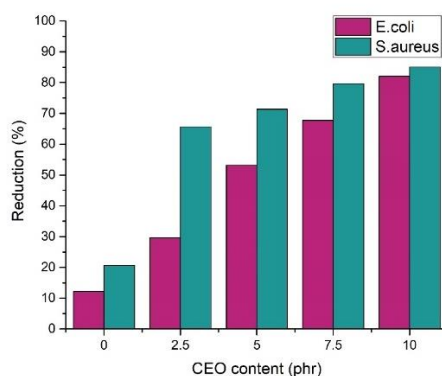
6. การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

ศึกษาสมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของฟิล์ม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่างๆ โดยใช้ *Escherichia coli* (*E.coli*) เป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมลบ และ *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) เป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมบวก

ความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่างๆ ซึ่งผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* แสดงในหน่วยโคโลนีต่อมิลลิลิตร (CFU/ml) ดังรูปที่ 4-35 และเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรียแสดงดังรูปที่ 4-36 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่ไม่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย ซึ่งเป็นตัวอย่างควบคุมสำหรับการศึกษาสมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย มีประสิทธิภาพน้อยมากในการยับยั้งการเติบโตของเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด โดยมีปริมาณโคโลนีของ *E.coli* และ *S.aureus* ที่นับได้ต่อมิลลิลิตร เท่ากับ 3.15×10^{10} และ 3.04×10^{11} CFU/ml ตามลำดับ



รูปที่ 4-35 จำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียที่นับได้ต่อมิลลิลิตร (CFU/ml) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยปริมาณต่างๆ โดยทำการทดสอบกับเชื้อแบคทีเรีย (a) *E.coli* (b) *S.aureus*



รูปที่ 4-36 เปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย 2.5 phr มีปริมาณโคโลนีของเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ต่อมิลลิลิตรลดลง 25.28 และ 30.67 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่ไม่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย และเมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดได้มากขึ้น เนื่องจากน้ำมันหอมระเหยอบเชยมีสมบัติในการไม่ชอบน้ำ จึงทำให้น้ำมันหอมระเหยแทรกตัวไปคั่นอยู่ระหว่างโซ่ไขมันซึ่งเป็นส่วนประกอบของแบคทีเรียและไมโทรคอนเดรีย ทำให้สารซึมผ่านเข้าออกผนังเซลล์มากขึ้น ส่งผลให้เซลล์ตาย นอกจากนี้ น้ำมันหอมระเหยยังทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ไม่คงตัว ยับยั้งกระบวนการเมแทบอลิซึมที่เยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เซลล์ตายลงในที่สุด [4, 24, 32] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jasim Ahmed และคณะ [32] พบว่าเมื่อเติม Cinnamon oil ปริมาณมากขึ้นลงใน PLA พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย *Listeria monocytogenes* ซึ่งเป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมบวก และ *Salmonella enterica sv thyphimurium* ซึ่งเป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมลบ ได้ดีมากขึ้น

7. การศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา

ตารางที่ 4-23 การเกิดเชื้อราบนผลสตอร์วเบอร์รี่ที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส

Day	Composite films				
	PLA/PBAT/ D03/O0	PLA/PBAT /D03/O2.5	PLA/PBAT /D03/O5	PLA/PBAT /D03/O7.5	PLA/PBAT /D03/O10
	0				
1					
3					
5					
7					

ศึกษาสมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยใช้ผลสตอร์วเบอร์รี่เป็นตัวแทนในการศึกษา จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของผลสตอร์วเบอร์รี่ที่เปลี่ยนแปลงไปดังตารางที่ 4-23 เมื่อพิจารณาเชื้อราบนผลสตอร์วเบอร์รี่ที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย โดยถูกปิดผนึกไว้พบว่าเกิดเชื้อราเมื่อเวลาผ่านไป 5 วัน และเมื่อพิจารณาการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยมากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อราบนผลสตอร์วเบอร์รี่ได้ดีขึ้น เนื่องจากส่วนประกอบของน้ำมันหอมระเหยมีส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ทำให้น้ำมันหอมระเหยแทรกตัวผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ซึ่งมีโปรตีนและไขมันเป็นองค์ประกอบได้ โดยน้ำมันหอมระเหยจะไปคั่นในส่วนของไขมันและไมโทคอนเดรีย (mitochondria) ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์เกิดความไม่คงตัว เกิดการยับยั้งกระบวนการเมตาบอลิซึมที่เยื่อหุ้มเซลล์ ทำลายโปรตีนที่เป็นส่วนประกอบหลักของเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้

การเคลื่อนที่ของโปรตอนในเซลล์ลดลง จึงทำให้ส่วนประกอบของไซโทพลาสซึมและสารเมทาบอลิต์ ไอออนรั่วไหลออกนอกเซลล์ จึงเป็นสาเหตุทำให้เซลล์ตายในที่สุด [24]

จากการศึกษาผลของการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ในตอนที่ 3 พบว่าการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีลักษณะเป็นช่องว่างแทรกอยู่บริเวณเนื้อฟิล์ม นอกจากนี้พบว่าปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยที่มากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีสีเหลืองมากขึ้น และจากพฤติกรรมการเป็น Plasticizer ของน้ำมัน ทำให้สายโซ่ของ PLA เคลื่อนที่ได้ง่ายและมีปริมาณผลึกมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่า Young's modulus และ Tensile strength มีค่าเพิ่มมากขึ้น ที่ปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย 2.5 – 7.5 phr เนื่องจากการแข่งขันกันระหว่างการเป็น Plasticizer ของน้ำมันหอมระเหยอบเชยและปริมาณผลึก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยเท่ากับ 10 phr พบว่าค่า Young's modulus และ Tensile strength มีค่าลดลง เนื่องจากผลของการเป็น Plasticizer ของน้ำมันสูงกว่าผลของปริมาณผลึก จึงส่งผลให้ระยะห่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์มากขึ้น การเกี่ยวพันกันของสายโซ่จึงน้อยลง และเคลื่อนผ่านกันได้ง่ายขึ้น และนอกจากนี้พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้มากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกปริมาณน้ำมันหอมระเหยอบเชย 5 phr สำหรับนำไปศึกษาต่อในการทดลองตอนที่ 4 ต่อไป ซึ่งปริมาณดังกล่าวยังคงทำให้สมบัติของฟิล์มผ่านข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม “ถุงพลาสติกสำหรับบรรจุอาหาร” มาตรฐานอุตสาหกรรมเลขที่ 1027-2553 ซึ่งระบุไว้ว่าต้องมีค่าความทนทานต่อแรงดึง ณ จุดขาดที่มากกว่าหรือเท่ากับ 11.8 MPa และค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาดที่มากกว่าหรือเท่ากับ 150%

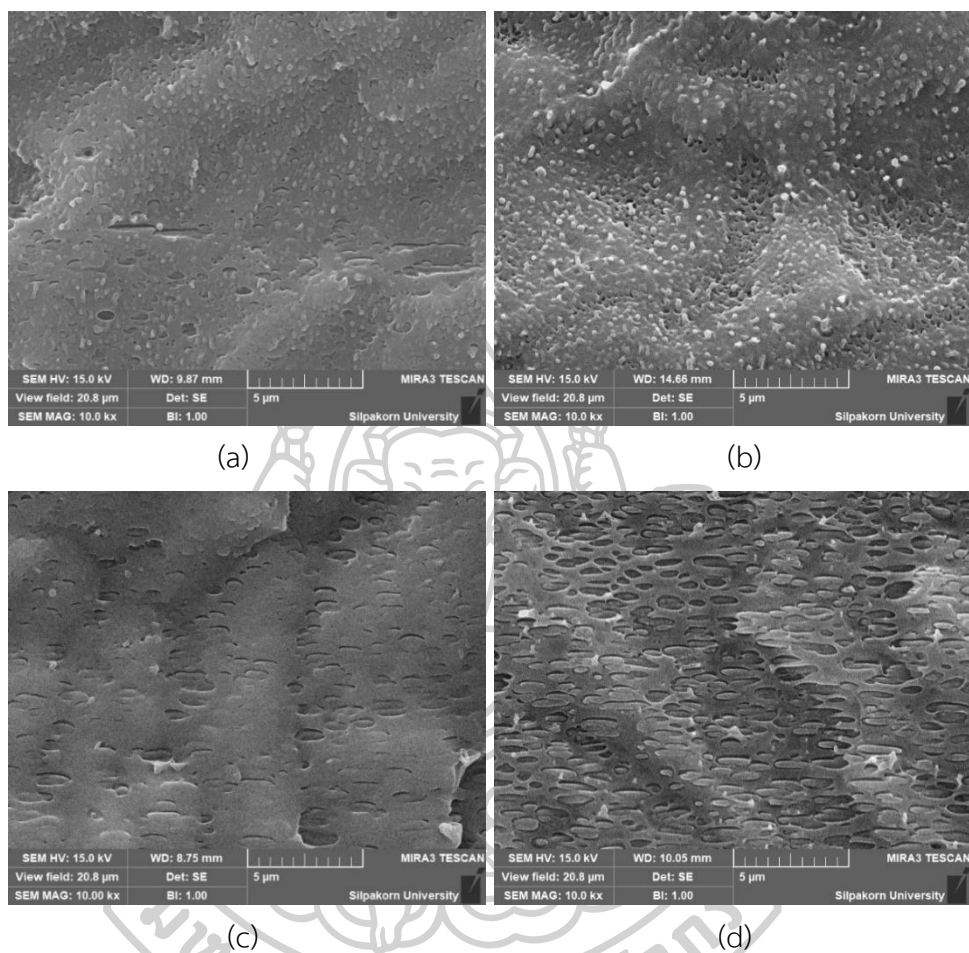
ตอนที่ 4 ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ร่วมกับน้ำมันหอมระเหยอบเชย

จากผลการทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม Dicumyl peroxide (DCP) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ได้ทำการเลือกปริมาณการเติม DCP 0.03 phr สำหรับการศึกษาในตอนี่ 4 เป็นการศึกษาผลของการเติม TiO_2 1 phr ร่วมกับน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณ 5 phr ที่ทำการทดลองจากตอนที่ 2 และ 3 ตามลำดับ จากนั้นทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน เสถียรภาพทางความร้อน สมบัติเชิงกล ความสามารถในการทนทานต่อสภาพแวดล้อมโดยการเร่งสภาวะ อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ สมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ และความสามารถในการดูดซับแก๊สเอทิลีน

1. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)

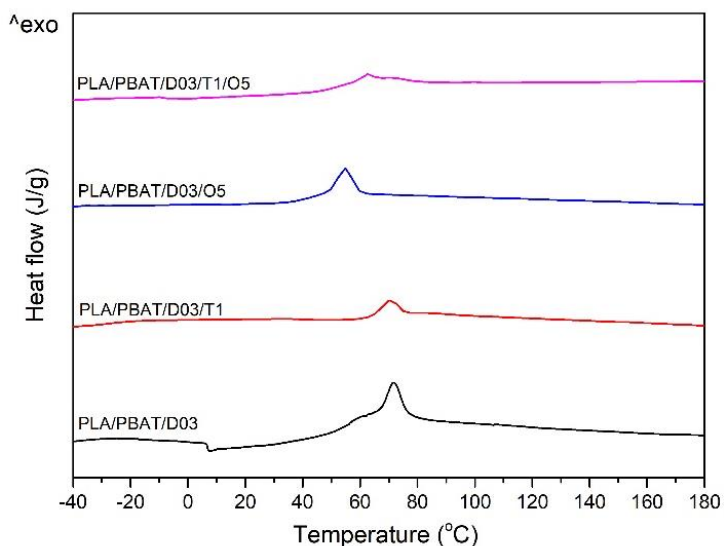
ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มคอมพอสิตส์ต่างๆ ได้ทำการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy, SEM) โดยชิ้นงานฟิล์มถูกนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลว และทำให้แตกหักอย่างรวดเร็ว โดยแสดงดังรูปที่ 4-37 เมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 พบว่ามีร่องรอยการแยกออกเป็น 2 ภูมิภาคระหว่าง PLA และ PBAT อย่างชัดเจน บ่งบอกว่า PLA และ PBAT ยังมีความเข้ากันไม่ได้ (รูปที่ 4-37 (a)) และเมื่อพิจารณาฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณ 1 phr (PLA/PBAT/D03/T1) (รูปที่ 4-37 (b)) พบลักษณะเม็ดขนาดเล็กฝังอยู่ภายในภูมิภาคต่อเนื่องของ PLA โดยคาดว่าเป็นภูมิภาคกระจายของ PBAT เนื่องจากมีลักษณะการยึดออกเมื่อฟิล์มเกิดการแตกหัก แต่อย่างไรก็ตามไม่พบลักษณะกลมของ TiO_2 กระจายตัวอยู่ในฟิล์มคอมพอสิต เนื่องจากมีข้อจำกัดในการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค SEM กล่าวคือกำลังขยายที่มากเกินไปจะทำให้พอลิเมอร์หลอมและเสียหายได้ และสำหรับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่เติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย 5 phr (PLA/PBAT/D03/O5) (รูปที่ 4-37 (c)) พบว่ามีร่องรอยของการมีอยู่ของน้ำมันภายในฟิล์ม โดยมีลักษณะเป็นช่องว่างแทรกอยู่บริเวณเนื้อฟิล์ม เนื่องจากพอลิเมอร์และน้ำมันหอมระเหยอบเชยไม่สามารถผสมเข้ากันได้ และเมื่อพิจารณาฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ร่วมกับน้ำมันหอมระเหยอบเชย (PLA/PBAT/D03/T1/O5) (รูปที่ 4-37 (d)) พบว่ามีร่องรอยการมีอยู่ของหยดน้ำมันภายในฟิล์ม โดยมีลักษณะเป็นช่องว่างแทรกอยู่ภายในฟิล์ม และไม่พบลักษณะกลมของ TiO_2

กระจายตัวอยู่ในฟิล์มพอลิเมอร์คอมพอสิต เนื่องจากมีข้อจำกัดในการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค SEM

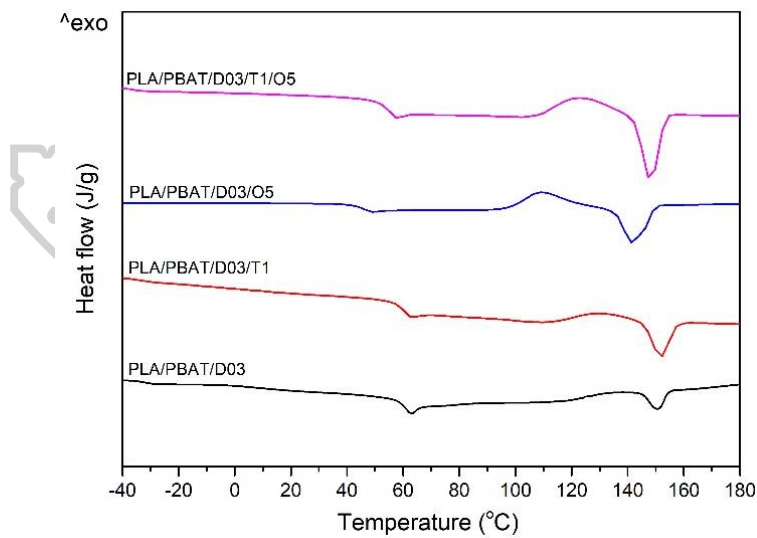


รูปที่ 4-37 ภาพถ่ายภาคตัดขวาง (cross section) ที่ได้จากเทคนิค SEM ของฟิล์มคอมพอสิต (a) PLA/PBAT/D03 (b) PLA/PBAT/D03/T1 (c) PLA/PBAT/D03/O5 และ (d) PLA/PBAT/D03/T1/O5 ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

2. การศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)



รูปที่ 4-38 DSC Thermograms ในขั้นตอนการทำให้เย็นตัว ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติม TiO_2 1 phr และน้ำมันหอมระเหยอบเชย 5 phr



รูปที่ 4-39 DSC Thermograms ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติม TiO_2 1 phr และน้ำมันหอมระเหยอบเชย 5 phr

ตารางที่ 4-24 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT สูตรต่างๆ จากเทคนิค DSC

Sample	T _c (°C)		ΔH _c (J/g)		T _g (°C)		T _{cc} (°C)		ΔH _{cc} (J/g)		T _m (°C)		X _c (%)		Normalized X _c (%)
	PBAT		PLA		PBAT		PLA		PLA		PBAT		Toatal		
	PBAT	PLA	PBAT	PLA	PBAT	PLA	PBAT	PLA	PBAT	PLA	PBAT	PLA	PBAT	PLA	
PLA/PBAT/D03	71.75	59.24	4.56	59.24	-31.59	134.92	0.22	150.73	110.00	2.76	4.56	7.32	2.43		
PLA/PBAT/D03/T1	66.98	59.44	2.39	59.44	-35.37	129.70	2.57	151.93	108.53	9.65	4.77	14.42	5.70		
PLA/PBAT/D03/O5	55.03	45.16	4.63	45.16	-41.19	109.37	12.97	141.61	-	24.42	-	24.42	4.50		
PLA/PBAT/D03/T1/O5	62.28	52.49	1.00	52.49	-35.86	123.07	8.84	148.09	-	16.50	-	16.50	2.92		
	71.61		0.27												

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อน ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4-38, 4-39 และตารางที่ 4-24 เมื่อพิจารณาค่า Glass transition temperature (T_g) ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ร่วมกับน้ำมันหอมระเหยอบเชย (PLA/PBAT/D03/T1/O5) พบว่าปรากฏพีคของ Glass transition temperature (T_g) 2 ตำแหน่ง ซึ่งเป็นพีคเอกลักษณ์ของ PLA และ PBAT โดย T_g มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA/PBAT/D03 และ PLA/PBAT/D03/T1 เนื่องจากน้ำมันหอมระเหยอบเชยทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น [73] แต่อย่างไรก็ตามค่า T_g มีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA/PBAT/D03/O5 เนื่องจากผลของการมี TiO_2 อาจขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์บางส่วน จึงส่งผลให้ T_g มีค่าอยู่ระหว่าง PLA/PBAT/D03/T1 และ PLA/PBAT/D03/O5

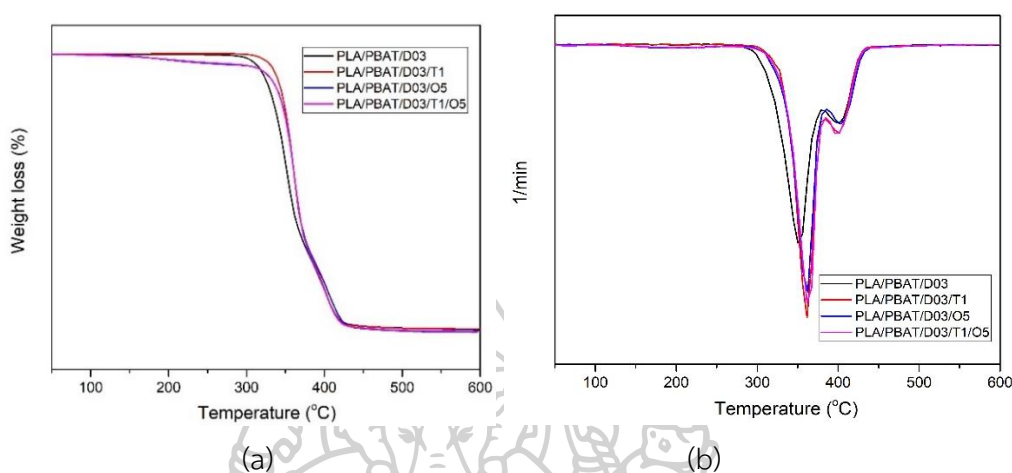
เมื่อพิจารณาค่า Crystallization temperature (T_c) ของ PLA/PBAT/D03/T1/O5 พบว่าปรากฏพีค T_c 2 ตำแหน่ง ซึ่งเป็นตำแหน่งการตกผลึกของ PBAT (Pure PLA มี T_c เท่ากับ 102.20 องศาเซลเซียส [50]) อาจเนื่องมาจากมีสายโซ่ PBAT บางส่วนที่ตกผลึกได้ช้ากว่า และนอกจากนี้ไม่ปรากฏพีค T_c ของ PLA เนื่องจาก PLA มีอัตราการตกผลึกช้า และอัตราการเย็นตัวที่ใช้ในการทดสอบ (10 องศาเซลเซียส/นาท) เร็วจนกระทั่ง PLA ไม่สามารถตกผลึกได้ทัน โดยตำแหน่ง T_c ดังกล่าวมีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA/PBAT/D03/O5 บ่งบอกว่า PBAT สามารถตกผลึกได้ง่ายขึ้นเนื่องจาก TiO_2 ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ จึงทำให้พอลิเมอร์ตกผลึกได้ง่ายได้

และเมื่อพิจารณาค่า Melting temperature (T_m) ของ PLA/PBAT/D03/T1/O5 พบว่าปรากฏ T_m เพียง 1 ตำแหน่ง ซึ่งเป็นตำแหน่งของ PLA เท่านั้น เนื่องจากมีการเกิด Cold crystallization temperature (T_{cc}) ซึ่งเป็นการตกผลึกอีกครั้งของ PLA โดยมีความเด่นชัดมากกว่าการหลอมผลึกของ PBAT จึงบดบังพีค T_m ของ PBAT นอกจากนี้พบว่า T_{cc} มีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA/PBAT/D03/O5 บ่งบอกว่าการมี TiO_2 ร่วมกับน้ำมันหอมระเหยอบเชย ส่งผลให้การเริ่มเกิดผลึกอีกครั้งในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ PLA เกิดได้ยากขึ้น อาจเพราะน้ำมันเข้าไปเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์แต่ TiO_2 ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่บางส่วน จึงส่งผลให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เกิดเป็นผลึกได้ยากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ PLA/PBAT/D03/T1 ที่ไม่มีการเกิดพีค T_{cc}

และเมื่อพิจารณาปริมาณผลึกที่เกิดจากกระบวนการทั้งหมด ($\%X_c$) และการตัดปริมาณผลึกที่เกิดจากการตกผลึกในขั้นตอนการเย็นตัวทิ้งไป ($\%X_c$ normalized) ของ PLA/PBAT/D03/T1/O5 พบว่ามีค่าน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับ PLA/PBAT/D03/O5 ซึ่งสอดคล้องกับการตกผลึกอีกครั้งในขั้น

การให้ความร้อนในครั้งที่ 2 ที่พบว่า PLA เกิดผลึกได้ยากขึ้น นอกจากนี้ น้ำมันหอมระเหยอบเซยอาจมีอิทธิพลมากกว่าการเป็น Nucleating agent ของ TiO_2

3. การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA



รูปที่ 4-40 TGA thermograms ของฟิล์มคอมพอลิเอสเตอร์ต่าง ๆ (a) TGA และ (b) DTG

ตารางที่ 4-25 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มคอมพอลิเอสเตอร์ PLA/PBAT สูตรต่างๆ จากเทคนิค TGA

Sample	T_d (°C)		
	CEO	PLA	PBAT
PLA/PBAT/D03	-	351.83	402.33
PLA/PBAT/D03/T1	-	361.17	402.83
PLA/PBAT/D03/O5	175.67	362.89	403.10
PLA/PBAT/D03/T1O5	198.17	363.50	403.50

จากผลการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 4-40 และตารางที่ 4-25 พบว่าการเติม TiO_2 ปริมาณ 1 phr ร่วมกับน้ำมันหอมระเหยอบเซย 5 phr ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ปรากฏอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (Degradation temperature; T_d) ชัดเจน 3 ตำแหน่ง ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิการสลายตัวของน้ำมันหอมระเหยอบเซย [77], PLA (350 องศาเซลเซียส [76]) และ PBAT (397 องศาเซลเซียส [76]) โดยพบว่าฟิล์มคอมพอลิเอสเตอร์ PLA/PBAT/D03/T1O5 มีค่า T_d ของน้ำมันหอมระเหยอบเซยสูงกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03/O5 อาจเนื่องมาจากฟิล์มคอมพอลิเอสเตอร์ PLA/PBAT/D03/T1O5 มี TiO_2 ทำหน้าที่เป็น Barrier ป้องกันความร้อน [71] จึงอาจทำให้น้ำมัน

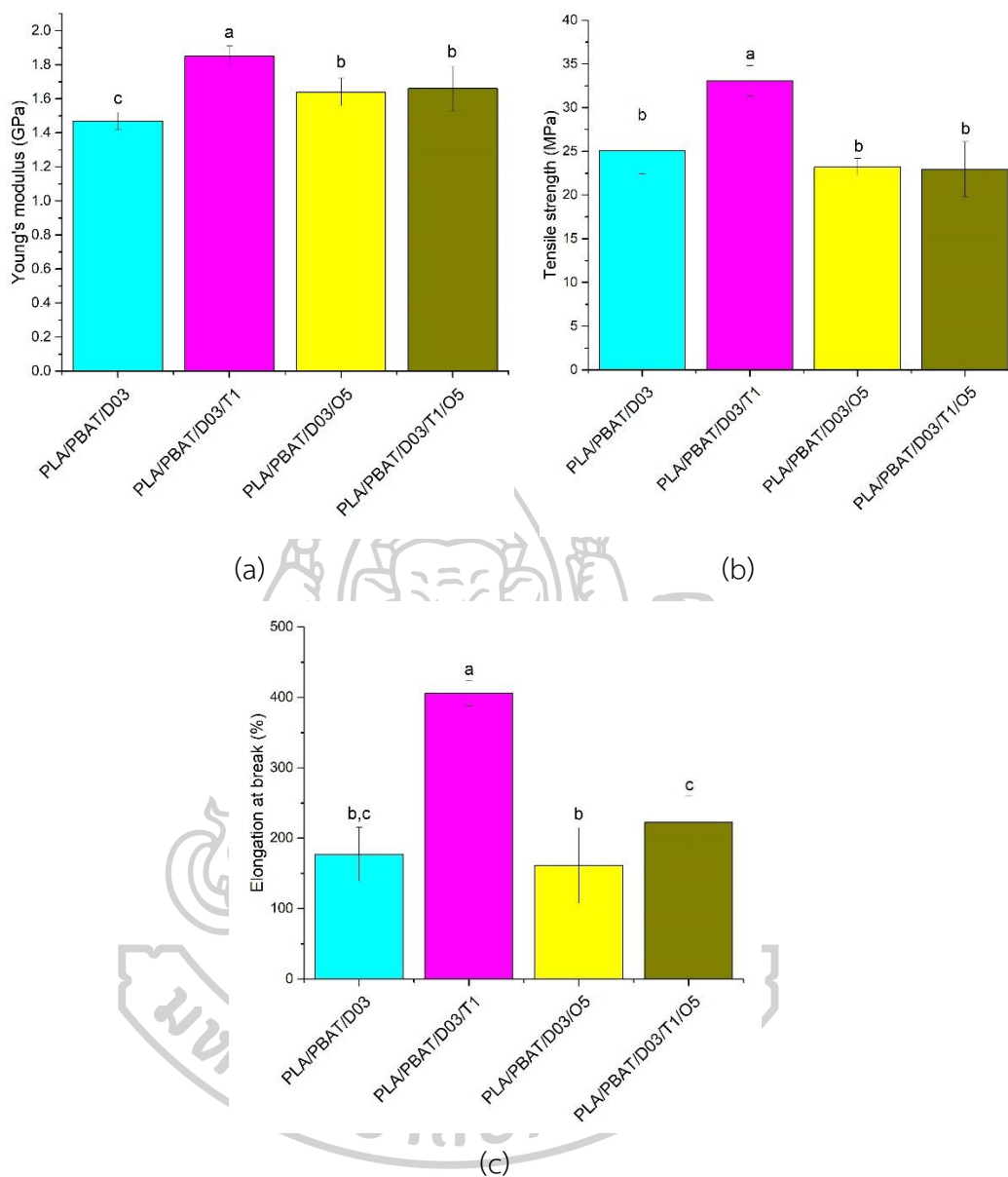
หอมระเหยอบเชยระเหยช้าลงเมื่อได้รับความร้อน และพบว่าค่า T_d ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 1 phr (PLA/PBAT/D03/T1), ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย 5 phr (PLA/PBAT/D03/O5) และฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณ 1 phr ร่วมกับน้ำมันหอมระเหยอบเชย 5 phr (PLA/PBAT/D03/T1/O5) ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 พบว่า T_d ของ PLA มีค่ามากขึ้น และจากรูปที่ 4-40 (a) ยังพบว่า T_{onset} ของ PLA/PBAT/D03/T1, PLA/PBAT/D03/O5 และ PLA/PBAT/D03/T1/O5 มีค่าสูงกว่า PLA/PBAT/D03 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohammed Zorah และคณะ [71] ที่ทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของ PLA โดยการเติม TiO_2 ซึ่งพบว่าเมื่อเติม TiO_2 ปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ T_{onset} และ $T_{50\%}$ ของ PLA มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากในช่วงแรก TiO_2 อาจทำหน้าที่เป็น Barrier ในการป้องกันความร้อน และทำให้สายโซ่ PLA ที่ติดอยู่กับ TiO_2 เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น

4. การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม

จากผลการศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบการดึงยืด ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4-41 และตารางที่ 4-26 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 มีค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break เท่ากับ 1.47 GPa, 25.10 MPa และ 177.16% ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 1 phr (PLA/PBAT/D03/T1/O5) พบว่าค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break มีค่าเท่ากับ 1.85 GPa, 33.05 MPa และ 405.57% ตามลำดับ และสำหรับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย 5 phr (PLA/PBAT/D03/O5) มีค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break เท่ากับ 1.64 GPa, 23.24 MPa และ 161.36 % ตามลำดับ

ตารางที่ 4-26 สมบัติการดึงยืดของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT สูตรต่างๆ

Sample	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PLA/PBAT/D03	1.47 ± 0.05 ^c	25.10 ± 2.65 ^b	177.16 ± 38.21 ^{b,c}
PLA/PBAT/D03/T1	1.85 ± 0.06 ^a	33.05 ± 1.75 ^a	405.57 ± 17.89 ^a
PLA/PBAT/D03/O5	1.64 ± 0.08 ^b	23.24 ± 0.95 ^b	161.36 ± 53.60 ^c
PLA/PBAT/D03/T1/O5	1.66 ± 0.13 ^b	22.97 ± 3.13 ^b	222.21 ± 37.39 ^b



รูปที่ 4-41 สมบัติเชิงกล (a) Young's modulus, (b) Tensile strength และ (c) Elongation at break ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT สูตรต่างๆ

เมื่อพิจารณาผลของการเติม TiO₂ ร่วมกับน้ำมันหอมระเหยอบเชยในฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT (PLA/PBAT/D03/T1/O5) พบว่าค่า Young's modulus และ Tensile strength มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO₂ 1 phr ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wei Li และคณะ [81] ที่ทำการศึกษาคผลของการเติม Nano Titanium Dioxide และ Clove oil (CO) ในฟิล์ม Chitosan-starch film พบว่าฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติม 3%wtTiO₂-

6%wtCO มีค่า Tensile strength ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่มีการเติม 3%wt TiO₂ เนื่องจากน้ำมันหอมระเหยทำให้ Interaction ระหว่าง Polymer-Polymer อ่อนแอลง โดยมี Interaction ระหว่าง Polymer-Oil เข้ามาแทนที่ จึงเป็นการลด Cohesion force ของพอลิเมอร์

และเมื่อพิจารณาค่า Elongation at break ของ PLA/PBAT/D03/T1/O5 พบว่ามีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่เติมน้ำมันหอมระเหยอบเซยเพียงอย่างเดียว (PLA/PBAT/D03/O5) แต่อย่างไรก็ตาม Elongation at break มีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่เติม TiO₂ เพียงอย่างเดียว (PLA/PBAT/D03/T1) เนื่องจากการแข่งขันกันระหว่างการเป็น Plasticizer ของน้ำมันหอมระเหยอบเซย และการเป็นสารเสริมแรงของ TiO₂ กล่าวคือพฤติกรรมการเป็น Plasticizer ของน้ำมันหอมระเหย ส่งผลให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามการเติมสารเสริมแรงจะส่งผลให้วัสดุมีความ Rigid มากขึ้น โดยอาจไปขัดขวางการเคลื่อนที่ผ่านกันของสายโซ่ทำให้ฟิล์มขาดได้ง่ายขึ้น

โดยฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO₂ ร่วมกับน้ำมันหอมระเหยอบเซย (PLA/PBAT/D03/T1/O5) ผ่านข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม “ถุงพลาสติกสำหรับบรรจุอาหาร” มาตรฐานอุตสาหกรรมเลขที่ 1027-2553 ซึ่งระบุไว้ว่าต้องมีค่า Tensile strength ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 11.8 MPa และ Elongation at break ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 150%

5. การศึกษาอัตราการซึมของผ่านแก๊สออกซิเจน (Oxygen permeability; OP) และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate; WVTR)

ตารางที่ 4-27 อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Oxygen permeability; OP) ของฟิล์มคอมพอสิตสูตรต่างๆ

Sample	OP (cm ³ /(m ² .day))	WVTR (g/m ² .day)
PLA/PBAT/D03	286.16	81.84 ± 11.84
PLA/PBAT/D03/T1	386.67	83.26 ± 11.78
PLA/PBAT/D03/O5	163.54	53.78 ± 5.84
PLA/PBAT/D03/T1/O5	291.43	73.21 ± 12.97

การศึกษาอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (OP) ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03, PLA/PBAT/D03/T1, PLA/PBAT/D03/O5 และ PLA/PBAT/D03/T1/O5 แสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 4-27

เมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 พบว่ามีค่า OP และ WVTR เท่ากับ $286.16 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ และ $81.84 \text{ g}/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ ซึ่งจากงานวิจัยของ Shen Su และคณะ [82] พบว่า PLA และ PBAT มีค่า Solubility parameter เท่ากับ 19.9 และ $21.9 \text{ MPa}^{1/2}$ ตามลำดับ ซึ่ง PLA และ PBAT มีค่า Solubility parameter ที่ใกล้เคียงกัน และจากงานวิจัยของ Arianna Pietrosanto และคณะ [83] ได้ทำการศึกษาฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT สำหรับ Frozen food packaging พบว่า PLA และ PBAT มีค่า Oxygen permeability coefficient (PO_2) เท่ากับ 33.4 และ $84.0 \text{ cm}^3 \cdot \text{mm}/\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{bar}$ ตามลำดับ และมีค่า Water vapor permeability coefficient (PH_2O) เท่ากับ 1.3 และ $3.1 \text{ g} \cdot \text{mm}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ ตามลำดับ โดยเมื่อปริมาณสัดส่วนของ PBAT มากขึ้น พบว่าค่า PO_2 และ PH_2O มีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจาก PLA ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ยังคงเป็น Glassy state และมี Free volume ระหว่าง Polymer chain น้อยกว่า PBAT ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ดังนั้นที่ปริมาณ PBAT สูงขึ้นจึงทำให้สายโซ่เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นและมี Free volume มากขึ้น จึงทำให้ Permeability ของพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น

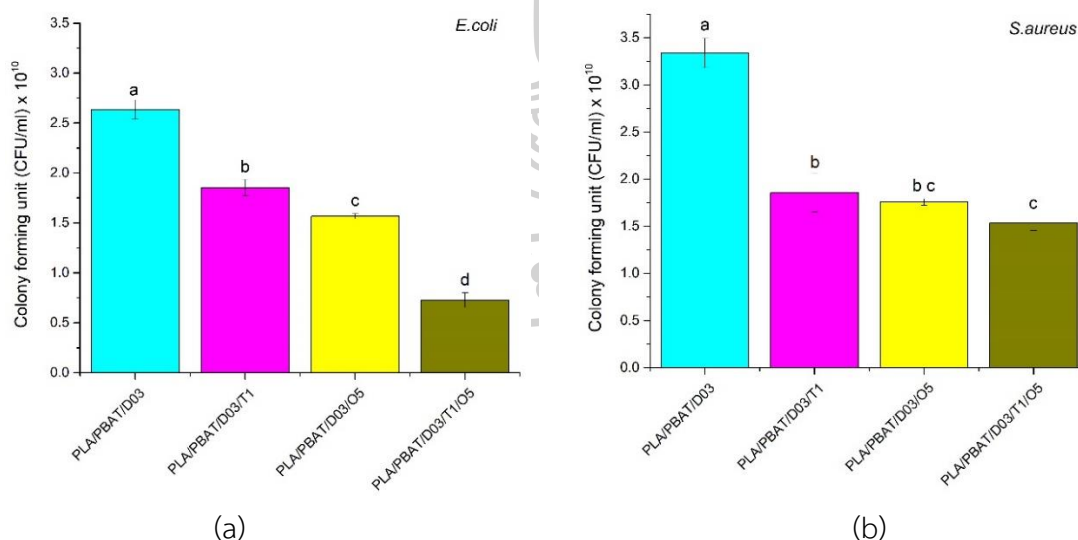
เมื่อพิจารณาผลของการเติม TiO_2 ลงในฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT (PLA/PBAT/D03/T1) พบว่ามีค่า OP และ WVTR มากกว่า PLA/PBAT/D03 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhenya Tang และคณะ [84] ที่มีการศึกษาสมบัติของ PLA/Nano- TiO_2 พบว่าเมื่อเติม TiO_2 20%wt ส่งผลให้ปริมาณผลึกมีค่าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม WVP และ OTR มีค่ามากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ PLA อาจเนื่องมาจากปริมาณ TiO_2 ที่มากขึ้นส่งผลให้พื้นผิวของฟิล์มขรุขระกว่าฟิล์ม PLA จึงเป็นการเอื้อให้แก๊สซึมผ่านเข้าออกฟิล์มได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้อาจเนื่องจาก TiO_2 เป็นสารที่มีขั้วสูง ดังนั้นจึงทำให้เกิด Interaction ระหว่าง TiO_2 กับแก๊สออกซิเจนน้อย ส่งผลให้แก๊สออกซิเจนแพร่ผ่านไปได้อย่างใช้เวลาเร็ว

และเมื่อพิจารณาผลของการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยลงในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT (PLA/PBAT/D03/O5) พบว่าค่า WVTR และ OP มีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 อาจเนื่องมาจากน้ำมันหอมระเหยอบเชยเป็นสารที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นเมื่อแก๊สออกซิเจนแพร่ผ่านจึงมีการเกิด Interaction ระหว่างน้ำมันหอมระเหยอบเชยกับแก๊สออกซิเจนได้มาก ส่งผลให้แก๊สออกซิเจนแพร่ออกมาได้ยาก อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนจึงมีค่าน้อย และ

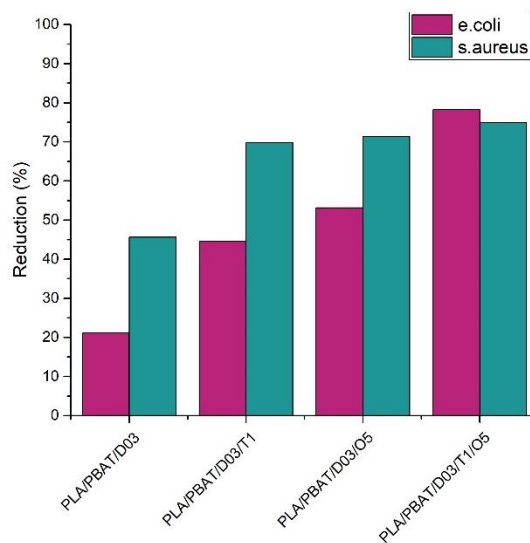
ในกรณีของค่า WVTR มีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 เนื่องจากน้ำมันหอมระเหยอบเชยเป็นสารที่ไม่มีขั้ว ซึ่งทำให้ Interaction ระหว่างโมเลกุลน้ำและน้ำมันน้อย การที่โมเลกุลของน้ำจะมาละลายบนเนื้อฟิล์มย่อมน้อยตามไปด้วย ดังนั้นจึงเป็นผลให้โมเลกุลน้ำแพร่ ออกมาได้ยากและใช้ระยะเวลานาน

และเมื่อพิจารณาผลของการเติม TiO_2 1 phr ร่วมกับน้ำมันหอมระเหยอบเชย 5 phr ลงในฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT (PLA/PBAT/D03/T1/O5) พบว่าค่า WVTR และ OP มีค่าอยู่ระหว่าง PLA/PBAT/D03/O5 และ PLA/PBAT/D03/T1 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mahmood Alizadeh-Sani และคณะ [85] ที่ทำการศึกษาผลของการเติม Cellulose nanofibers (CNFs), TiO_2 และ Rosemary essential oil (REO) ลงใน Whey protein isolate (WPI) พบว่าเมื่อเติม TiO_2 0.5% และ REO 2% ลงใน WPI-7.5%CNF ส่งผลให้ค่า WVTR มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ WPI-CNf/ TiO_2 film เนื่องจากผลของการเป็น Hydrophobic ของ REO ซึ่งส่งผลให้ออกซิเจนเคลื่อนที่ผ่านไปได้อย่างขึ้น

6. การศึกษาสมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และความสามารถในการดูดซับแก๊สเอทิลีน



รูปที่ 4-42 จำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียที่นับได้ต่อมิลลิลิตร (CFU/ml) ของฟิล์มคอมพอสิตสูตรต่างๆ โดยทำการทดสอบกับเชื้อแบคทีเรีย (a) *E. coli* (b) *S. aureus*



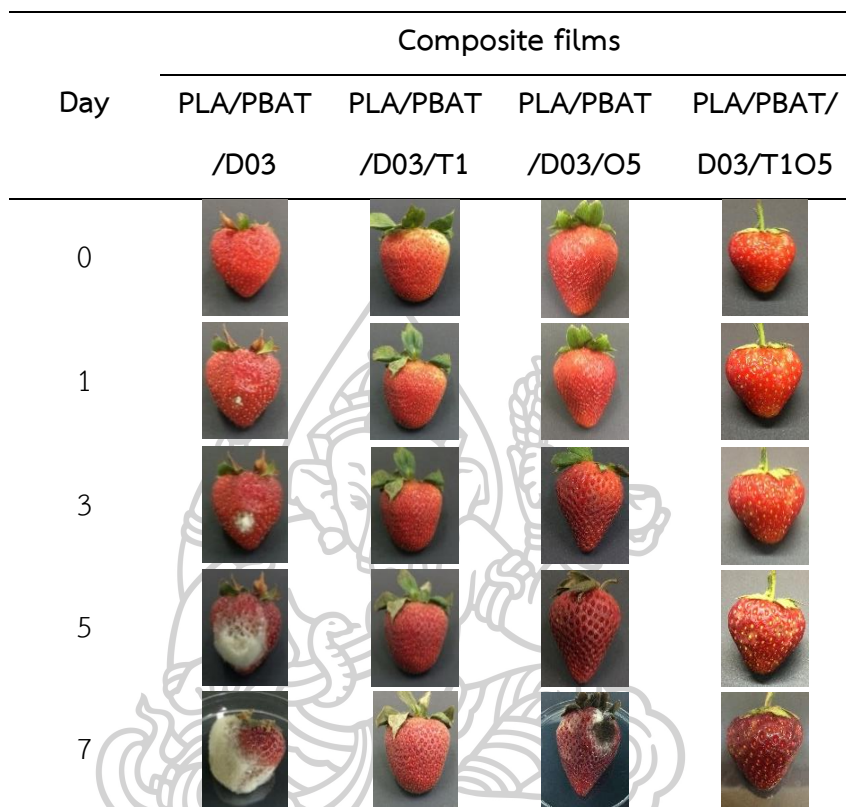
รูปที่ 4-43 เปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ของฟิล์มคอมพอสิตสูตรต่างๆ

จากการศึกษาสมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ร่วมกับน้ำมันหอมระเหยอบเชย โดยใช้ *Escherichia coli* (*E.coli*) เป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมลบ และ *Staphylococcus aureus* (*S.aureus*) เป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมบวก โดยมีการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มมีความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 (PLA/PBAT/D03/T1) หรือน้ำมันหอมระเหยอบเชยเพียงอย่างเดียว (PLA/PBAT/D03/O5) โดยมีปริมาณโคโลนีของ *E.coli* และ *S.aureus* ที่นับได้ต่อมิลลิลิตร เท่ากับ 7.28×10^9 และ 1.54×10^{10} CFU/ml ตามลำดับ เนื่องจากผลของการเป็นสารที่ออกฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยพบว่าสามารถลดเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* และ *S.aureus* ได้ 72.39 และ 53.97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Esfahani Arezoo และคณะ [86] ที่พบว่าการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยร่วมกับ TiO_2 ลงใน Sago starch film ส่งผลให้ Inhibition zone กว้างขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ Sago starch film ซึ่งเป็นตัวอย่างควบคุม และฟิล์มที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยเพียงอย่างเดียว

และจากการศึกษาสมบัติการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและความสามารถในการดูดซับแก๊สเอทิลีนของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ร่วมกับน้ำมันหอมระเหยอบเชย (PLA/PBAT/D03/T1/O5) โดยใช้ผลสตอร์วเบอร์รี่และกล้วยเป็นตัวแทนในการศึกษาดังกล่าว โดยสตอร์วเบอร์รี่เป็นตัวแทนของผลไม้ประเภท Non-Climacteric ซึ่งมีการสร้างแก๊สเอทิลีนในเนื้อเยื่อในปริมาณและอัตราที่ต่ำ จึงจำเป็นต้องเก็บเกี่ยวผลเมื่อสุกแล้วเท่านั้น และเมื่อสุกแล้วจะไม่มีการหายใจ

หรือสร้างเอทิลีนเพิ่มอีก และสำหรับกล้วยเป็นผลไม้ประเภท Climacteric ซึ่งระหว่างการสุกจะมีการสร้างแก๊สเอทิลีนภายในเนื้อเยื่อ โดยผลไม้ประเภทนี้สามารถถูกเก็บเกี่ยวได้ตั้งแต่ผลยังไม่สุก ดังนั้นเมื่อเก็บเกี่ยวแล้วจึงมีพฤติกรรมที่ทำให้ผลสุกได้ต่อไป [9] ดังนั้นจากการทดลองนี้จึงใช้สตรอว์เบอร์รี่เป็นตัวแทนในการศึกษาความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา และใช้ผลกล้วยเป็นตัวแทนในการศึกษาความสามารถในการดูดซับแก๊สเอทิลีน และจากการสังเกตลักษณะปรากฏของผลสตรอว์เบอร์รี่ที่เปลี่ยนแปลงไปดังตารางที่ 4-28 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/1T5C มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเติบโตของเชื้อราได้มากขึ้น และชะลอการสุกของกล้วยได้มากขึ้น ดังตารางที่ 4-29 เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรอื่นๆ โดยสังเกตได้จากเชื้อราบนผลสตรอว์เบอร์รี่และสีของผลกล้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย เนื่องจากการแข่งขันกันระหว่าง TiO_2 และน้ำมันหอมระเหยอบเชย กล่าวคือส่วนประกอบของน้ำมันหอมระเหยมีส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ทำให้น้ำมันหอมระเหยแทรกตัวผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ซึ่งมีโปรตีนและไขมันเป็นองค์ประกอบได้ โดยน้ำมันหอมระเหยจะไปคั่นในส่วนของไขมันและไมโทคอนเดรีย (mitochondria) ทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์เกิดความไม่คงตัว เกิดการยับยั้งกระบวนการเมตาบอลิซึมที่เยื่อหุ้มเซลล์ ทำลายโปรตีนที่เป็นส่วนประกอบหลักของเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้การเคลื่อนที่ของโปรตอนในเซลล์ลดลง จึงทำให้ส่วนประกอบของไซโทพลาสซึมและสารเมตาบอลิไตต์ไอออนรั่วไหลออกนอกเซลล์ จึงเป็นสาเหตุทำให้เซลล์ตายในที่สุด [24] และสำหรับ TiO_2 สามารถเกิดกระบวนการ Photocatalytic degradation ได้ดังแสดงในรูปที่ 4-23 โดยเมื่อ TiO_2 ได้รับพลังงานจากการฉายรังสียูวีเอ e^- จากชั้น Valence band จะถูกกระตุ้นข้ามไปยัง Conduction band และทำให้ชั้น Valence band เกิด Hole (h^+) เหลืออยู่หลังจากที่ e^- ถูกกระตุ้นไปแล้ว โดย h^+ ดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ H_2O หรือ Hydroxide ion (OH^-) ได้ ทำให้เกิด Hydroxyl radical ($OH\cdot$) ส่วน e^- ที่ถูกกระตุ้นไปยัง Conduction band จะสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับ O_2 ได้ ทำให้เกิด Superoxide ion (O_2^-) โดย $OH\cdot$ และ O_2^- คือ Reactive oxygen species (ROS) โดย ROS ดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับ Ethylene เกิดเป็น CO_2 และ H_2O ได้ และจากค่า Band gap energy จากการทดสอบด้วยเทคนิค UV-Vis พบว่าเมื่อปริมาณ TiO_2 มากขึ้น ส่งผลให้ Band gap energy มีค่าน้อยลง e^- จึงสามารถข้ามไปยัง Conduction band ได้ง่ายขึ้น จึงมีโอกาสเกิด ROS และเกิดปฏิกิริยากับเอทิลีนได้มากขึ้น

ตารางที่ 4-28 การเกิดเชื้อราบนผลสตรอว์เบอร์รี่ที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส

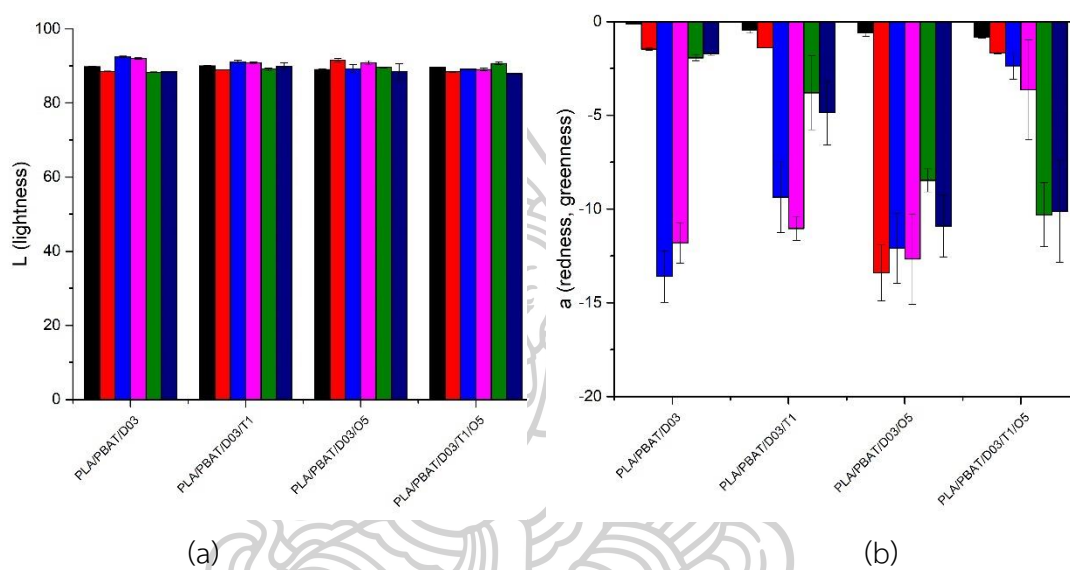


ตารางที่ 4-29 ลักษณะปรากฏของกล้วยที่ถูกเก็บรักษาไว้ในฟิล์มคอมพอสิตที่ถูกปิดผนึก และได้รับการฉายรังสียูวีเอเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยทำการทดลองในห้องปรับอากาศที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส

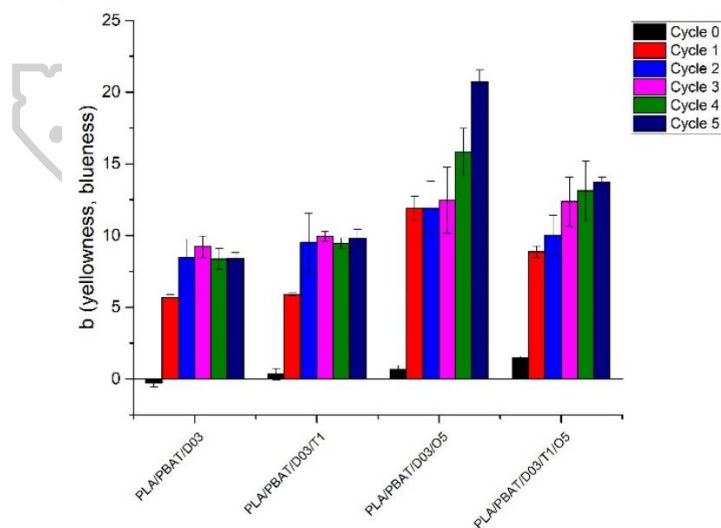
day	1	3	5	7	9	11	13	15
PLA/PBAT/ D03								
PLA/PBAT/ D03/T1								
PLA/PBAT/ D03/T1/O5								

7. การศึกษาความสามารถในการทนทานต่อสภาพแวดล้อมโดยการเร่งสภาวะและค่าจาก การวัดสีด้วยระบบ CIELAB

ศึกษาความสามารถในการทนทานต่อสภาพแวดล้อมโดยการเร่งสภาวะของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03/T1/O5 ด้วยมาตรฐาน ASTM G-154 โดยทำการศึกษาค่าสีจากการวัดด้วยระบบ CIELAB ลักษณะปรากฏ และลักษณะทางสัณฐานวิทยา







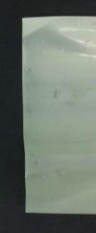



















(a) (b)

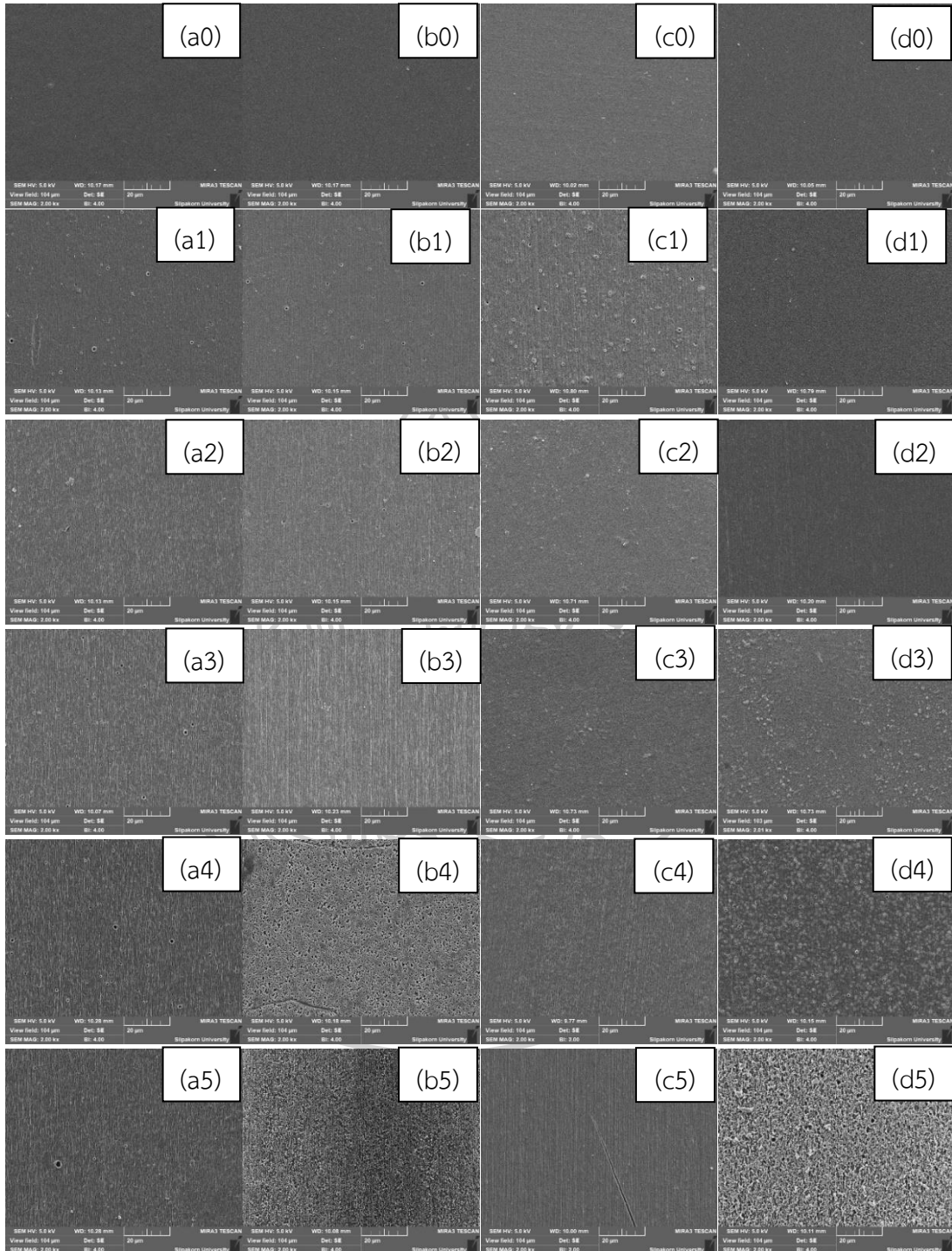


(c)

รูปที่ 4-44 ค่าสีจากการวัดด้วยระบบ CIELAB ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT สูตรต่างๆ (a) L (lightness), (b) a (redness, greenness) และ (c) b (yellowness, blueness)

ตารางที่ 4-30 फिल्मคอมพอสิต PLA/PBAT สูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการเร่งสภาวะที่ระยะเวลาต่าง ๆ

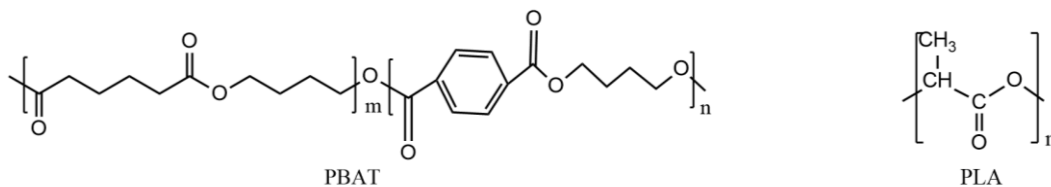
Sample	Cycle					
	0	1	2	3	4	5
PLA/PBAT/ D03						
PLA/PBAT/ D03/T1						
PLA/PBAT/ D03/O5						
PLA/PBAT/ D03/T1/O5						



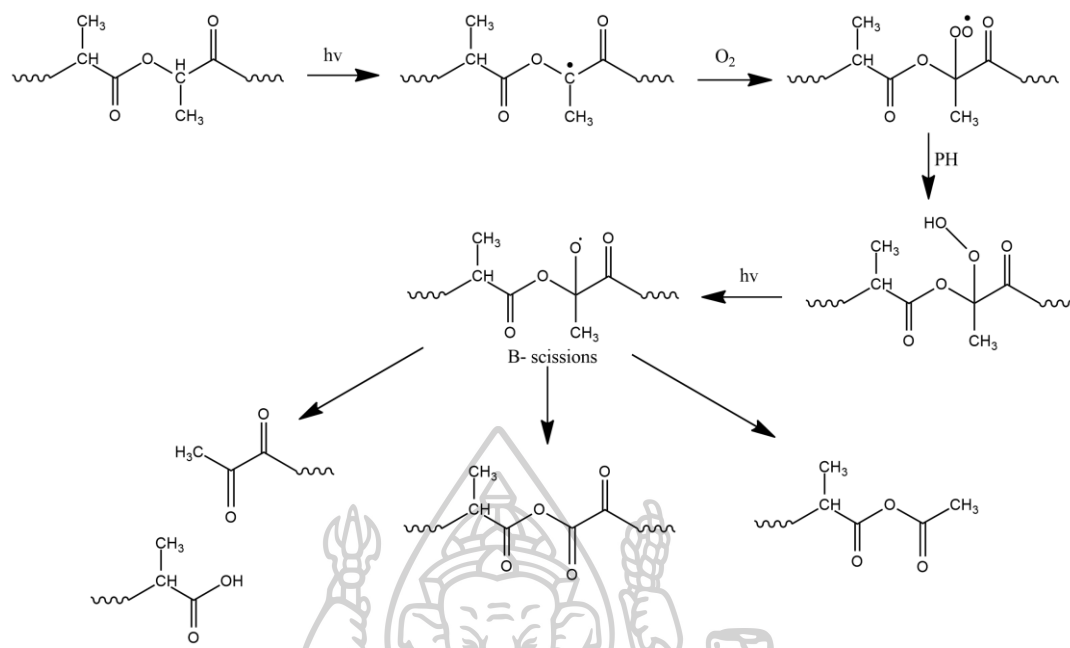
รูปที่ 4-45 ภาพถ่ายจากเทคนิค SEM ของ (a) PLA/PBAT/D03 (b) PLA/PBAT/D03/T1 (c) PLA/PBAT/D03/O5 และ (d) PLA/PBAT/D03/T1/O5 โดย 0 คือ cycle 0, 1 คือ cycle 1, 2 คือ cycle 2, 3 คือ cycle 3, 4 คือ cycle 4 และ 5 คือ cycle 5

จากผลการศึกษาศักยภาพในการทนทานต่อสภาพแวดล้อมโดยการเร่งสภาวะด้วยมาตรฐาน ASTM G-154 แสดงดังรูปที่ 4-45 โดยแสดงภาพถ่ายบริเวณพื้นผิวของฟิล์มด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) ซึ่งผ่านการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 4 ชั่วโมง อุณหภูมิ 60 ± 3 องศาเซลเซียส และมีการใช้น้ำควบแน่นเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 ± 3 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พื้นผิวฟิล์ม PLA/PBAT เกิดร่องลึกได้มากขึ้น เนื่องจากกระบวนการ Photodegradation และ Hydrolytic degradation ของพอลิเมอร์ [29] และจากรูปที่ 4-44(C) พบว่าเมื่อเวลานานขึ้นไม่ส่งผลให้ค่า L (Lightness) ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT เปลี่ยนแปลงแต่อย่างไรก็ตามค่า b (เหลือง-น้ำเงิน) มีค่ามากขึ้น บ่งบอกว่าฟิล์มคอมพอสิตมีสีเหลืองมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยสอดคล้องกับตารางที่ 4-30 ซึ่งแสดงภาพถ่ายของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการเร่งสภาวะ พบว่าเมื่อเวลาในการฉายรังสียูวีมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT สูตรต่าง ๆ มีสีเหลืองมากขึ้น และเสียหายในที่สุด

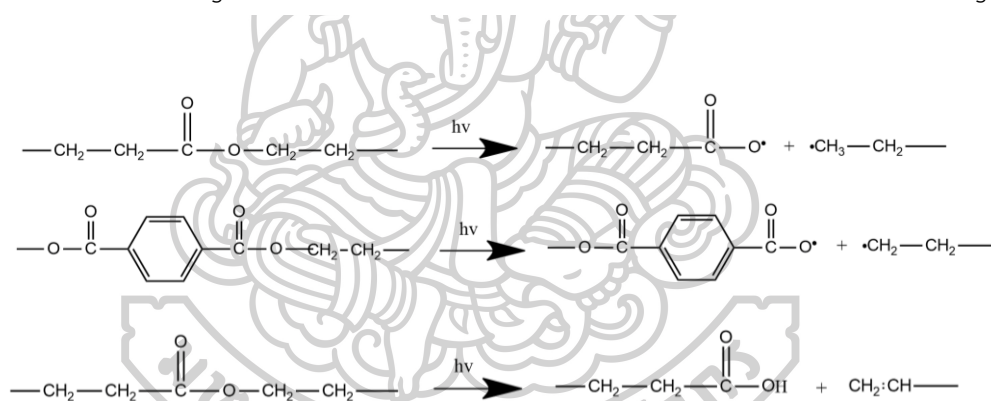
ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Roberto Scaffaro [87] ที่พบว่าเมื่อฉายรังสียูวีเป็นเวลา 6 12 24 48 และ 120 ชั่วโมง ส่งผลให้ฟิล์ม PBAT/PLA มีสีเหลืองมากขึ้น เนื่องจากมีการขาดออกของสายโซ่ PLA และ PBAT ซึ่งเดิมมีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 4-46 และมีการเกิดหมู่ Chromophore (Conjugated aromatic system) ขึ้น โดยกลไกการเกิด Photodegradation ของพอลิเมอร์ เริ่มจาก UV-irradiation หรือ Thermal decomposition และเกิดการดึงอะตอม H ที่ตำแหน่ง α -C ของหมู่เอสเทอร์ จึงทำให้เกิด Radical บนสายโซ่ของพอลิเมอร์ และ Radical ดังกล่าวจึงเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ส่งผลให้เกิด Peroxide radical ซึ่งจะปฏิกิริยาไปดึงเอาอะตอม H เกิดเป็น Hydroperoxide หลังจากนั้น Hydroperoxide จะผ่านปฏิกิริยา Photolysis ส่งผลให้เกิด Alkoxy และ Hydroxyl radicals ซึ่งส่งผลให้เกิด β -scission ได้ต่อไป ดังรูปที่ 4-47 และ 4-48



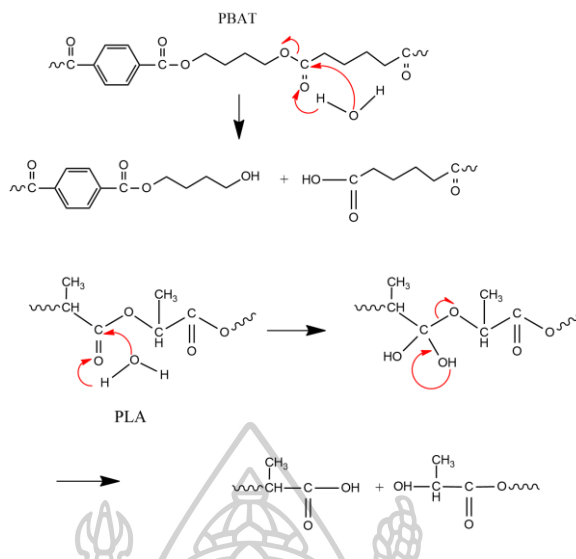
รูปที่ 4-46 โครงสร้างทางเคมีของ PBAT และ PLA



รูปที่ 4-47 Photodegradation mechanism ของ PLA ระหว่างกระบวนการ Weathering [87]



รูปที่ 4-48 Photodegradation mechanism ของ PBAT ระหว่างกระบวนการ Weathering [87]



รูปที่ 4-49 Hydrolysis reaction ของ PBAT และ PLA ระหว่างกระบวนการ Weathering [87]

สำหรับฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 พบว่าใน Cycle 2 และ 3 พื้นผิวฟิล์มเริ่มมีความเปลี่ยนแปลงโดยเกิดร่องลึกเป็นแนวยาว และใน Cycle ที่ 4 พื้นผิวฟิล์มมีลักษณะเป็นรูขนาดเล็กกระจายทั่วผิวฟิล์ม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Norio Nakayama [72] ที่ทำการศึกษาความสามารถในการสลายตัวด้วยแสง (photodegradability) ของฟิล์ม PLA/ TiO_2 ซึ่งพบว่าหลังจากการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 2 วัน ฟิล์ม PLA ที่มีการเติม TiO_2 มีความ Rigid และมีสีเหลืองมากขึ้น และเมื่อผ่านไป 4 วัน ฟิล์ม PLA/ TiO_2 10%wt พบช่องว่างขนาด 5-10 นาโนเมตร มีรอยแยกและแตกหักในที่สุด และจากงานวิจัยของ Yanbing Luo และคณะ [88] ได้ทำการศึกษาผลของการเติม TiO_2 ต่อการเปลี่ยนแปลงของ PLA ภายใต้ Compost condition พบว่าเมื่อเวลานานมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มเกิดร่องลึกขึ้น และปรากฏช่องว่าง (void) บนผิวฟิล์ม บ่งบอกว่าการขาดออกของสายโซ่และพื้นผิวเกิดการผุกร่อนตามเวลาที่มากขึ้น โดยกระบวนการผุกร่อนของฟิล์ม PLA/ TiO_2 เป็นผลมาจาก Hydrolytic degradation เช่นเดียวกับฟิล์ม PLA และเมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยพบว่าเมื่อเวลานานขึ้น พื้นผิวฟิล์มเกิดร่องลึกเป็นแนวยาว และจากค่า b (yellowness) พบว่าฟิล์มมีสีเหลืองมากขึ้นเมื่อเวลาในการฉายรังสียูวีมากขึ้น และสำหรับฟิล์มคอมพอสิตที่มีการเติม TiO_2 ร่วมกับน้ำมันหอมระเหยอบเชย (PLA/PBAT/D03/T1/O5) พบว่าผิวฟิล์มเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงที่ Cycle 3 และพบว่าค่า b (yellowness) มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยเพียงอย่างเดียว (PLA/PBAT/D03/O5) ซึ่งจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถคำนวณได้ดังแสดงในภาคผนวก ข-4 พบว่าฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03/T1/O5 เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป 105.60 ชั่วโมง เมื่อวางชิ้นงานไว้กลางแจ้งที่รัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา (QUV 83 วัน เปรียบเทียบได้กับการวางชิ้นงานไว้กลางแจ้งที่รัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นเวลา 1 ปี [89])

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิด (PLA) และพอลิ(บิวทิลินอะดิเพท-โค-เทอเรพทาเรท) (PBAT) ในอัตราส่วน 70 : 30 ที่มีการเติม DCP ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสาน ร่วมกับ TiO_2 และน้ำมันหอมระเหยอบเชย โดยได้ทำการศึกษาผลของปริมาณการเติม DCP, TiO_2 และน้ำมันหอมระเหยอบเชย จากผลการทดสอบทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากการศึกษาผลของการเติม DCP ในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ในการทดลองตอนที่ 1 พบว่าการเติม DCP มากขึ้นส่งผลให้ PLA และ PBAT มีความเข้ากันได้มากขึ้น โดยพบวิถุภาคกระจายของ PBAT น้อยลงตามปริมาณการเติม DCP แต่อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาหุ่มฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของ FTIR spectra เนื่องจากเมื่อ DCP ได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวเป็น Free radical และเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์บริเวณ α -carbon ซึ่งเชื่อมโยงกันด้วยพันธะ C-C ดังนั้นพิกที่ปรากฏใน FTIR spectrum จึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจากปฏิกิริยาดังกล่าวอาจมีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่มากขึ้น ทำให้เกิดการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวได้ยากขึ้น จึงส่งผลให้ดัชนีโหลมีค่าลดลงเมื่อเติม DCP ในปริมาณมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อเติม DCP ปริมาณมากเกิน 0.03 phr ส่งผลให้ค่า Elongation at break ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอาจเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่มากขึ้น ทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเมื่อได้รับแรงดึงยึดจึงส่งผลให้สายโซ่เคลื่อนที่ผ่านกันได้ยากขึ้น และทำให้ฟิล์มขาดได้ง่ายขึ้น ดังนั้นเพื่อจะยังคงความยืดหยุ่นของฟิล์มเอาไว้จึงเลือกปริมาณการเติม DCP ที่เหมาะสมสำหรับระบบ PLA/PBAT คือ 0.03 phr

5.1.2 จากการศึกษาผลของการเติม TiO_2 ในฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ในการทดลองตอนที่ 2 พบว่าการเติม TiO_2 ในฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ส่งผลให้ฟิล์มฟิล์มคอมพอสิตมีความเข้ากันได้มากขึ้น วิถุภาคของพอลิเมอร์จึงยึดเกาะกันได้ดีมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break มีค่ามากขึ้นเมื่อเติม TiO_2 ถึง 1 phr แต่อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT มีค่าลดลงเมื่อเติม TiO_2 ถึง 2 phr นอกจากนี้เมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณมากขึ้นและฉายรังสียูวีเอปริมาณนานขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และดูดซับแก๊สเอทิลีนได้มากขึ้น จึงมีประสิทธิภาพในการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ผลไม้ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากความขาวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT แปรผันตามปริมาณการเติม TiO_2 จึงทำการเลือกที่ปริมาณ 1 phr และพบว่าปริมาณการฉายรังสียูวีเอ 3 ชั่วโมง

ไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มและลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม จึงเลือกปริมาณเวลาดังกล่าวในการฉายเพื่อกระตุ้นให้เกิดกระบวนการ Photocatalytic

5.1.3 จากการศึกษาผลของการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยในฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ในตอนที่ 3 พบว่าการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยในฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ส่งผลให้ฟิล์มคอมพอสิตมีลักษณะเป็นช่องว่างแทรกอยู่บริเวณเนื้อฟิล์ม นอกจากนี้พบว่าปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยที่มากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีสีเหลืองมากขึ้น และจากพฤติกรรมการเป็น Plasticizer ของน้ำมัน ส่งผลให้สายโซ่ของ PLA เคลื่อนที่ได้ง่ายและมีปริมาณผลึกมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่า Young's modulus และ Tensile strength มีค่าเพิ่มมากขึ้น ที่ปริมาณการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย 0 – 7.5 phr เนื่องจากการแข่งขันกันระหว่างการเป็น Plasticizer ของน้ำมันหอมระเหยอบเชยและปริมาณผลึก แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยเท่ากับ 10 phr พบว่าค่า Young's modulus และ Tensile strength มีค่าลดลง เนื่องจากผลของการเป็น Plasticizer ของน้ำมันหอมระเหยอบเชยสูงกว่าผลของปริมาณผลึก จึงส่งผลให้ระยะห่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์มากขึ้น การเกี่ยวพันกันของสายโซ่จึงน้อยลง และเคลื่อนผ่านกันได้ง่ายขึ้น และนอกจากนี้พบว่าฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้มากขึ้น ดังนั้นปริมาณน้ำมันหอมระเหยอบเชยที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ผลไม้คือ 5 phr

5.1.4 จากการศึกษาผลของการเติม DCP 0.03 phr, TiO_2 1 phr และน้ำมันหอมระเหยอบเชย 5 phr ลงในฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่ามีการมีอยู่ของน้ำมันภายในฟิล์ม โดยมีลักษณะเป็นช่องว่างแทรกอยู่ภายในฟิล์ม แต่อย่างไรก็ตามไม่พบลักษณะกลมของ TiO_2 กระจายตัวภายในฟิล์ม เนื่องจากข้อจำกัดของการศึกษาด้วยเทคนิค SEM นอกจากนี้อิทธิพลของการเป็น Plasticizer ของน้ำมันหอมระเหยอบเชย ส่งผลให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตาม TiO_2 อาจขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่บางส่วนอยู่ จึงส่งผลให้สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ มีค่าอยู่ระหว่าง PLA/PBAT/D03/T1 และ PLA/PBAT/D03/O5 แต่อย่างไรก็ตามไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA/PBAT/D03/T1 และ PLA/PBAT/D03/O5 และนอกจากนี้พบว่าฟิล์มคอมพอสิตดังกล่าวสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และชะลอการสุกของผลไม้ได้มากขึ้น เนื่องจากผลของการเป็น Antimicrobial agent ของน้ำมันหอมระเหยอบเชยและการเป็น Ethylene scavenger ของ TiO_2 และจากการศึกษา

ความสามารถในการทนทานต่อสภาพแวดล้อมโดยการเร่งสภาวะพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03/T1/O5 พบว่าฟิล์มเริ่มเสียสภาพที่ cycle ที่ 3 (UV-B 12 ชั่วโมง) ดังนั้นฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03/T1/O5 ดังกล่าว จึงมีประสิทธิภาพในการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์สินค้าทางการเกษตรได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงของสายโซ่ PLA และ PBAT ด้วย DCP เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงสร้าง PLA-PBAT สามารถควบคุมการเกิดปฏิกิริยาได้โดยการควบคุมสภาวะในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิการผสม ความเร็วรอบในการหมุนของสกรู ขั้นตอนการขึ้นรูป เป็นต้น โดยอาจทำการหลอมผสม PLA และ PBAT ก่อน จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิให้ DCP เกิดการแตกตัว และเกิดปฏิกิริยาตามลำดับ

5.2.2 สำหรับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชยปริมาณต่างๆ พบว่าหลังจากกระบวนการขึ้นรูปและเก็บไว้เป็นระยะเวลาประมาณ 7 เดือน ไม่ส่งผลให้น้ำมันหอมระเหยอบเชยออกมาเคลือบบริเวณผิวฟิล์มและไม่ส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนแปลงไป แต่อย่างไรก็ตามหากมีการเก็บรักษาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเป็นระยะเวลานานขึ้นอาจต้องมีการทดสอบการมีอยู่ของน้ำมันหอมระเหยอบเชยภายในฟิล์ม เพื่อประสิทธิภาพในการใช้งาน



ภาคผนวก ก.

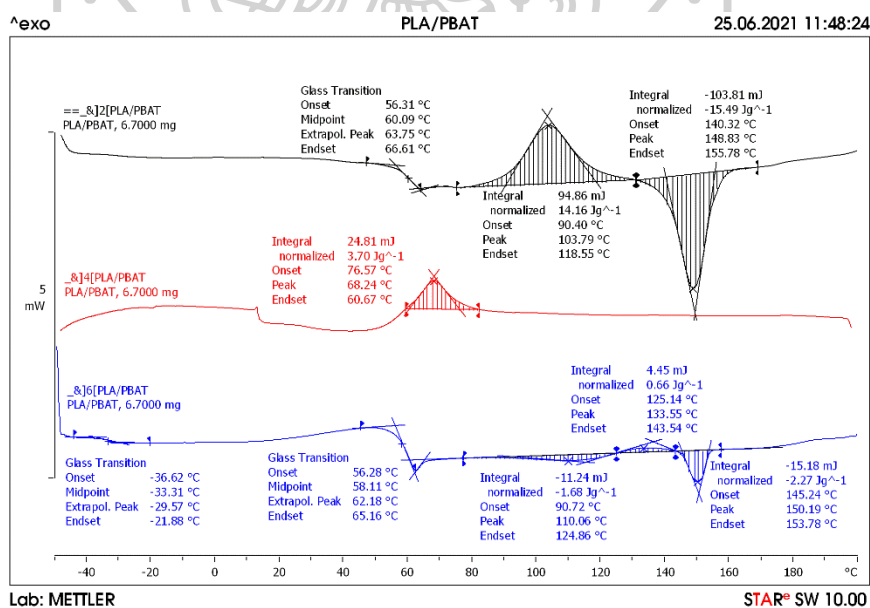
ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ

ภาคผนวก ก-1 สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT เมื่อมีการเติม DCP ปริมาณต่างๆ
ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

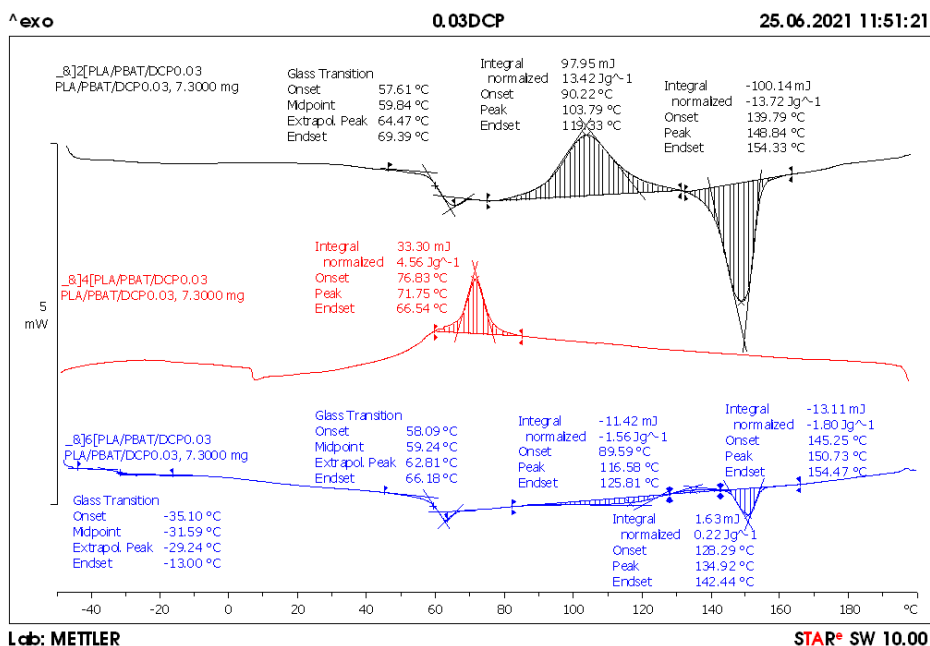
ตารางภาคผนวก ก. 1 สรุปค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP ปริมาณต่างๆ

Sample	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PLA/PBAT/D0	1.578 ± 0.06^b	28.48 ± 3.67^c	236.47 ± 61.86^a
PLA/PBAT/D03	1.470 ± 0.05^c	25.10 ± 2.65^d	177.16 ± 38.21^b
PLA/PBAT/D06	$1.587 \pm 0.04^{a,b}$	34.86 ± 2.79^b	24.58 ± 15.15^c
PLA/PBAT/D1	1.631 ± 0.04^a	38.92 ± 1.20^a	3.19 ± 0.12^c

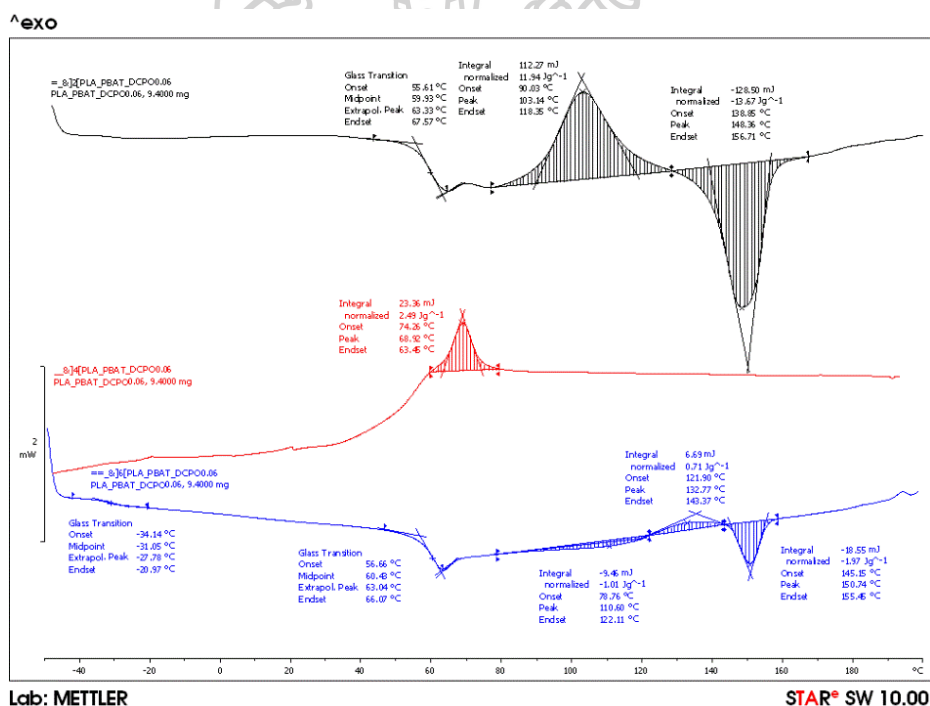
ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



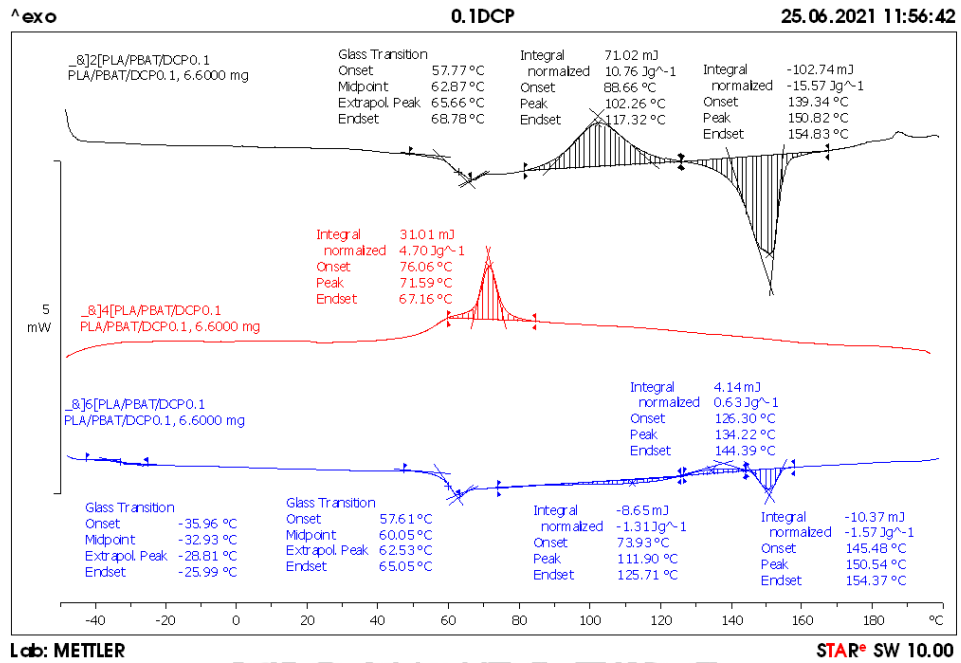
ภาคผนวก ก. 1 DSC Thermograms ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D0



ภาคผนวก ก. 2 DSC Thermograms ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP 0.03 phr



ภาคผนวก ก. 3 DSC Thermograms ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP 0.06 phr



ภาพผนวก ก. 4 DSC Thermograms ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม DCP 0.1 phr



ตารางภาคผนวก ก. 2 สรุปค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการวัดค่าดัชนีการไหล (Melt flow index) ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP ปริมาณต่าง ๆ

Sample	Weight (g)	Time (s)	MFI (g/10min)	Avg	S.D.
PLA/PBAT/D0	3.2025	454.63	4.227	5.052	0.795
	2.3135	271.24	5.118		
	2.3153	238.98	5.813		
PLA/PBAT/D03	3.0453	524.01	3.487	4.484	0.977
	2.2086	292.91	4.524		
	2.3604	260.32	5.440		
PLA/PBAT/D06	2.3919	412.19	3.482	4.408	0.933
	2.0054	273.72	4.396		
	2.3705	265.99	5.347		
PLA/PBAT/D1	2.2714	454.09	3.001	4.047	1.036
	2.2823	336.59	4.068		
	2.3711	280.48	5.072		

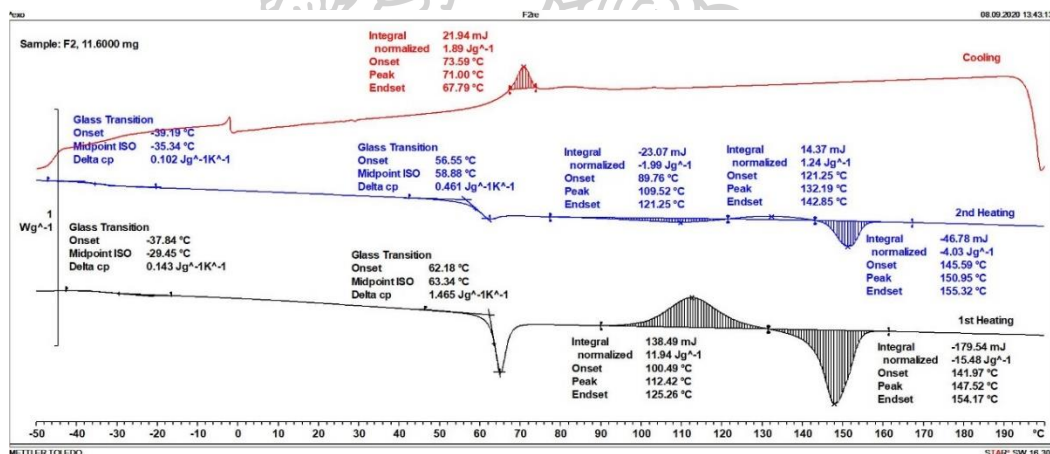
ภาคผนวก ก-2 สมบัติของฟิล์มคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT เมื่อมีการเติม TiO_2 ปริมาณต่าง ๆ

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

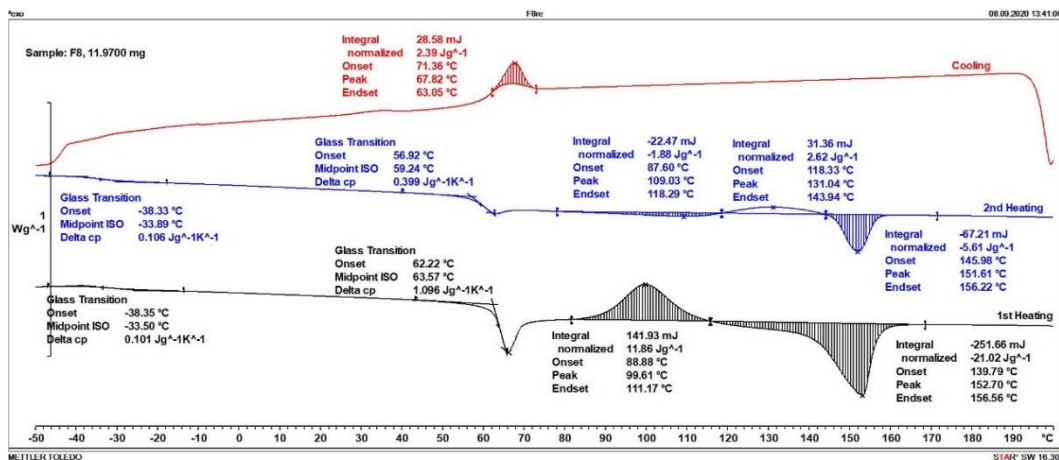
ตารางภาคผนวก ก. 3 สรุปค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่ไม่เติมและเติม TiO_2 ปริมาณต่าง ๆ

Sample	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PLA/PBAT/D03/T0	1.47 ± 0.05^c	25.10 ± 2.65^d	177.16 ± 38.21^d
PLA/PBAT/D03/T0.25	1.81 ± 0.03^a	$30.12 \pm 4.32^{b,c}$	$212.97 \pm 79.87^{c,d}$
PLA/PBAT/D03/T0.5	1.88 ± 0.04^a	41.32 ± 5.40^a	321.28 ± 44.01^b
PLA/PBAT/D03/T1	1.85 ± 0.06^a	33.05 ± 1.75^b	405.57 ± 17.89^a
PLA/PBAT/D03/T2	1.62 ± 0.05^b	$27.55 \pm 2.93^{c,d}$	$282.60 \pm 23.73^{b,c}$

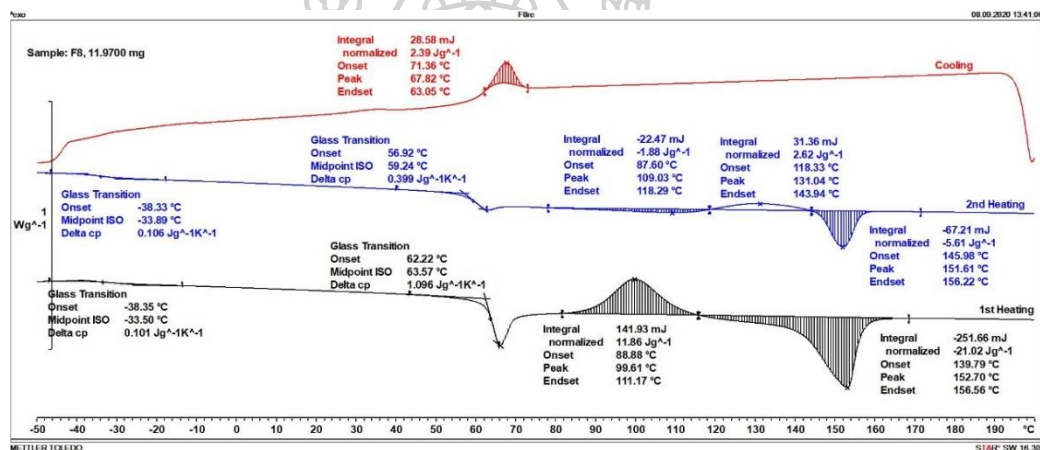
ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



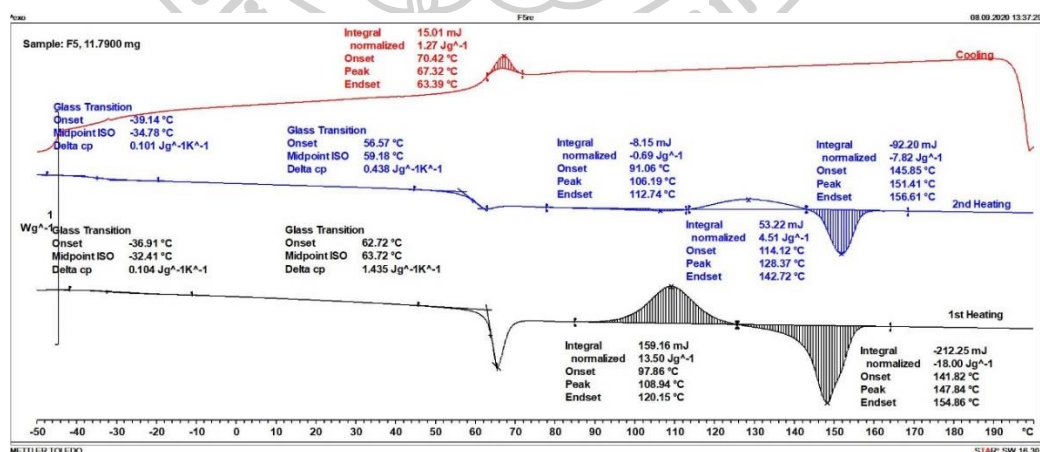
ภาคผนวก ก. 5 DSC Thermogram ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03/T0.25



ภาคผนวก ก. 6 DSC Thermogram ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03/T0.5



ภาคผนวก ก. 7 DSC Thermogram ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03/T1



ภาคผนวก ก. 8 DSC Thermogram ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03/T2

ผลการทดสอบสมบัตการด้านทานเชื้อแบคทีเรีย

ตารางภาพผนวก ก. 4 ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบสมบัตการด้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ โดยที่ไม่มีการฉายรังสียูวีเอ ต่อแบคทีเรียชนิด *S. aureus*

สูตร	ไม่มีการฉายรังสียูวีเอ									
	ซ้ำที่ 1					ซ้ำที่ 2				
	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml		
เชื้อ	699	10 ⁻⁷	0.1	6.99 × 10 ¹⁰	548	10 ⁻⁷	0.1	5.48 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T0	399	10 ⁻⁷	0.09	4.43 × 10 ¹⁰	492	10 ⁻⁷	0.09	4.36 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T0.25	438	10 ⁻⁷	0.09	4.87 × 10 ¹⁰	346	10 ⁻⁷	0.09	3.84 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T0.5	399	10 ⁻⁷	0.1	3.99 × 10 ¹⁰	414	10 ⁻⁷	0.1	4.14 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T1	266	10 ⁻⁷	0.1	2.66 × 10 ¹⁰	317	10 ⁻⁷	0.1	3.17 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T2	148	10 ⁻⁷	0.07	2.11 × 10 ¹⁰	183	10 ⁻⁷	0.08	2.29 × 10 ¹⁰		
สูตร	ซ้ำที่ 3									
	ซ้ำที่ 3					ซ้ำที่ 4				
	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml		
เชื้อ	623	10 ⁻⁷	0.1	6.23 × 10 ¹⁰	586	10 ⁻⁷	0.1	5.86 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T0	446	10 ⁻⁷	0.09	4.96 × 10 ¹⁰	469	10 ⁻⁷	0.09	5.21 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T0.25	392	10 ⁻⁷	0.09	4.36 × 10 ¹⁰	369	10 ⁻⁷	0.09	4.10 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T0.5	407	10 ⁻⁷	0.1	4.07 × 10 ¹⁰	411	10 ⁻⁷	0.1	4.11 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T1	292	10 ⁻⁷	0.1	2.92 × 10 ¹⁰	305	10 ⁻⁷	0.1	3.05 × 10 ¹⁰		

ตารางภาคผนวก ก. 5 ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพด้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *S. aureus* โดยที่มีการฉายรังสียูวีเอ 1 ชั่วโมง

ฉายรังสียูวีเอ 1 ชั่วโมง										
สูตร	ซ้ำที่ 1					ซ้ำที่ 2				
	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml		
PLA/PBAT/D03/T0	383	10^{-7}	0.1	3.83×10^{10}	371	10^{-7}	0.1	3.71×10^{10}		
PLA/PBAT/D03/T0.25	350	10^{-7}	0.1	3.50×10^{10}	330	10^{-7}	0.09	3.67×10^{10}		
PLA/PBAT/D03/T0.5	347	10^{-7}	0.1	3.47×10^{10}	346	10^{-7}	0.1	3.46×10^{10}		
PLA/PBAT/D03/T1	260	10^{-7}	0.1	2.60×10^{10}	213	10^{-7}	0.08	2.66×10^{10}		
PLA/PBAT/D03/T2	165	10^{-7}	0.07	2.36×10^{10}	133	10^{-7}	0.06	2.22×10^{10}		
สูตร	ซ้ำที่ 3					ซ้ำที่ 4				
	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml		
PLA/PBAT/D03/T0	377	10^{-7}	0.1	3.77×10^{10}	374	10^{-7}	0.1	3.74×10^{10}		
PLA/PBAT/D03/T0.25	344	10^{-7}	0.09	3.82×10^{10}	337	10^{-7}	0.1	3.37×10^{10}		
PLA/PBAT/D03/T0.5	347	10^{-7}	0.1	3.47×10^{10}	343	10^{-7}	0.1	3.43×10^{10}		
PLA/PBAT/D03/T1	267	10^{-7}	0.08	3.34×10^{10}	255	10^{-7}	0.08	3.19×10^{10}		
PLA/PBAT/D03/T2	149	10^{-7}	0.06	2.48×10^{10}	141	10^{-7}	0.07	2.01×10^{10}		

ตารางภาพผนวก ก. 6 ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *S. aureus* โดยที่มีการฉายรังสียูวีเอ 2 ชั่วโมง

สูตร	ฉายรังสียูวีเอ 2 ชั่วโมง											
	ซ้ำที่ 1						ซ้ำที่ 2					
	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml
PLA/PBAT/D03/T0	350	10 ⁻⁷	0.1	3.50 × 10 ¹⁰	343	10 ⁻⁷	0.1	3.43 × 10 ¹⁰				
PLA/PBAT/D03/T0.25	322	10 ⁻⁷	0.1	3.22 × 10 ¹⁰	320	10 ⁻⁷	0.1	3.20 × 10 ¹⁰				
PLA/PBAT/D03/T0.5	310	10 ⁻⁷	0.1	3.10 × 10 ¹⁰	267	10 ⁻⁷	0.1	2.67 × 10 ¹⁰				
PLA/PBAT/D03/T1	298	10 ⁻⁷	0.1	2.98 × 10 ¹⁰	266	10 ⁻⁷	0.1	2.66 × 10 ¹⁰				
PLA/PBAT/D03/T2	182	10 ⁻⁷	0.1	1.82 × 10 ¹⁰	180	10 ⁻⁷	0.1	1.80 × 10 ¹⁰				
สูตร	ซ้ำที่ 3						ซ้ำที่ 4					
	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml
PLA/PBAT/D03/T0	347	10 ⁻⁷	0.1	3.47 × 10 ¹⁰	345	10 ⁻⁷	0.1	3.45 × 10 ¹⁰				
PLA/PBAT/D03/T0.25	323	10 ⁻⁷	0.1	3.23 × 10 ¹⁰	321	10 ⁻⁷	0.1	3.21 × 10 ¹⁰				
PLA/PBAT/D03/T0.5	289	10 ⁻⁷	0.1	2.89 × 10 ¹⁰	278	10 ⁻⁷	0.1	2.78 × 10 ¹⁰				
PLA/PBAT/D03/T1	261	10 ⁻⁷	0.1	2.61 × 10 ¹⁰	245	10 ⁻⁷	0.1	2.45 × 10 ¹⁰				
PLA/PBAT/D03/T2	181	10 ⁻⁷	0.1	1.81 × 10 ¹⁰	184	10 ⁻⁷	0.1	1.84 × 10 ¹⁰				

ตารางภาคผนวก ก. 7 ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานของเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *S. aureus* โดยที่มีการฉายรังสียูวีเอ 3 ชั่วโมง

สูตร	ฉายรังสียูวีเอ 3 ชั่วโมง									
	ซ้ำที่ 1					ซ้ำที่ 2				
	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml		
PLA/PBAT/D03/T0	340	10 ⁻⁷	0.1	3.40 × 10 ¹⁰	333	10 ⁻⁷	0.1	3.33 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T0.25	315	10 ⁻⁷	0.1	3.15 × 10 ¹⁰	309	10 ⁻⁷	0.1	3.09 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T0.5	214	10 ⁻⁷	0.09	2.38 × 10 ¹⁰	222	10 ⁻⁷	0.1	2.22 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T1	191	10 ⁻⁷	0.09	2.12 × 10 ¹⁰	148	10 ⁻⁷	0.09	1.64 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T2	124	10 ⁻⁷	0.09	1.38 × 10 ¹⁰	124	10 ⁻⁷	0.1	1.24 × 10 ¹⁰		
สูตร	ซ้ำที่ 3									
	ซ้ำที่ 3					ซ้ำที่ 4				
	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml		
PLA/PBAT/D03/T0	350	10 ⁻⁷	0.1	3.50 × 10 ¹⁰	313	10 ⁻⁷	0.1	3.13 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T0.25	311	10 ⁻⁷	0.1	3.11 × 10 ¹⁰	320	10 ⁻⁷	0.1	3.20 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T0.5	218	10 ⁻⁷	0.1	2.18 × 10 ¹⁰	225	10 ⁻⁷	0.09	2.50 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T1	170	10 ⁻⁷	0.09	1.89 × 10 ¹⁰	159	10 ⁻⁷	0.09	1.77 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T2	126	10 ⁻⁷	0.09	1.40 × 10 ¹⁰	123	10 ⁻⁷	0.1	1.23 × 10 ¹⁰		

ตารางภาคผนวก ก. 8 สรุปค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากกาทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *S. aureus*

สูตร		ไม่มีการฉายรังสียูวีเอ			ฉายรังสียูวีเอ 1 ชั่วโมง			ร้อยละการลดลงของแบคทีเรีย	
		เฉลี่ย		S.D.	สูตร	เฉลี่ย			
		CFU/ml					CFU/ml	S.D.	
PLA/PBAT/D03/T0		4.74×10^{10}	4.12×10^9	0.00	PLA/PBAT/D03/0T	3.76×10^{10}	5.12×10^8	20.61	
PLA/PBAT/D03/T0.25		4.29×10^{10}	4.39×10^9	9.45	PLA/PBAT/D03/0.25T	3.59×10^{10}	1.97×10^9	24.25	
PLA/PBAT/D03/T0.5		4.08×10^{10}	6.50×10^8	13.96	PLA/PBAT/D03/0.5T	3.46×10^{10}	1.89×10^8	27.04	
PLA/PBAT/D03/T1		2.95×10^{10}	2.19×10^9	37.75	PLA/PBAT/D03/1T	2.95×10^{10}	3.70×10^9	37.82	
PLA/PBAT/D03/T2		2.24×10^{10}	1.15×10^9	52.74	PLA/PBAT/D03/2T	2.27×10^{10}	2.01×10^9	52.15	
		ฉายรังสียูวีเอ 2 ชั่วโมง			ฉายรังสียูวีเอ 3 ชั่วโมง				
		เฉลี่ย		S.D.	สูตร	เฉลี่ย			
		CFU/ml				CFU/ml	S.D.		
PLA/PBAT/D03/T0		3.46×10^{10}	2.99×10^8	26.94	PLA/PBAT/D03/0T	3.34×10^{10}	1.56×10^9	29.52	
PLA/PBAT/D03/T0.25		3.22×10^{10}	1.29×10^8	32.16	PLA/PBAT/D03/0.25T	3.14×10^{10}	4.86×10^8	33.80	
PLA/PBAT/D03/T0.5		2.86×10^{10}	1.83×10^9	39.65	PLA/PBAT/D03/0.5T	2.32×10^{10}	1.48×10^9	51.06	
PLA/PBAT/D03/T1		2.68×10^{10}	2.22×10^9	43.56	PLA/PBAT/D03/1T	1.86×10^{10}	2.04×10^9	60.85	
PLA/PBAT/D03/T2		1.82×10^{10}	1.71×10^8	61.65	PLA/PBAT/D03/2T	1.31×10^{10}	8.94×10^8	72.32	

ตารางภาคผนวก ก. 9 ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *E. coli* โดยที่ไม่มีการฉายรังสียูวีเอ

สูตร	ไม่มีการฉายรังสียูวีเอ									
	ซ้ำที่ 1					ซ้ำที่ 2				
	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml		
Control	285	10 ⁻⁷	0.1	2.85 × 10 ¹⁰	370	10 ⁻⁷	0.1	3.70 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T0	257	10 ⁻⁷	0.1	2.57 × 10 ¹⁰	359	10 ⁻⁷	0.1	3.59 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T0.25	254	10 ⁻⁷	0.1	2.54 × 10 ¹⁰	267	10 ⁻⁷	0.1	2.67 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T0.5	193	10 ⁻⁷	0.1	1.93 × 10 ¹⁰	261	10 ⁻⁷	0.1	2.61 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T1	214	10 ⁻⁷	0.1	2.14 × 10 ¹⁰	221	10 ⁻⁷	0.1	2.21 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T2	186	10 ⁻⁷	0.1	1.86 × 10 ¹⁰	198	10 ⁻⁷	0.1	1.98 × 10 ¹⁰		
สูตร	ซ้ำที่ 3					ซ้ำที่ 4				
	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml		
	Control	384	10 ⁻⁷	0.1	3.84 × 10 ¹⁰	297	10 ⁻⁷	0.1	2.97 × 10 ¹⁰	
PLA/PBAT/D03/0T	308	10 ⁻⁷	0.1	3.08 × 10 ¹⁰	334	10 ⁻⁷	0.1	3.34 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/0.25T	235	10 ⁻⁷	0.1	2.35 × 10 ¹⁰	240	10 ⁻⁷	0.1	2.40 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/0.5T	227	10 ⁻⁷	0.1	2.27 × 10 ¹⁰	244	10 ⁻⁷	0.1	2.44 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/1T	218	10 ⁻⁷	0.1	2.18 × 10 ¹⁰	220	10 ⁻⁷	0.1	2.20 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/2T	192	10 ⁻⁷	0.1	1.92 × 10 ¹⁰	195	10 ⁻⁷	0.1	1.95 × 10 ¹⁰		

ตารางภาคผนวก ก. 10 ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *E. coli* โดยที่มีการฉายรังสียูวีเอ 1 ชั่วโมง

สูตร	ฉากรังสียูวีเอ 1 ชั่วโมง									
	ซ้ำที่ 1					ซ้ำที่ 2				
	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml		
PLA/PBAT/D03/T0	271	10 ⁻⁷	0.1	2.71 × 10 ¹⁰	268	10 ⁻⁷	0.1	2.68 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T0.25	243	10 ⁻⁷	0.1	2.43 × 10 ¹⁰	214	10 ⁻⁷	0.1	2.14 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T0.5	210	10 ⁻⁷	0.1	2.10 × 10 ¹⁰	235	10 ⁻⁷	0.1	2.35 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T1	207	10 ⁻⁷	0.1	2.07 × 10 ¹⁰	212	10 ⁻⁷	0.1	2.12 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T2	176	10 ⁻⁷	0.1	1.76 × 10 ¹⁰	171	10 ⁻⁷	0.1	1.71 × 10 ¹⁰		
สูตร	ซ้ำที่ 3									
	ซ้ำที่ 3					ซ้ำที่ 4				
	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml		
PLA/PBAT/D03/T0	270	10 ⁻⁷	0.1	2.70 × 10 ¹⁰	270	10 ⁻⁷	0.1	2.70 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T0.25	229	10 ⁻⁷	0.1	2.29 × 10 ¹⁰	222	10 ⁻⁷	0.1	2.22 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T0.5	224	10 ⁻⁷	0.1	2.24 × 10 ¹⁰	203	10 ⁻⁷	0.1	2.03 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T1	210	10 ⁻⁷	0.1	2.10 × 10 ¹⁰	211	10 ⁻⁷	0.1	2.11 × 10 ¹⁰		
PLA/PBAT/D03/T2	161	10 ⁻⁷	0.1	1.61 × 10 ¹⁰	175	10 ⁻⁷	0.1	1.75 × 10 ¹⁰		

ตารางภาคผนวก ก. 11 ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเอสเตอร์ผสมสูตรต่าง ๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *E. coli* โดยที่มีการฉายรังสียูวีเอ 2 ชั่วโมง

ฉายรังสียูวีเอ 2 ชั่วโมง									
สูตร	ซ้ำที่ 1					ซ้ำที่ 2			
	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml	
PLA/PBAT/D03/T0	251	10^{-7}	0.1	2.51×10^{10}	252	10^7	0.1	2.52×10^{10}	
PLA/PBAT/D03/T0.25	213	10^{-7}	0.1	2.13×10^{10}	250	10^7	0.1	2.50×10^{10}	
PLA/PBAT/D03/T0.5	174	10^{-7}	0.1	1.74×10^{10}	226	10^7	0.1	2.26×10^{10}	
PLA/PBAT/D03/T1	175	10^{-7}	0.1	1.75×10^{10}	197	10^7	0.1	1.97×10^{10}	
PLA/PBAT/D03/T2	161	10^{-7}	0.1	1.61×10^{10}	163	10^7	0.1	1.63×10^{10}	
สูตร	ซ้ำที่ 3					ซ้ำที่ 4			
	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml	
PLA/PBAT/D03/T0	250	10^{-7}	0.1	2.50×10^{10}	256	10^7	0.1	2.56×10^{10}	
PLA/PBAT/D03/T0.25	214	10^{-7}	0.1	2.14×10^{10}	226	10^7	0.1	2.26×10^{10}	
PLA/PBAT/D03/T0.5	200	10^{-7}	0.1	2.00×10^{10}	234	10^7	0.1	2.34×10^{10}	
PLA/PBAT/D03/T1	186	10^{-7}	0.1	1.86×10^{10}	192	10^7	0.1	1.92×10^{10}	
PLA/PBAT/D03/T2	169	10^{-7}	0.1	1.69×10^{10}	170	10^7	0.1	1.70×10^{10}	

ตารางภาพผนวก ก. 12 ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพด้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *E. coli* โดยที่มีการฉายรังสียูวีเอ 3 ชั่วโมง

ฉายรังสียูวีเอ 3 ชั่วโมง										
สูตร	ซ้ำที่ 1					ซ้ำที่ 2				
	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml		
PLA/PBAT/D03/T0	275	10^{-7}	0.1	2.75×10^{10}	267	10^{-7}	0.1	2.67×10^{10}		
PLA/PBAT/D03/T0.25	211	10^{-7}	0.1	2.11×10^{10}	235	10^{-7}	0.1	2.35×10^{10}		
PLA/PBAT/D03/T0.5	213	10^{-7}	0.1	2.13×10^{10}	205	10^{-7}	0.1	2.05×10^{10}		
PLA/PBAT/D03/T1	184	10^{-7}	0.1	1.84×10^{10}	185	10^{-7}	0.1	1.85×10^{10}		
PLA/PBAT/D03/T2	179	10^{-7}	0.1	1.79×10^{10}	163	10^{-7}	0.1	1.63×10^{10}		
สูตร	ซ้ำที่ 3					ซ้ำที่ 4				
	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml		
PLA/PBAT/D03/T0	254	10^{-7}	0.1	2.54×10^{10}	258	10^{-7}	0.1	2.58×10^{10}		
PLA/PBAT/D03/T0.25	224	10^{-7}	0.1	2.24×10^{10}	208	10^{-7}	0.1	2.08×10^{10}		
PLA/PBAT/D03/T0.5	214	10^{-7}	0.1	2.14×10^{10}	194	10^{-7}	0.1	1.94×10^{10}		
PLA/PBAT/D03/T1	196	10^{-7}	0.1	1.96×10^{10}	176	10^{-7}	0.1	1.76×10^{10}		
PLA/PBAT/D03/T2	151	10^{-7}	0.1	1.51×10^{10}	132	10^{-7}	0.1	1.32×10^{10}		

ตารางภาคผนวก ก. 13 สรุปค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม
สูตรต่าง ๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *E. coli*

ไม่มีการฉายรังสี			ฉายรังสี 1 ชั่วโมง		
สูตร	เฉลี่ย		สูตร	เฉลี่ย	
	CFU/ml	S.D.		CFU/ml	S.D.
PLA/PBAT/D03/T0	3.15×10^{10}	4.36×10^9	PLA/PBAT/D03/T0	2.70×10^{10}	1.26×10^8
PLA/PBAT/D03/T0.25	2.49×10^{10}	1.44×10^9	PLA/PBAT/D03/T0.25	2.27×10^{10}	1.23×10^9
PLA/PBAT/D03/T0.5	2.31×10^{10}	2.90×10^9	PLA/PBAT/D03/T0.5	2.18×10^{10}	1.43×10^9
PLA/PBAT/D03/T1	2.18×10^{10}	3.10×10^8	PLA/PBAT/D03/T1	2.10×10^{10}	2.16×10^8
PLA/PBAT/D03/T2	1.93×10^{10}	5.12×10^8	PLA/PBAT/D03/T2	1.71×10^{10}	6.85×10^8
ฉายรังสี 2 ชั่วโมง			ฉายรังสี 3 ชั่วโมง		
สูตร	เฉลี่ย		สูตร	เฉลี่ย	
	CFU/ml	S.D.		CFU/ml	S.D.
PLA/PBAT/D03/T0	2.52×10^{10}	2.63×10^8	PLA/PBAT/D03/T0	2.64×10^{10}	9.40×10^8
PLA/PBAT/D03/T0.25	2.26×10^{10}	1.72×10^9	PLA/PBAT/D03/T0.25	2.20×10^{10}	1.24×10^9
PLA/PBAT/D03/T0.5	2.09×10^{10}	2.72×10^9	PLA/PBAT/D03/T0.5	2.07×10^{10}	9.26×10^8
PLA/PBAT/D03/T1	1.88×10^{10}	9.47×10^8	PLA/PBAT/D03/T1	1.85×10^{10}	8.22×10^8
PLA/PBAT/D03/T2	1.66×10^{10}	4.43×10^8	PLA/PBAT/D03/T2	1.56×10^{10}	1.98×10^8

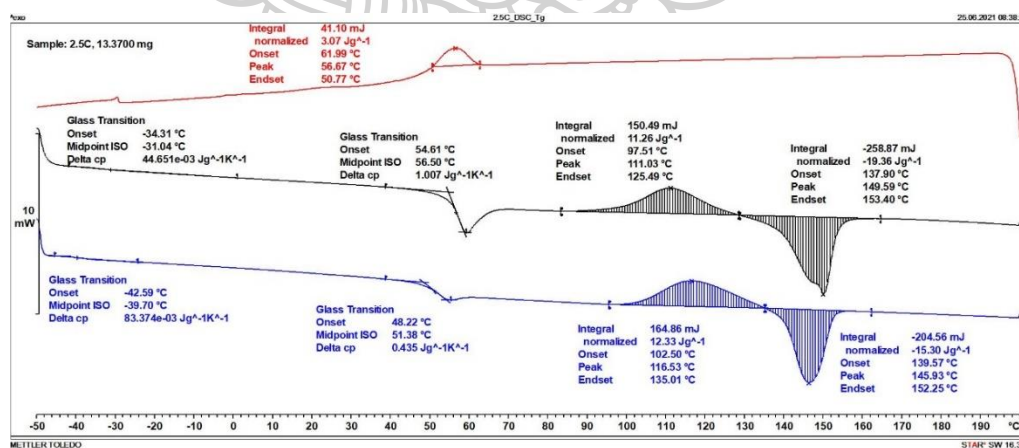
ภาคผนวก ก-3 สมบัติของฟิล์มคอมพอลิทีด PLA/PBAT เมื่อมีการเติมน้ำมันหอมระเหยอบเชย ปริมาณต่างๆ

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

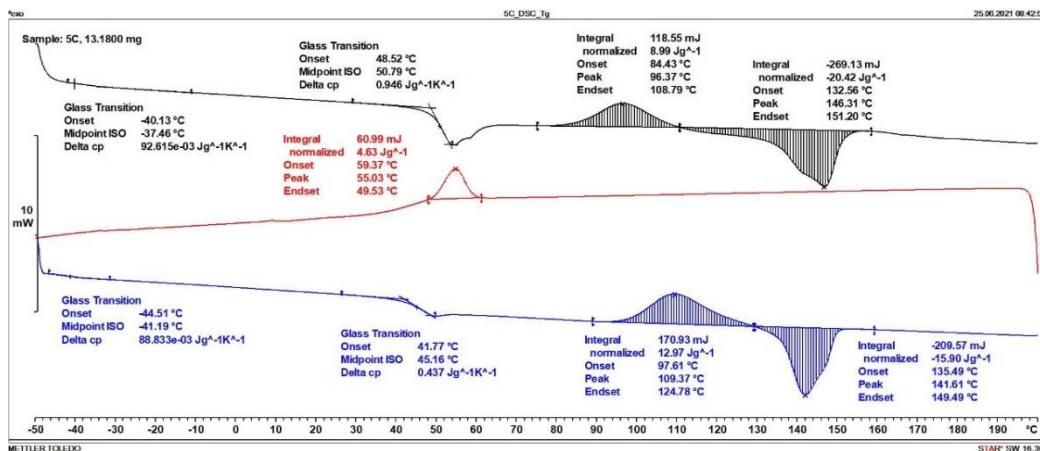
ตารางภาคผนวก ก. 14 สรุปค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติมน้ำมันหอมระเหยปริมาณต่างๆ

Sample	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PLA/PBAT/D03	1.47 ± 0.05^b	24.30 ± 4.68^a	$177.16 \pm 38.21^{a,b}$
PLA/PBAT/D03/O2.5	1.56 ± 0.17^b	$21.00 \pm 2.75^{a,b}$	160.30 ± 49.78^b
PLA/PBAT/D03/O5	1.64 ± 0.08^a	$23.24 \pm 0.95^{a,b}$	161.36 ± 53.60^b
PLA/PBAT/D03/O7.5	1.64 ± 0.16^a	$22.43 \pm 2.12^{a,b}$	165.08 ± 44.40^b
PLA/PBAT/D03/O10	1.44 ± 0.09^b	17.25 ± 2.19^c	238.28 ± 64.90^a

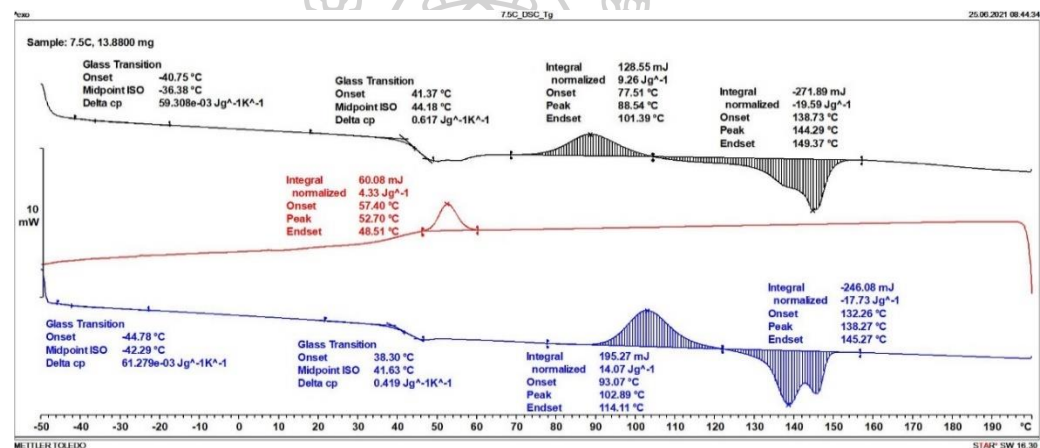
ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



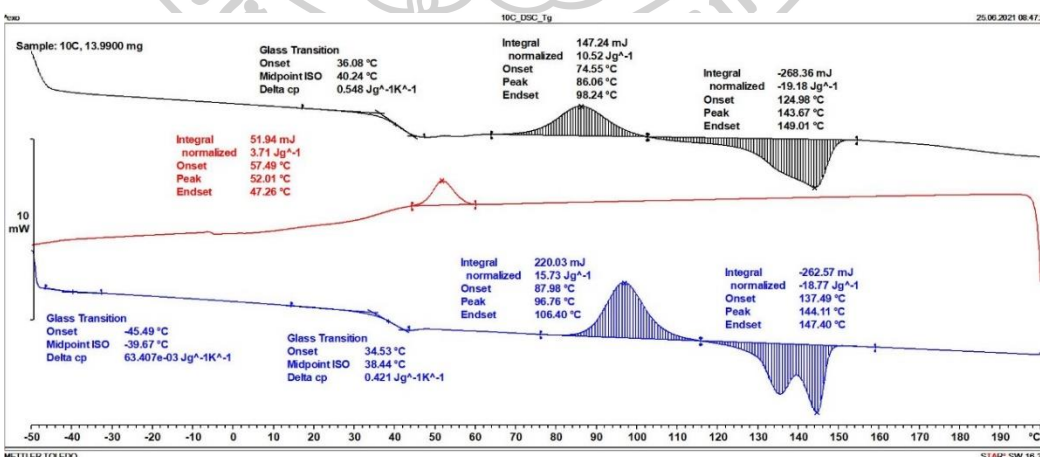
ภาคผนวก ก. 9 DSC Thermogram ของฟิล์มคอมพอลิทีด PLA/PBAT/D03/O2.5



ภาคผนวก ก. 10 DSC Thermogram ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03/O5

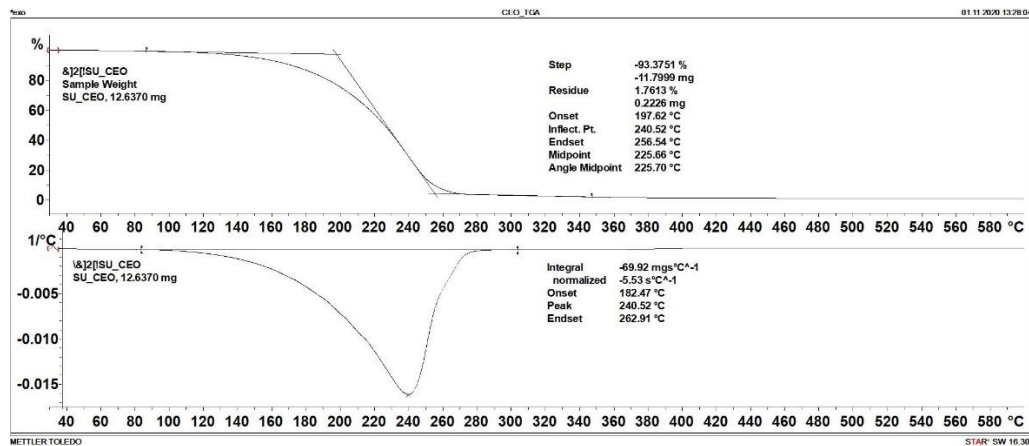


ภาคผนวก ก. 11 DSC Thermogram ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03/O7.5

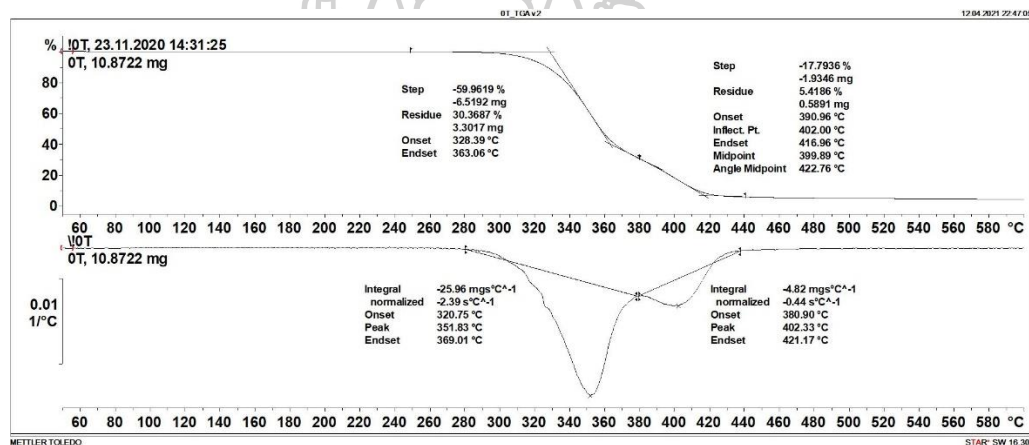


ภาคผนวก ก. 12 DSC Thermogram ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03/O10

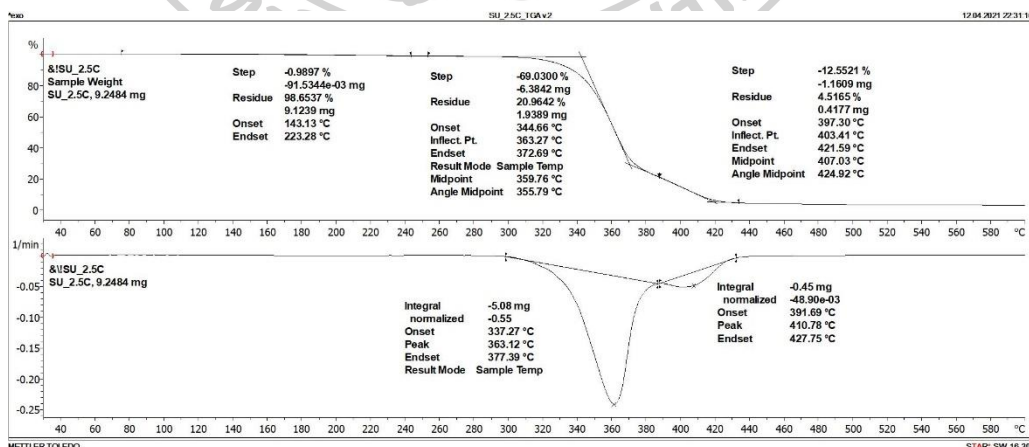
ผลการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA



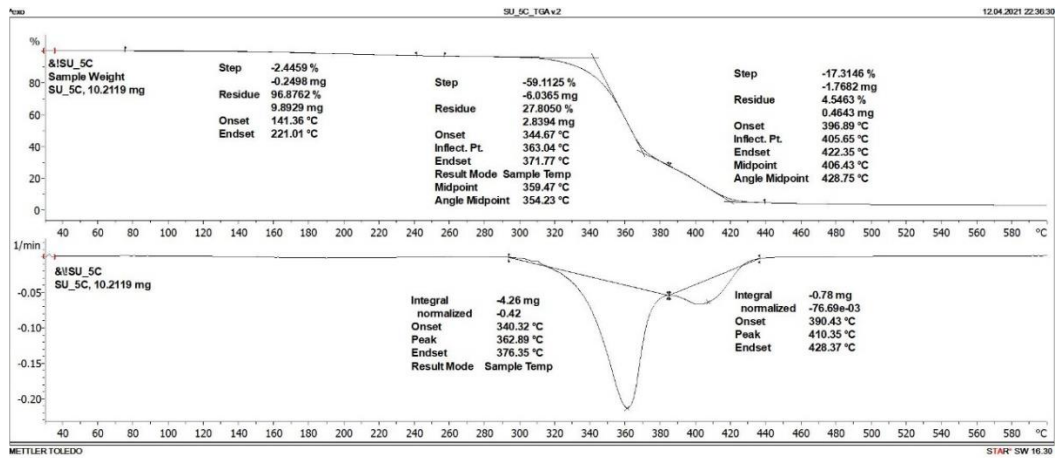
ภาคผนวก ก. 13 TGA thermogram ของน้ำมันหอมระเหยอบเชย



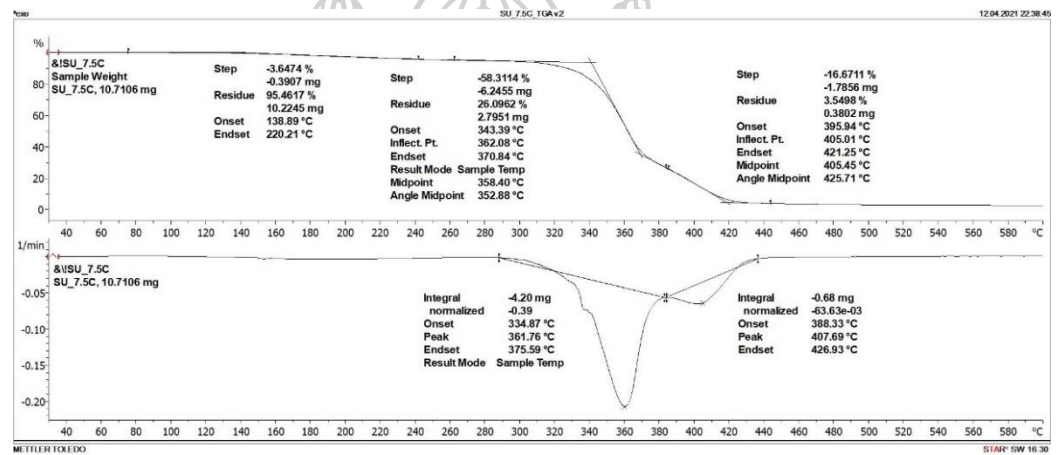
ภาคผนวก ก. 14 TGA Thermogram ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03/O0



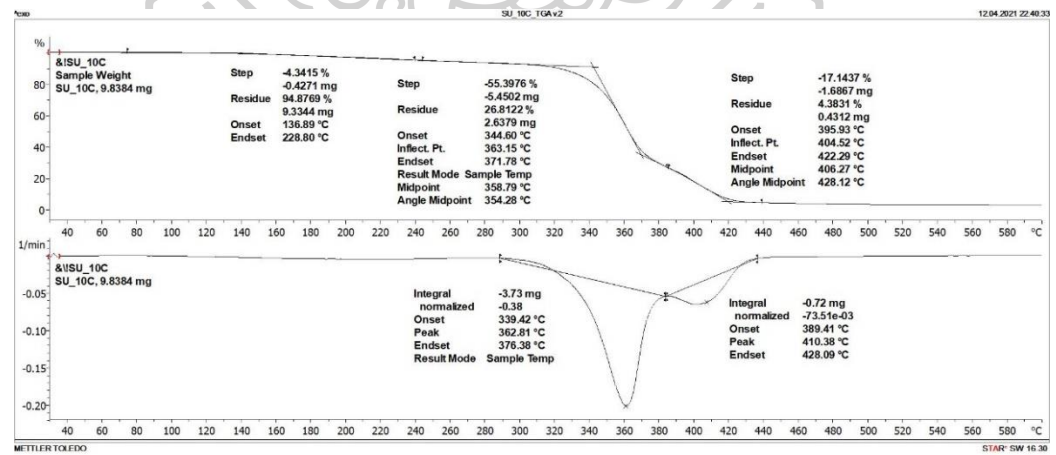
ภาคผนวก ก. 15 TGA Thermogram ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03/O2.5



ภาคผนวก ก. 16 TGA Thermogram ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03/O5



ภาคผนวก ก. 17 TGA Thermogram ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03/O7.5



ภาคผนวก ก. 18 TGA Thermogram ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03/O10

ผลการทดสอบปฏิบัติการด้านทานเชื้อแบคทีเรีย

ตารางภาคผนวก ก. 15 ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบปฏิบัติการด้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มฟิล์มคอมพอสิตวัสดุต่าง ๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *S. aureus*

สูตร	ซ้ำที่ 1				ซ้ำที่ 2			
	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml
PLA/PBAT/D03/O0	568	10^{-7}	0.1	5.68×10^{10}	325	10^{-7}	0.1	3.25×10^{10}
PLA/PBAT/D03/O2.5	223	10^{-7}	0.1	2.23×10^{10}	172	10^{-7}	0.1	1.72×10^{10}
PLA/PBAT/D03/O5	176	10^{-7}	0.1	1.76×10^{10}	172	10^{-7}	0.1	1.72×10^{10}
PLA/PBAT/D03/O7.5	123	10^{-7}	0.1	1.23×10^{10}	123	10^{-7}	0.1	1.23×10^{10}
PLA/PBAT/D03/O10	96	10^{-7}	0.1	9.60×10^{10}	87	10^{-7}	0.1	8.70×10^9
สูตร	ซ้ำที่ 3				ซ้ำที่ 4			
	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวนโคโลนี	ความเข้มข้น	ml	CFU/ml
PLA/PBAT/D03/O0	578	10^{-7}	0.1	5.78×10^{10}	479	10^{-7}	0.1	4.79×10^{10}
PLA/PBAT/D03/O2.5	221	10^{-7}	0.1	2.21×10^{10}	227	10^{-7}	0.1	2.27×10^{10}
PLA/PBAT/D03/O5	180	10^{-7}	0.1	1.80×10^{10}	175	10^{-7}	0.1	1.75×10^{10}
PLA/PBAT/D03/O7.5	130	10^{-7}	0.1	1.30×10^{10}	125	10^{-7}	0.1	1.25×10^{10}
PLA/PBAT/D03/O10	95	10^{-7}	0.1	9.50×10^9	89	10^{-7}	0.1	8.90×10^9

ตารางภาคผนวก ก. 16 ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบประสิทธิภาพการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มคอมพอสิตส์สูตรต่าง ๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *E. coli*

สูตร	ซ้ำที่ 1					ซ้ำที่ 2						
	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml
PLA/PBAT/D03/O0	257	10^{-7}	0.1	2.57×10^{10}	341	10^{-7}	0.1	3.41×10^{10}				
PLA/PBAT/D03/O2.5	245	10^{-7}	0.1	2.45×10^{10}	236	10^{-7}	0.1	2.36×10^{10}				
PLA/PBAT/D03/O5	157	10^{-7}	0.1	1.57×10^{10}	155	10^{-7}	0.1	1.55×10^{10}				
PLA/PBAT/D03/O7.5	108	10^{-7}	0.1	1.08×10^{10}	99	10^{-7}	0.1	9.90×10^9				
PLA/PBAT/D03/O10	50	10^{-7}	0.1	5.00×10^9	78	10^{-7}	0.1	7.80×10^9				
สูตร	ซ้ำที่ 3					ซ้ำที่ 4						
	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml
PLA/PBAT/D03/O0	308	10^{-7}	0.1	3.08×10^{10}	267	10^{-7}	0.1	2.67×10^{10}				
PLA/PBAT/D03/O2.5	225	10^{-7}	0.1	2.25×10^{10}	234	10^{-7}	0.1	2.34×10^{10}				
PLA/PBAT/D03/O5	154	10^{-7}	0.1	1.54×10^{10}	160	10^{-7}	0.1	1.60×10^{10}				
PLA/PBAT/D03/O7.5	117	10^{-7}	0.1	1.17×10^{10}	107	10^{-7}	0.1	1.07×10^{10}				
PLA/PBAT/D03/O10	47	10^{-7}	0.1	4.70×10^9	65	10^{-7}	0.1	6.50×10^9				

ตารางภาคผนวก ก. 17 สรุปค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มคอมพอสิตสูตรต่าง ๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *S. aureus*

สูตร	เฉลี่ย		ร้อยละการลดลงของแบคทีเรีย
	CFU/ml	S.D.	
PLA/PBAT/D03/O0	4.88×10^{10}	1.17×10^{10}	20.60
PLA/PBAT/D03/O2.5	2.11×10^{10}	2.60×10^9	65.68
PLA/PBAT/D03/O5	1.76×10^{10}	3.30×10^8	71.38
PLA/PBAT/D03/O7.5	1.25×10^{10}	3.30×10^8	79.60
PLA/PBAT/D03/O10	9.18×10^9	4.43×10^8	85.06

ตารางภาคผนวก ก. 18 สรุปค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มคอมพอสิตสูตรต่าง ๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *E. coli*

สูตร	เฉลี่ย		ร้อยละการลดลงของแบคทีเรีย
	CFU/ml	S.D.	
PLA/PBAT/D03/O0	2.93×10^{10}	3.87×10^9	12.20
PLA/PBAT/D03/O2.5	2.35×10^{10}	8.21×10^8	29.64
PLA/PBAT/D03/O5	1.57×10^{10}	2.65×10^8	53.14
PLA/PBAT/D03/O7.5	1.08×10^{10}	7.37×10^8	67.74
PLA/PBAT/D03/O10	6.00×10^9	1.44×10^9	82.04

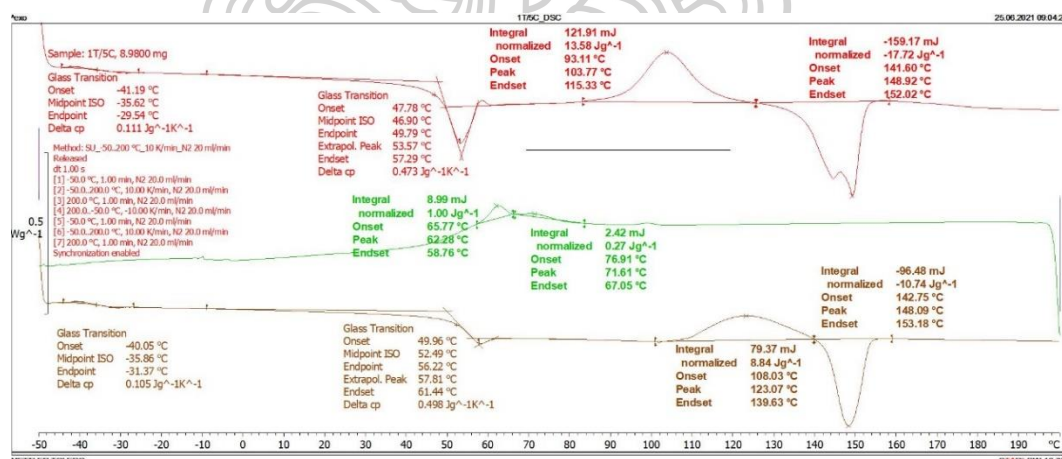
ภาคผนวก ก-4 สมบัติของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT เมื่อมีการเติม TiO_2 1 phr และน้ำมันหอมระเหยอบเชย 5 phr

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางภาคผนวก ก. 19 สรุปค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่มีการเติม TiO_2 1 phr และน้ำมันหอมระเหยอบเชย 5 phr

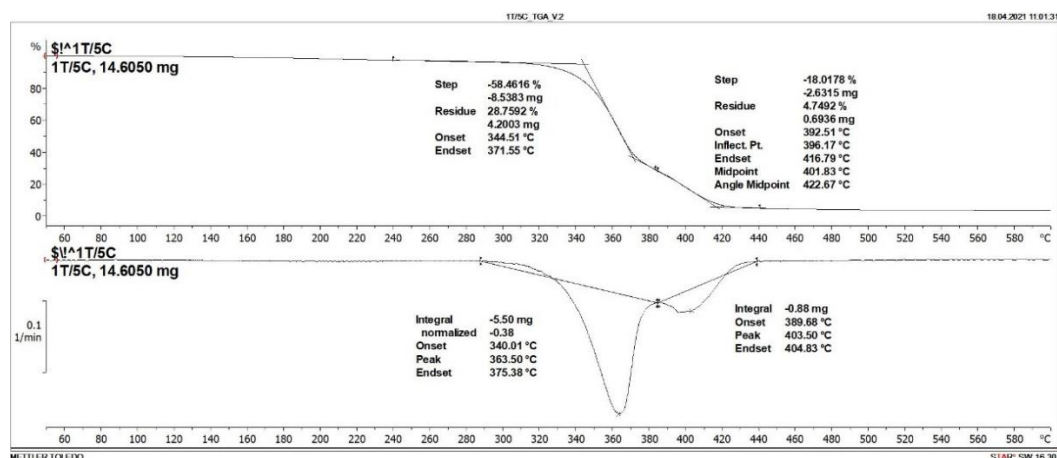
Sample	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PLA/PBAT/D03	1.47 ± 0.05^c	24.30 ± 4.68^b	$177.16 \pm 38.21^{b,c}$
PLA/PBAT/D03/T1	1.85 ± 0.06^a	33.05 ± 1.75^a	405.57 ± 17.89^a
PLA/PBAT/D03/O5	1.64 ± 0.08^b	23.24 ± 0.95^b	161.36 ± 53.60^c
PLA/PBAT/D03/T1/O5	1.66 ± 0.13^b	22.97 ± 3.13^b	222.21 ± 37.39^b

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



ภาคผนวก ก. 19 DSC Thermogram ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03/T1/O5

ผลการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA



ภาคผนวก ก. 20 TGA Thermogram ของฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03/T1/O5

ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

ตารางภาคผนวก ก. 20 อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Oxygen permeability; OP) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

Sample	OP (cm ³ /(m ² .day))
PLA/PBAT/D03	286.16
PLA/PBAT/D03/T1	386.67
PLA/PBAT/D03/O5	163.54
PLA/PBAT/D03/T1/O5	291.43

ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

ตารางภาคผนวก ก. 21 อัตราการซึมผ่านของแก๊สไอน้ำ (Water vapor transmission rate; WVTR) ของฟิล์มคอมพอสิต

Sample	WVTR (g/m ² .day)				
	1	2	3	เฉลี่ย	S.D.
PLA/PBAT/D03	80.1039	70.96104	94.44156	81.84	11.84
PLA/PBAT/D03/T1	84.36364	70.96104	94.44156	83.26	11.78
PLA/PBAT/D03/O5	49.66234	60.46753	51.22078	53.78	5.84
PLA/PBAT/D03/T1/O5	58.38961	78.75325	82.49351	73.21	12.97

ผลการทดสอบสมบัตการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

ตารางภาคผนวก ก. 22 ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบสมบัตการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มคอมพอสิตัสูตรต่าง ๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *S. aureus*

สุตร	ซ้ำที่ 1				ซ้ำที่ 2			
	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml
PLA/PBAT/D03	340	10^{-7}	0.1	3.40×10^{10}	333	10^{-7}	0.1	3.33×10^{10}
PLA/PBAT/D03/T1	191	10^{-7}	0.09	2.12×10^{10}	148	10^{-7}	0.09	1.64×10^{10}
PLA/PBAT/D03/O5	176	10^{-7}	0.1	1.76×10^{10}	172	10^{-7}	0.1	1.72×10^{10}
PLA/PBAT/D03/T1/O5	152	10^{-7}	0.1	1.52×10^{10}	143	10^{-7}	0.1	1.43×10^{10}
สุตร	ซ้ำที่ 3				ซ้ำที่ 4			
	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml
PLA/PBAT/D03	350	10^{-7}	0.1	3.50×10^{10}	313	10^{-7}	0.1	3.13×10^{10}
PLA/PBAT/D03/T1	170	10^{-7}	0.09	1.89×10^{10}	159	10^{-7}	0.09	1.77×10^{10}
PLA/PBAT/D03/O5	180	10^{-7}	0.1	1.80×10^{10}	175	10^{-7}	0.1	1.75×10^{10}
PLA/PBAT/D03/T1/O5	158	10^{-7}	0.1	2.22×10^{10}	162	10^{-7}	0.1	1.62×10^{10}

ตารางภาคผนวก ก. 23 ข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบสมบัติการต้านทานทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มคอมพอสิตผสมสูตรต่าง ๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *E. coli*

สูตร	ซ้ำที่ 1				ซ้ำที่ 2			
	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml
PLA/PBAT/D03	275	10^{-7}	0.1	2.75×10^{10}	267	10^{-7}	0.1	2.67×10^{10}
PLA/PBAT/D03/T1	184	10^{-7}	0.1	1.84×10^{10}	185	10^{-7}	0.1	1.85×10^{10}
PLA/PBAT/D03/O5	157	10^{-7}	0.1	1.57×10^{10}	155	10^{-7}	0.1	1.55×10^{10}
PLA/PBAT/D03/T1/O5	64	10^{-7}	0.1	6.40×10^{10}	73	10^{-7}	0.1	7.30×10^9
สูตร	ซ้ำที่ 3				ซ้ำที่ 4			
	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวน โคโลนี	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml
PLA/PBAT/D03	254	10^{-7}	0.1	2.54×10^{10}	258	10^{-7}	0.1	2.58×10^{10}
PLA/PBAT/D03/T1	196	10^{-7}	0.1	1.96×10^{10}	176	10^{-7}	0.1	1.76×10^{10}
PLA/PBAT/D03/O5	154	10^{-7}	0.1	1.54×10^{10}	160	10^{-7}	0.1	1.60×10^{10}
PLA/PBAT/D03/T1/O5	72	10^{-7}	0.1	7.20×10^9	82	10^{-7}	0.1	8.20×10^9

ตารางภาคผนวก ก. 24 สรุปค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มคอมพอสิตสูตรต่าง ๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *S. aureus*

สูตร	เฉลี่ย		ร้อยละการลดลงของแบคทีเรีย
	CFU/ml	S.D.	
PLA/PBAT/D03	3.34×10^{10}	1.56×10^9	45.60
PLA/PBAT/D03/T1	1.86×10^{10}	2.04×10^9	69.78
PLA/PBAT/D03/O5	1.76×10^{10}	3.30×10^8	71.38
PLA/PBAT/D03/T1/O5	1.54×10^{10}	8.26×10^8	74.96

ตารางภาคผนวก ก. 25 สรุปค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มคอมพอสิตสูตรต่าง ๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *E. coli*

สูตร	เฉลี่ย		ร้อยละการลดลงของแบคทีเรีย
	CFU/ml	S.D.	
PLA/PBAT/D03	2.64×10^{10}	9.40×10^8	21.11
PLA/PBAT/D03/T1	1.85×10^{10}	8.22×10^8	44.54
PLA/PBAT/D03/O5	1.57×10^{10}	2.65×10^8	53.14
PLA/PBAT/D03/T1/O5	7.28×10^9	7.37×10^8	78.22

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างการคำนวณ

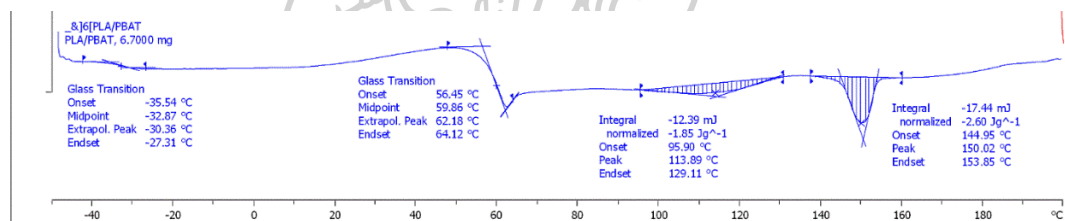
ข-1 การคำนวณหาปริมาณผลึก (degree of crystallinity; %X_c)

$$\%X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0 \times w} \times 100$$

โดย ΔH_m คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (จูล/กรัม), ΔH_m^0 คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวผลึก 100 เปอร์เซ็นต์ (PLA เท่ากับ 93 จูล/กรัม, PBAT เท่ากับ 114 จูล/กรัม), w คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ PLA และ PBAT

ตัวอย่างการคำนวณ

หาปริมาณผลึกของ PLA และ PBAT ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT จากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง



Lab: METTLER

STAR[®] SW 10.00

ภาพประกอบการคำนวณปริมาณผลึกของ PLA และ PBAT ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

PLA : $\Delta H_m = 2.60 \text{ J/g}$, $\Delta H_m^0 = 93 \text{ J/g}$ และ $w = 0.7$

PBAT : $\Delta H_m = 1.85 \text{ J/g}$, $\Delta H_m^0 = 114 \text{ J/g}$ และ $w = 0.3$

$$\%X_c(\text{PLA}) = \frac{2.60}{93 \times 0.7} \times 100 = 3.99\%$$

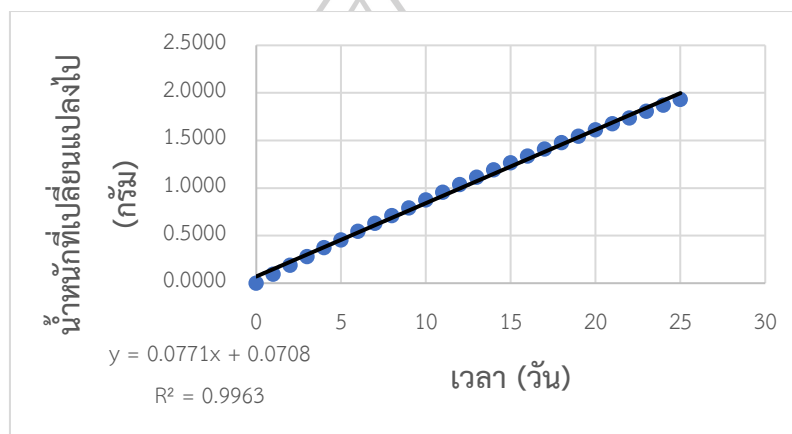
$$\%X_c(\text{PBAT}) = \frac{1.85}{114 \times 0.3} \times 100 = 5.41\%$$

ข-2 การคำนวณอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor permeability)

การคำนวณอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ทำโดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปและเวลา จากนั้นนำค่าความชันจากกราฟดังกล่าวไปคำนวณค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ดังสมการ

$$\text{WVTR} \left(\frac{\text{g}}{\text{m}^2} \cdot \text{day} \right) = \frac{\text{slope}}{\text{Area} (\text{m}^2)}$$

ตัวอย่างการคำนวณ



Slope = 0.0771

$$\text{WVTR} \left(\frac{\text{g}}{\text{m}^2} \cdot \text{day} \right) = \frac{0.0771}{0.0009625 \text{ m}^2} = 80.10 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \cdot \text{day}$$

ข-3 การคำนวณปริมาณเชื้อแบคทีเรียและเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย

$$\text{ปริมาณเชื้อแบคทีเรีย (CFU/ml)} = \frac{\text{จำนวนโคโลนีที่นับได้บนจานเพาะเชื้อ} \times \text{Dilution factor}}{\text{ปริมาตรของแบคทีเรียที่นำมาเลี้ยงบนอาหาร (ml)}}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย (\%Reduction)} = \frac{A-B}{A} \times 100$$

โดย A คือ ปริมาณเชื้อแบคทีเรีย (CFU/ml) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมสารต้านเชื้อแบคทีเรีย

B คือ ปริมาณเชื้อแบคทีเรีย (CFU/ml) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมสารต้านเชื้อแบคทีเรีย

ตัวอย่างการคำนวณ

ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติม TiO_2 0.25 phr (ไม่มีการฉายรังสียูวี) ต่อแบคทีเรีย *E.coli* (ซ้ำที่ 1) ซึ่งจากการทดลองพบจำนวนโคโลนีเท่ากับ 254 โคโลนี ปริมาตรของเชื้อแบคทีเรีย 0.1 ml ที่ความเข้มข้น 10^{-7}

$$\text{ปริมาณเชื้อแบคทีเรีย (CFU/ml)} = \frac{254 \times 10^{-7}}{0.1} = 2.54 \times 10^{10} \text{ CFU/ml}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT/D03 ที่ไม่มีการเติมสารยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (A = 3.15×10^{10} CFU/ml)

ฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03 ที่มีการเติม TiO_2 0.25 phr (B = 2.49×10^{10} CFU/ml)

$$\% \text{Reduction} = \frac{(3.15 \times 10^{10}) - (2.49 \times 10^{10})}{(3.15 \times 10^{10})} \times 100 = 20.83 \%$$

ข-4 การคำนวณเวลาที่ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อวางชิ้นงานไว้กลางแจ้ง

สำหรับฟิล์มคอมพอสิต PLA/PBAT/D03/T1/O5 ซึ่งผ่านการเร่งสภาวะด้วยเครื่อง Accelerated weathering aging พบว่าชิ้นงานเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงที่ Cycle 3 (24 ชั่วโมง) โดยสามารถประมาณเวลาจริงที่ชิ้นงานเกิดความเสียหาย เมื่อวางชิ้นงานไว้กลางแจ้งที่รัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ดังนี้

โดยชิ้นงานที่ผ่าน QUV เป็นเวลา 83 วัน เปรียบเทียบได้กับการวางชิ้นงานไว้กลางแจ้งที่รัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นเวลา 1 ปี

$$\begin{aligned} \text{เวลาจริงที่ชิ้นงานเกิดความเสียหาย} &= \frac{\text{ปริมาณเวลา QUV} \times \text{ปริมาณเวลาที่รัฐฟลอริดา 1 ปี}}{83 \text{ วัน}} \\ &= \frac{24 \text{ hr} \times 8765 \text{ hr}}{1992 \text{ hr}} = 105.6 \text{ hr} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ค.

การนำเสนอผลงานวิจัย

ภาคผนวก ค-1 การประชุมวิชาการ The 5th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology

-บันทึกการรายงานการประชุม (Proceeding)


**The 5th International Conference
on Smart Materials and Nanotechnology**
1st - 4th December 2020, Pattaya, Thailand
@Nongnooch Garden, Pattaya

The American Ceramic Society
www.ceramics.org
CHAPTER
Thailand

SMART MAT @2020

i-STEM

E-PROCEEDING BOOK

Co-Host:



Co-Organizer:

Professor Emeritus.com

Sponsor:



Website: www.smartmat-2020.com

E-mail: smartmat.thailand@gmail.com

ISBN (e-book) :978-616-582-261-9



Properties of TiO₂ incorporated poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) active packaging films and their antimicrobial efficiency

Chatkamol Klaychanpong¹, Bussarin Ksapabutr¹, Manop Panapoy¹ and Nattawut Chaiyut^{1*}

¹Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Sanam Chandra Palace Campus, Nakhon Pathom, Thailand

*email: chaiyut_n@su.ac.th

Abstract. Active packaging films of poly (lactic acid) (PLA)/poly (butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) incorporated with titanium dioxide (TiO₂) were fabricated and used as antimicrobial films. PLA and PBAT pellets and different amounts of TiO₂ (0, 0.25, 0.5, 1, and 2 phr) were melt mixed in a twin screw extruder and subsequently formed film by a cast film extruder. The obtained films with different TiO₂ contents were characterized by scanning electron microscope, differential scanning calorimeter, universal testing machine, and antimicrobial test. The cross-sectional SEM micrographs of all film formulas revealed that TiO₂ particles were uniformly distributed in the polymer matrix. It was found that the films became whiter and opaquer at higher TiO₂ concentration. The T_g of the films was almost intact despite the increase of TiO₂ content while the percentage of crystallinity increased significantly. Young's modulus and tensile strength of the films showed maxima at 0.5 phr of TiO₂, whereas elongation at break showed the highest value at 1 phr. All studied films were exposed to UV-A at various exposure times before the antimicrobial test. The results showed that the films had a higher antimicrobial efficiency against Gram-positive, Gram-negative bacteria as well as fungi when the films presented more TiO₂ content and took longer exposure time.

Keywords: Active packaging films, Titanium dioxide, UV exposure, Antimicrobial efficiency

Introduction

The packaging is widely used in the food and postharvest industries, but spoilage and pathogenic microorganism are concerned because it caused postharvest losses and quality deterioration of fresh products [1]. Environmental problems derived from petroleum-based packaging waste have been globally concerned, leading to the world community conducting a waste management system to resolve them. Moreover, the utilization of bio-based polymers instead of petroleum-based ones has also been getting attention as one of the alternative ways for the problems [2]. One of the most bio-based polymers that received attention from several research were poly(lactic acid) (PLA) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), which are outstanding in biodegradability in a few weeks under specific condition [3, 4]. The distinctive point of PLA is transparency, including high strength and modulus; therefore, such polymer has usefulness in packaging applications. However, the drawback of PLA is brittleness, which restricts widespread usage, especially in the packaging film. One alternative method to resolve the disadvantage of PLA is to blend with the ductile polymer, which is PBAT. As well known, PBAT is a biodegradable plastic which high ductility and flexibility. Therefore, it is suitable selectness for blending with PLA [3].

Titanium dioxide (TiO₂) is a metal oxide semiconductor which is an efficient photocatalyst and is useful as an antimicrobial agent [5]. TiO₂ is an attractive photocatalyst because it is chemically stable, non-toxic, and Generally Recognized as Safe (GRAS) [6]. Reactive oxygen species (ROS), which including superoxide ions (O₂⁻) and hydroxyl radical (OH•) are generated



when TiO₂ is exposed to ultraviolet (UV) light, followed by the reaction of ROS with polyunsaturated phospholipid in the cell membrane of microorganisms resulting in cytoplasmic leakage which subsequently cause cell death [6-8].

The objectives of this study were to develop antimicrobial packaging PLA/PBAT blend films incorporated with TiO₂ to determine the antimicrobial activity of the films against Gram-positive (*S. aureus*) and Gram-negative (*E. coli*) bacteria and also fungi. Moreover, the effect of the addition of TiO₂ on the morphology, thermal, and mechanical properties of the films was also investigated.

Experimental

Materials. Poly(lactic acid) (PLA) 2003D was purchased from BC polymers marketing Co., LTD. Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) Ecoflex F Blend C1200 was supplied by POLYMATS Co., LTD. Dicumyl peroxide (DCP, impurity 98%) and Titanium dioxide (TiO₂ nanopowder, 21 nm, impurity ≤ 99.5%) was purchased from SIGMA-ALDRICH, Co., LTD.

Composite film preparation. PLA/PBAT/TiO₂ masterbatch was prepared. Firstly, PLA and PBAT at a blend ratio of 70/30 by weight were dissolved in dichloromethane. At the same time, TiO₂ nanopowder was also dispersed in dichloromethane using an ultrasonic probe. Then the TiO₂ suspension was added into the PLA/PBAT solution, stirred with a mechanical stirrer, and subsequently poured the final suspension into the glass tray then left to dry. The masterbatch sheet was obtained and then cut into small pieces. A certain amount of masterbatch and pellets of 70/30 by weight of PLA/PBAT together with DCP fixed at 0.03 phr were melted mixed in a twin screw extruder to obtain compounds with 0, 0.25, 0.5, 1 and 2 phr of TiO₂ (designated as 0T, 0.25T, 0.5T, 1T and 2T respectively). Composite films with different TiO₂ amounts were fabricated by a cast film extruder. The thickness of the films was in the range of 70 - 120 microns.

Characterization and testing

Scanning electron microscopy. SEM (Mire3 TESCAN) was used to study the morphology of prepared films by immersing them in liquid nitrogen and then fracturing them. The fractured surface was coated with a Pd/Au before observation.

Differential scanning calorimetry. The thermal properties of the films were studied by differential scanning calorimeter (DSC) (TGA/DSC1, Mettler Toledo). The samples were carried out from -50 – 200°C at 10°C/min under a nitrogen atmosphere.

Mechanical properties. Mechanical properties of the films were measured by a universal testing machine (Instron Corp.) following the ASTM D882 at a crosshead speed of 12.5 mm/min. The films were cut into strips with a dimension of 10 x 2.5 cm².

Antimicrobial activity tests. All composite films with various TiO₂ contents were exposed to UV-A at different periods (0-3 hrs) and subsequently tested antimicrobials against Gram-negative bacteria (*Escherichia coli*), Gram-positive bacteria (*Staphylococcus aureus*) by the shake flask method, and fungi by putting a strawberry into a sterilized sealed bag obtained from the films and storing it at 25°C. Morphological changes were recorded by taking photographs at different storing times (0-7 days).



when TiO₂ is exposed to ultraviolet (UV) light, followed by the reaction of ROS with polyunsaturated phospholipid in the cell membrane of microorganisms resulting in cytoplasmic leakage which subsequently cause cell death [6-8].

The objectives of this study were to develop antimicrobial packaging PLA/PBAT blend films incorporated with TiO₂ to determine the antimicrobial activity of the films against Gram-positive (*S. aureus*) and Gram-negative (*E. coli*) bacteria and also fungi. Moreover, the effect of the addition of TiO₂ on the morphology, thermal, and mechanical properties of the films was also investigated.

Experimental

Materials. Poly(lactic acid) (PLA) 2003D was purchased from BC polymers marketing Co., LTD. Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) Ecoflex F Blend C1200 was supplied by POLYMATS Co., LTD. Dicumyl peroxide (DCP, impurity 98%) and Titanium dioxide (TiO₂ nanopowder, 21 nm, impurity ≤ 99.5%) was purchased from SIGMA-ALDRICH, Co., LTD.

Composite film preparation. PLA/PBAT/TiO₂ masterbatch was prepared. Firstly, PLA and PBAT at a blend ratio of 70/30 by weight were dissolved in dichloromethane. At the same time, TiO₂ nanopowder was also dispersed in dichloromethane using an ultrasonic probe. Then the TiO₂ suspension was added into the PLA/PBAT solution, stirred with a mechanical stirrer, and subsequently poured the final suspension into the glass tray then left to dry. The masterbatch sheet was obtained and then cut into small pieces. A certain amount of masterbatch and pellets of 70/30 by weight of PLA/PBAT together with DCP fixed at 0.03 phr were melted mixed in a twin screw extruder to obtain compounds with 0, 0.25, 0.5, 1 and 2 phr of TiO₂ (designated as 0T, 0.25T, 0.5T, 1T and 2T respectively). Composite films with different TiO₂ amounts were fabricated by a cast film extruder. The thickness of the films was in the range of 70 - 120 microns.

Characterization and testing

Scanning electron microscopy. SEM (Mire3 TESCAN) was used to study the morphology of prepared films by immersing them in liquid nitrogen and then fracturing them. The fractured surface was coated with a Pd/Au before observation.

Differential scanning calorimetry. The thermal properties of the films were studied by differential scanning calorimeter (DSC) (TGA/DSC1, Mettler Toledo). The samples were carried out from -50 – 200°C at 10°C/min under a nitrogen atmosphere.

Mechanical properties. Mechanical properties of the films were measured by a universal testing machine (Instron Corp.) following the ASTM D882 at a crosshead speed of 12.5 mm/min. The films were cut into strips with a dimension of 10 x 2.5 cm².

Antimicrobial activity tests. All composite films with various TiO₂ contents were exposed to UV-A at different periods (0-3 hrs) and subsequently tested antimicrobials against Gram-negative bacteria (*Escherichia coli*), Gram-positive bacteria (*Staphylococcus aureus*) by the shake flask method, and fungi by putting a strawberry into a sterilized sealed bag obtained from the films and storing it at 25°C. Morphological changes were recorded by taking photographs at different storing times (0-7 days).

Table 1 Thermal properties of PLA/PBAT/TiO₂ films at different TiO₂ concentrations.

TiO ₂ (phr)	T _g (°C)		T _m (°C)		X _c (%)	
	PLA	PBAT	PLA	PBAT	PLA	PBAT
0	58.92	-32.16	150.37	113.06	2.89	8.04
0.25	58.39	-35.34	150.95	109.69	7.51	4.69
0.5	58.55	-33.89	151.61	110.86	11.47	6.00
1	58.73	-35.37	151.77	110.86	12.78	5.38
2	58.40	-34.78	151.41	109.03	15.88	7.04

Mechanical properties

Tensile properties of the composite films containing various TiO₂ concentrations were shown in figure 2.

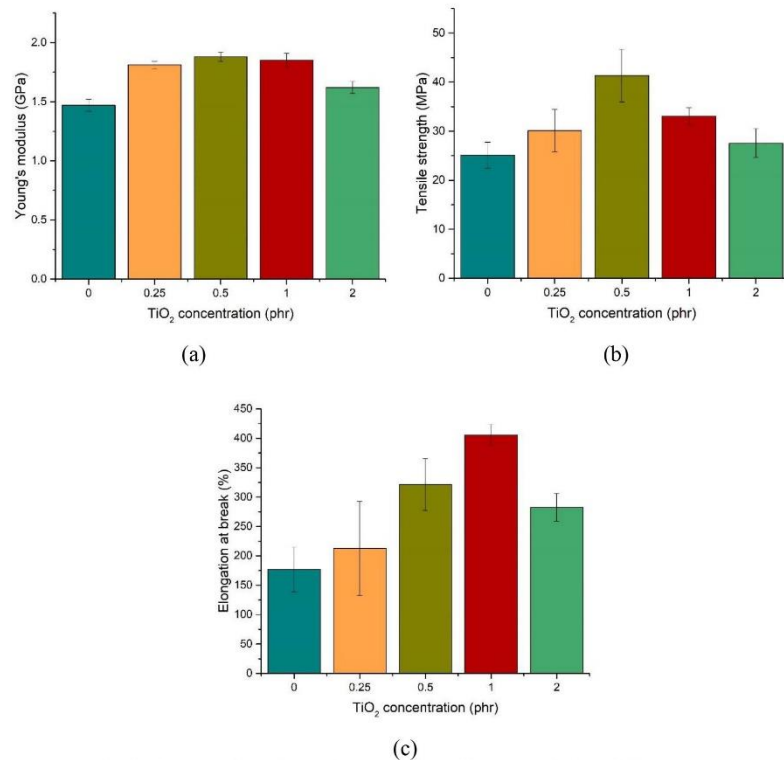


Figure 2. Mechanical properties of PLA/PBAT/ TiO₂ films containing different concentrations of TiO₂: (a) Young's modulus, (b) tensile strength, and (c) elongation at break.

PLA/PBAT blend film showed Young's modulus, tensile strength and elongation at break at 1.47 GPa, 25.10 MPa and 177.16 %, respectively. When the higher content of TiO₂ was added, Young's modulus, tensile strength and elongation at break reached the maxima at 1.88 GPa, 41.32 MPa and 405.57 %, respectively. However, these properties were decreasing when the content of TiO₂ was beyond 0.5 phr for Young's modulus and tensile strength, and 1 phr for elongation at break. The decrease in these tensile properties when TiO₂ was added higher than a specific amount could be due to the agglomeration of TiO₂ particles, and interfacial adhesion between particles and the polymer matrix became worse, weakening the load transfer efficiency in the composite films [4].

Antimicrobial activity tests

The antimicrobial activity of PLA/PBAT films incorporated with different TiO₂ concentrations was performed against bacteria and fungi. All films were firstly exposed to UV-A at various exposure times. Figure 3 showed the antibacterial efficiency of TiO₂ at various exposure times. The films exhibited higher antibacterial activity when they presented higher TiO₂ concentration [6]. Furthermore, by prolonging UV-A exposure time, the films performed better antibacterial efficiency. The film containing 2 phr of TiO₂ and exposed to UV-A for 3 hrs showed the highest antibacterial efficiency against *E. coli* and *S. aureus*, which was 50.32 and 72.32%, respectively. However, the results showed that PLA/PBAT films containing TiO₂ conducted antibacterial activity even without UV irradiation. It may be due to the inactivated TiO₂ antibacterial mechanism could be similar to Ag since Ag has a positive charge that can interact with negatively charged bacteria. Therefore, TiO₂ may potentially damage bacterial cells [9]. Another reason could be the existence of TiO₂ nanoparticles in films causing oxidative damage to bacteria since they can induce oxidative stress in non-irradiated conditions [10]. In addition, there is the effect of nanoparticle size; the smaller the particle size, the greater the antibacterial efficiency of TiO₂ [11].

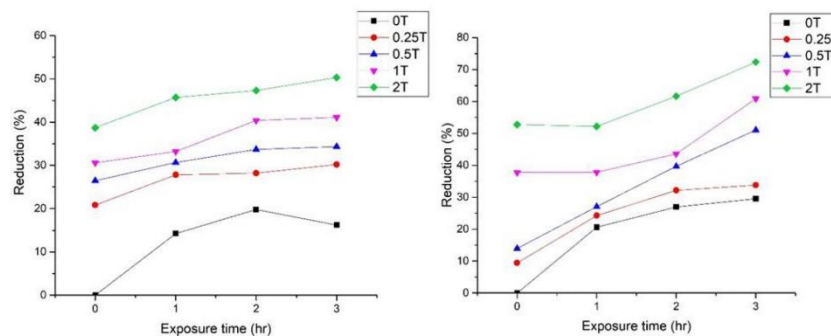


Figure 3. The reduction of *E. coli* (a) and *S. aureus* (b) after antibacterial test of PLA/PBAT/TiO₂ films containing different TiO₂ concentrations at different exposure times.

The pictures of fungi spreading on strawberries kept at 25°C in the sealed bag made from the films containing different TiO₂ concentrations from 0-7 days after exposing to UV-A for 0-3 hrs were demonstrated in Table 2-5. The spreading of fungi on the strawberries could indicate the antifungal efficiency of the films. The fungi took one day to appear on the strawberry kept in the bag without TiO₂ and UV-A exposure, which was the fastest growth in this test. Similar to the antibacterial, adding more TiO₂ and longer UV exposure time, the films exhibited better antifungal activity.

TiO₂ has been widely used as an efficient photocatalyst and an antimicrobial agent [6]. When it gets irradiated with UV light, electrons on the TiO₂ surface are promoted and transferred from the valence band to the conduction band and leave the positive holes (h⁺) in the valence band. These positive holes oxidize water and hydroxide ions (OH⁻) adsorbed on the TiO₂ surface to produce the reactive hydroxyl radicals (OH•). Moreover, the electrons in the conduction band reduce oxygen to produce superoxide ions (O₂⁻). These OH• and O₂⁻ are strong reactive oxygen species (ROS) which further react with polyunsaturated phospholipids of microbial cell membrane resulting in cytoplasmic leakage, which subsequently causes cell death [6, 8, 12]. This mechanism was illustrated in figure. 4.

The enhancement of antimicrobial efficiency of the films with an increase of TiO₂ concentration and UV exposure time could attribute to higher TiO₂ concentration and longer exposure time produces more ROS causing the death of microbial cells.

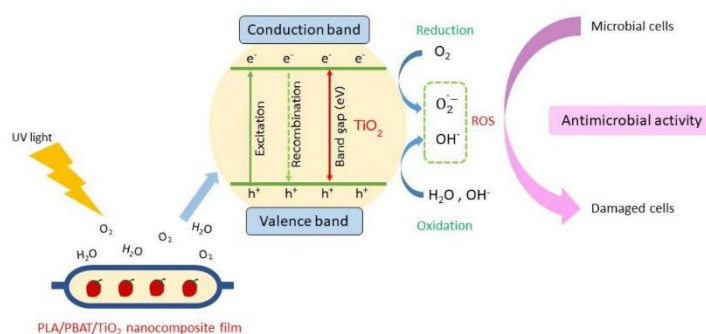


Figure 4. A schematic diagram of the antimicrobial mechanism of the PLA/PBAT/TiO₂ films.

Table 2 Morphology of strawberries at different periods without UV-A exposure.


























Day	Composite films				
	0T	0.25T	0.5T	1T	2T
0					
1					
3					
5					
7					

Table 3 Morphology of strawberries at different periods after UV-A exposure for 1 hr.


























Day	Composite films				
	0T	0.25T	0.5T	1T	2T
0					
1					
3					
5					
7					

Table 4 Morphology of strawberries at different periods after UV-A exposure for 2 hrs.



















































Day	Composite films				
	0T	0.25T	0.5T	1T	2T
0					
1					
3					
5					
7					

Table 5 Morphology of strawberries at different periods after UV-A exposure for 3 hrs.

Day	Composite films				
	0T	0.25T	0.5T	1T	2T
0					
1					
3					
5					
7					



Conclusions

Composite films of PLA/PBAT/TiO₂ containing TiO₂ in the range of 0-2 phr were prepared. TiO₂ particles uniformly dispersed in the PLA/PBAT blend matrix. Thermal properties of films were almost the same, except crystallinity increased with TiO₂ amount. An increase in TiO₂ concentration improved mechanical properties. However, the maximum value of each mechanical property of the films happened in a certain amount of TiO₂. These films satisfactorily performed antimicrobial activities against Gram-positive and Gram-negative bacteria and fungi. Based on the above results, PLA/PBAT/TiO₂ films can be, therefore, used as active packaging for extending shelf life of agricultural products.

References

- [1] M.L.V. de Chiara, S. Pal, A. Licciulli, M.L. Amodio, G. Colelli, Photocatalytic degradation of ethylene on mesoporous TiO₂/SiO₂ nanocomposites: Effects on the ripening of mature green tomatoes. *Biosystems Engineering*. 132 (2015) 61-70.
- [2] Patinya Kaewklin, Ubonrat Siripatrawan, Anawat Suwanagul, Youn Suk Lee, Active packaging from chitosan-titanium dioxide nanocomposite film for prolonging storage life of tomato fruit. *International Journal of Biological Macromolecules*. 112 (2018) 523-529.
- [3] Worasak Phetwarotai, Varapon Tanrattanakul, Neeranuch Phusunti, Synergistic effect of nucleation and compatibilization on the polylactide and poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend films. *Chinese Journal of Polymer Science*. 34 (2016) 1129-1140.
- [4] Carmen Fonseca, Almudena Ochoa, Maria Teresa Ulloa, Eduardo Alvarez, Daniel Canales, Paula A. Zapata, Poly(lactic acid)/TiO₂ nanocomposites as alternative biocidal and antifungal materials. *Material Science and Engineering C Materials for Biological Applications*. 57 (2015) 314-20.
- [5] Baofeng Lin, Yaguang Luo, Zi Teng, Boce Zhang, Bin Zhou, Qin Wang, Development of silver/titanium dioxide/chitosan adipate nanocomposite as an antibacterial coating for fruit storage. *LWT - Food Science and Technology*. 63 (2015) 1206-1213.
- [6] Ubonrat Siripatrawan, Patinya Kaewklin, Fabrication and characterization of chitosan-titanium dioxide nanocomposite film as ethylene scavenging and antimicrobial active food packaging. *Food Hydrocolloids*. 84 (2018) 125-134.
- [7] Murid Hussain, Samir Bensaid, Francesco Geobaldo, Guido Saracco, Nunzio Russo, Photocatalytic Degradation of Ethylene Emitted by Fruits with TiO₂ Nanoparticles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 50 (2011) 2536-2543.
- [8] Howard A. Foster, Iram B. Ditta, Sajnu Varghese, Alex Steele, Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: spectrum and mechanism of antimicrobial activity. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 90 (2011) 1847-68.
- [9] Indar Kustiningsih, Asep Ridwan, Devi Abriyani, Muhammad Syairazy, Teguh Kurniawan, Dhena Ria Barleany, Development of Chitosan-TiO₂ Nanocomposite for Packaging Film and its Ability to Inactivate Staphylococcus Aureus. *Oriental Journal of Chemistry*. (2019) 35(3) 1132-1137.
- [10] Ioanna-Georgia Athanasoulia, Maria Mikropoulou, Sofia Karapati, Petroula Tarantili, Christos Trapalis, Study of thermomechanical and antibacterial properties of TiO₂/Poly(lactic acid) nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*. (2018) 5(14) 27553-27562.
- [11] Walid Bahloul, Flavien Mélis., Véronique Bounor-Legaré, Philippe Cassagnau, Structural characterisation and antibacterial activity of PP/TiO₂ nanocomposites prepared by an in situ sol-gel method. *Materials Chemistry and Physics*. (2012) 134 399-406.

The 5th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology (SmartMat@2020)
1st-4th December 2020, Nongnooch Garden, Pattaya, Thailand



- [12] Xianliang Song, Yingying Li, Zhedong Wei, Shengying Ye, Dionysios D. Dionysiou, Synthesis of BiVO₄/P25 composites for the photocatalytic degradation of ethylene under visible light. *Chemical Engineering Journal*. 314 (2017) 443-452.





รายการอ้างอิง

1. MBA today. (2017) **Food Packaging Trend**. Accessed June 7. Available from: <https://news.mbamagazine.net/index.php/life/food/item/80-food-packaging-trend>.
2. Yottha Srithep, Thiptida Akkayasa. (2019). Effect of Polybutylene Adipate-Co-Terephthalate on Properties of Polylactide Microfibers Prepared by Electrospinning Process. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2019: p. 158-166.
3. Pihanana Lertsatitthanakorn, Krongkarn Montree., Jaruwan Bunjong, Benchawan Samruat, Sirinapa Kotchan, Antimicrobial Activities of Cinnamomum zeylanicum Blume Bark Essential Oil Thai Pharmaceutical and Health Science Journal, 2012. 7: p. 39-43.
4. Puntipa Pongsumpun, Satashi Iwamoto, Ubonrat Siripatrawan, Response surface methodology for optimization of cinnamon essential oil nanoemulsion with improved stability and antifungal activity. Ultrason Sonochem, 2020. 60: p. 104604.
5. Packaging Industrial Intelligence Unit. **Ethylene scavenger**. Accessed June 10. Available from: https://packaging.oie.go.th/new/admin_control_new/html-demo/file_technology/4367028159.pdf.
6. Phtic Perdo. (2010). **Active packaging**. Accessed June 10. Available from: <http://www.phtnet.org/2010/04/82/>.
7. Suchada Laohasilpsomjit. **Active packaging systems for dried tea**. (2018). Accessed June 10. Available from: http://kjna.ubru.ac.th/j_files/document/J1533027272.pdf.
8. Food network solution. **Active packaging**. Accessed June 10. Available from: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1887/active-packaging>.
9. รองศาสตราจารย์ ดร. สัจคม เตชะวงศ์เสถียร. (2542). **สรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยว**. ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

10. สายชล เกตุษา. (2006). "การบ่มผลไม้ให้สุก." The journal of the Royal Institute of Thailand
11. สำนักวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลการเกษตร กรมวิชาการเกษตร. (2557). **โรคผลไม้หลังการเก็บเกี่ยว**.
12. รศ. นิพนธ์ วิสารทานนท์. (2542). **โรคมะม่วง**. ภาควิชาโรคพืช คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
13. บริษัท ไดนามิค พันธุ์พืช จำกัด. **โรคแอนแทรกคโนสในมะม่วง**. เข้าถึงเมื่อ 7 มิถุนายน 2562. เข้าถึงได้จาก: <http://www.dynamicseeds.com/ดูบทความ-16706-โรคแอนแทรกคโนสในมะม่วง-credit-vanidakaset-com.html>.
14. Rahee Bui, Bireswar Sinha, Ph Sobita Devi, K. Dinesh, and R. K. Dilip. First report of *Lasiodiplodia theobromae* associated with stem-end rot of mango in Manipur, India. *Indian Phytopathology*, 2018. 71(4): p. 631-632.
15. วิลาส รัตนานุกูล. (2554) **พลาสติกชีวภาพ (Bioplastics)**. เข้าถึงเมื่อ 10 มิถุนายน 2562. เข้าถึงได้จาก: <http://biology.ipst.ac.th/?p=927>.
16. Polymer computer engineering 05. **พลาสติก PLA (polylactic acid)**. เข้าถึงเมื่อ 10 มิถุนายน 2562. เข้าถึงได้จาก: <https://enchemcom1po.wordpress.com/bioplasticsไปโอพลาสติก/พลาสติก-pla-polylactic-acid/>.
17. อมรรัตน์ เลิศวารสิริกุล. **Poly(lactic acid): Polyester from Renewable Resources**. 2554 เข้าถึงเมื่อ 10 มิถุนายน 2562. เข้าถึงได้จาก: https://kukr.lib.ku.ac.th/journal/ENGJ/search_detail/result/202999.
18. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, Polybutylene Adipate-co-Terephthalate, โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ.
19. Xiaojuan Wu, Liping Chen, Guoning Rao, Wanghua Chen, and Ruili Yin. Impacts of Thermal Inertia Factor on Adiabatic Decomposition of 40% Mass Content DCP in Ethyl Benzene. *Journal of Chemistry*, 2020. 2020: p. 1-8.
20. MERCK. **Dicumyl peroxide**. Accessed June 10. Available from: <https://www.sigmaaldrich.com/TH/en/product/aldrich/329541#productDetailSafetyRelatedDocs>.
21. กลุ่มวิจัยพฤกษศาสตร์และฟิสิกส์พันธุพืช สำนักคัมครองพันธุ์พืช กรมวิชาการเกษตร. (2561). **"พรรณไม้งามรอบอาคารฟิสิกส์พันธุพืชสิรินธร"**. กรมวิชาการเกษตร 4.

22. ฐานข้อมูลพืชผัก บทความเกษตร. **อบเชย**. เข้าถึงเมื่อ 10 มิถุนายน 2562. เข้าถึงได้จาก: <https://vegetweb.com/อบเชย-cinnamon-10สรรพคุณและลักษณะ/>.
23. Frontiers. **Use of essential oils to inhibit Alicyclobacillus acidoterrestris: a short overview of the literature**. Accessed June 10. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2011.00195/full>.
24. Panida Rattanapitigorn. Essential Oils from Plant Extracts and Theirs Application as Antimicrobial Agents in Food Products. Journal of Food Technology, Siam University, 2018. 2: p. 1-10.
25. Food Network Solution. **Cell wall**. Accessed June 10. Available from: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/4077/cell-wall-ผนังเซลล์>.
26. Siamchemi.com. **ไทเทเนียมไดออกไซด์และการใช้ประโยชน์**. เข้าถึงเมื่อ 10 มิถุนายน 2562. เข้าถึงได้จาก: <https://www.siamchemi.com/ไทเทเนียมไดออกไซด์/>.
27. Suvardhan Kanchi, Shakeel Ahmed. **Handbook of Bionanocomposites Green and Sustainable Materials**. Accessed June 10. Available from: <https://books.google.co.th/books?id=2QhpDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=th#v=onepage&q&f=false>.
28. ดร. นัตตา เวชชากุล. (2555). **ไทเทเนียมไดออกไซด์กับการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำ**. เข้าถึงเมื่อ 10 มิถุนายน 2562. เข้าถึงได้จาก: https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/269_25-30.pdf.
29. Antonella Marra, Sossio Cimmino, and Clara Silvestre. Effect of TiO₂ and ZnO on PLA degradation in various media. Advanced Material Science, 2017. 2(2): p. 1-8.
30. Xiao-hu Zhang, Hong-mei Yang, Yi-hu Song, and Qiang Zheng. Influence of crosslinking on physical properties of low density polyethylene. Chinese Journal of Polymer Science, 2012. 30(6): p. 837-844.
31. Manickam Jayakumar, Seenivasan Prabuseenivasan, Savarimuthu Ignacimuthu. In vitro antibacterial activity of some plant essential oils. BMC Complement Altern Med, 2006. 6: p. 39.
32. Jasim Ahmed, Mehrajfatema Zafar Mulla, and Yasir Ali Arfat. Thermo-mechanical, structural characterization and antibacterial performance of solvent casted polylactide/cinnamon oil composite films. Food Control, 2016. 69: p. 196-204.

33. Ubonrat Siripatrawan, Patinya Kaewklin. Fabrication and characterization of chitosan-titanium dioxide nanocomposite film as ethylene scavenging and antimicrobial active food packaging. *Food Hydrocolloids*, 2018. 84: p. 125-134.
34. LABTECH. **Cast film extruder**. Accessed June 10. Available from: <https://labtechusa.net/product-category/cast-film-and-co-ex/>.
35. ศูนย์ปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. **Universal Testing machine**. เข้าถึงเมื่อ 12 มิถุนายน 2564.
เข้าถึงได้จาก: https://www.sci.nu.ac.th/slcs/tools.php?tool_ID=43.
36. Yuchao Zhang, Piming Ma, Shihua Wang, Marshal Chen. In-situ compatibilization of poly(lactic acid) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends by using dicumyl peroxide as a free-radical initiator. *Polymer Degradation and Stability*, 2014. 102: p. 145-151.
37. SelectScience. **Thermogravimetric Analyzer**. Accessed June 10. Available from: <https://www.selectscience.net/products/tga+dsc-1---thermogravimetric-analyzer/?prodID=85803>.
38. AMETEK. **OTR Permeation Analyzer**. Accessed June 10. Available from: <https://www.ametekmocon.com/products/permeationanalyzers/otr-permeation-analyzers/ox-tran-2-22-series>.
39. Q-LAB. **QUV ACCELERATED WEATHERING TESTER**. Accessed June 10. Available from: <https://www.q-lab.com/products/quv-weathering-tester/quv>.
40. STEC Science Silpakorn university. **Field emission Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy**. Accessed June 10. Available from: <https://www.su-stec.com/scanning-electron-microscope-energy>.
41. Bara Scientific. **UV-VIS Spectrophotometer**. Accessed June 10. Available from: <https://www.barascientific.com/products/shimadzu/analytical/spectro/thai/UV/UV-1800.php>.
42. BIOBASE. **Vertical Laminar Flow Cabinet**. Accessed June 10. Available from: <https://www.biobase.cc/Vertical-Laminar-Flow-Cabinet-pd43089195.html>.
43. Global Sources. **Digital Fuzzy Control Autoclave**. Accessed June 10. Available from: <https://www.globalsources.com/Medical-sterilization/Sterilizer-1174328523p.htm#1174328523>.

44. Profilab24. **witeg Wisd Incubator WIG-32**. Accessed June 10. Available from: <https://profilab24.com/en/laboratory/incubators-drying-cabinets/witeg-wisd-incubator-wig-32>.
45. Phasawat Chaiwutthinan, Saowaroj Chuayjuljit, Sarinya Srasomsud, and Anyaporn Boonmahitthisud. Composites of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend with wood fiber and wollastonite: Physical properties, morphology, and biodegradability. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019. 136(21): p. 1-14.
46. Yun-Xuan Weng, Yu-Juan Jin, Qing-Yang Meng, Lei Wang, Min Zhang, and Yu-Zhong Wang. Biodegradation behavior of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), poly(lactic acid) (PLA), and their blend under soil conditions. *Polymer Testing*, 2013. 32(5): p. 918-926.
47. Dandan Wu, Anping Huang, Jie Fan, Renwei Xu, Peng Liu, Guangquan Li, and Shiyuan Yang. Effect of blending procedures and reactive compatibilizers on the properties of biodegradable poly(butylene adipate-co-terephthalate)/poly(lactic acid) blends. *Journal of Polymer Engineering*, 2021. 41(2): p. 95-108.
48. Rodion Kopitzky, Shen Su, Sengül Tolga, Stephan Kabasci. Polylactide (PLA) and Its Blends with Poly(butylene succinate) (PBS): A Brief Review. *Polymers (Basel)*, 2019. 11(7): p. 1-21.
49. Kazumasa Nomura and Paul Terwilliger. Self-dual Leonard pairs. *Special Matrices*, 2019. 7(1): p. 1-19.
50. Yixin Deng, Changyi Yu, Peangpatu Wongwiwattana, and Noreen L. Thomas. Optimising Ductility of Poly(Lactic Acid)/Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate) Blends Through Co-continuous Phase Morphology. *Journal of Polymers and the Environment*, 2018. 26(9): p. 3802-3816.
51. Takeshi Semba, Kazuo Kitagawa, Umaru Semo Ishiaku, and Hiroyuki Hamada. The effect of crosslinking on the mechanical properties of polylactic acid/polycaprolactone blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006. 101(3): p. 1816-1825.

52. Leon White, Youngmi Koo, Yeoheung Yun, and Jagannathan Sankar. TiO₂ Deposition on AZ31 Magnesium Alloy Using Plasma Electrolytic Oxidation. *Journal of Nanomaterials*, 2013. 2013: p. 1-8.
53. Sima Kashi, Rahul K. Gupta, Nhol Kao, S. Ali Hadigheh, and Sati N. Bhattacharya. Influence of graphene nanoplatelet incorporation and dispersion state on thermal, mechanical and electrical properties of biodegradable matrices. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018. 34(6): p. 1026-1034.
54. Abdellah Ajjji, Shan Wang, Shaoyun Guo, Chuanxi Xiong. Preparation of Microporous Polypropylene/Titanium Dioxide Composite Membranes with Enhanced Electrolyte Uptake Capability via Melt Extruding and Stretching. *Polymers (Basel)*, 2017. 9(3): p. 1-12.
55. Kangqiang Huang, Li Chen, Jieguan Deng, and Jianwen Xiong. Enhanced Visible-Light Photocatalytic Performance of Nanosized Anatase TiO₂ Doped with CdS Quantum Dots for Cancer-Cell Treatment. *Journal of Nanomaterials*, 2012. 2012: p. 1-12.
56. Aslam Farooq, Muhammad Atif, Amanullah Fatehmulla, Syedmansoor Ali. Photovoltaic and Impedance Spectroscopy Study of Screen-Printed TiO₂ Based CdS Quantum Dot Sensitized Solar Cells. *Materials (Basel)*, 2015. 8(1): p. 355-367.
57. Akbar Vejdani, Seyed Mahdi Ojagh, Afshin Adeli, and Mehdi Abdollahi. Effect of TiO₂ nanoparticles on the physico-mechanical and ultraviolet light barrier properties of fish gelatin/agar bilayer film. *LWT - Food Science and Technology*, 2016. 71: p. 88-95.
58. Shaoyun Wang, JJ. Zhou, Sethu Gunasekaran. Preparation and characterization of whey protein film incorporated with TiO₂ nanoparticles. *J Food Sci*, 2009. 74(7): p. N50-6.
59. Kiran Gupta, R.P. Singh, Ashutosh Pandey, Anjana Pandey. Photocatalytic antibacterial performance of TiO₂ and Ag-doped TiO₂ against *S. aureus*, *P. aeruginosa* and *E. coli*. *Beilstein J Nanotechnol*, 2013. 4: p. 345-51.
60. Ram Jeewan Sengwa, Shobhna Choudhary, and Priyanka Dhatarwal. Nonlinear optical and dielectric properties of TiO₂ nanoparticles incorporated PEO/PVP

- blend matrix based multifunctional polymer nanocomposites. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019. 30(13): p. 12275-12294.
61. Ram Jeewan Sengwa and Priyanka Dhatarwal. Polymer nanocomposites comprising PMMA matrix and ZnO, SnO₂, and TiO₂ nanofillers: A comparative study of structural, optical, and dielectric properties for multifunctional technological applications. *Optical Materials*, 2021. 113: p. 1-12.
 62. Vedrana Lovinčić Milovanović, Ivana Hajdinjak, Ivona Lovriša, and Domagoj Vrsaljko. The influence of the dispersed phase on the morphology, mechanical and thermal properties of PLA/PE-LD and PLA/PE-HD polymer blends and their nanocomposites with TiO₂ and CaCO₃. *Polymer Engineering & Science*, 2019. 59(7): p. 1395-1408.
 63. Ioanna-Georgia Athanasoulia, Maria Mikropoulou, Sofia Karapati, Petroula Tarantili, and Christos Trapalis. Study of thermomechanical and antibacterial properties of TiO₂/Poly(lactic acid) nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*, 2018. 5(14): p. 27553-27562.
 64. Almudena Ochoa Carmen Fonseca, Maria Teresa Ulloa, Eduardo Alvarez, Daniel Canales, Paula A. Zapata. Poly(lactic acid)/TiO₂ nanocomposites as alternative biocidal and antifungal materials. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2015. 57: p. 314-20.
 65. Worasak Phetwarotai, Varaporn Tanrattanakul, and Neeranuch Phusunti. Mechanical characteristics and thermal behaviours of polylactide blend films: influence of nucleating agent and poly(butylene adipate-co-terephthalate). *Plastics, Rubber and Composites*, 2016. 45(8): p. 333-345.
 66. Worasak Phetwarotai, Varaporn Tanrattanakul, and Neeranuch Phusunti. Synergistic effect of nucleation and compatibilization on the polylactide and poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend films. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2016. 34(9): p. 1129-1140.
 67. Howard A. Foster, Iram B. Ditta, Sajnu Varghese, and Alex Steele. Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: spectrum and mechanism of antimicrobial activity. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2011. 90(6): p. 1847-68.

68. Xianliang Song, Yingying Li, Zhedong Wei, Shengying Ye, and Dionysios D. Dionysiou. Synthesis of BiVO₄/P25 composites for the photocatalytic degradation of ethylene under visible light. *Chemical Engineering Journal*, 2017. 314: p. 443-452.
69. Namrata Pathak, Oluwafemi J. Caleb, Martin Geyer, Werner B. Herppich, Cornelia Rauh, and Pramod V. Mahajan. Photocatalytic and Photochemical Oxidation of Ethylene: Potential for Storage of Fresh Produce—a Review. *Food and Bioprocess Technology*, 2017. 10(6): p. 982-1001.
70. Chamorn Maneerat and Yasuyoshi Hayata. Antifungal activity of TiO₂ photocatalysis against *Penicillium expansum* in vitro and in fruit tests. *Int J Food Microbiol*, 2006. 107(2): p. 99-103.
71. Mohammed Zorah, Izan Roshawaty Mustapa, Norlinda Daud, J. H. Nahida, N. A. S. Sudin, A. A. Majhool, and Ebrahim Mahmoudi. Improvement Thermomechanical Properties of Polylactic Acid via Titania Nanofillers Reinforcement. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2020. 70(1): p. 97-111.
72. Norio Nakayama and Toyoharu Hayashi. Preparation and characterization of poly(L-lactic acid)/TiO₂ nanoparticle nanocomposite films with high transparency and efficient photodegradability. *Polymer Degradation and Stability*, 2007. 92(7): p. 1255-1264.
73. Panitee Suwanamornlert, Noppadon Kerddonfag, Amporn Sane, Wannee Chinsirikul, Weibiao Zhou, and Vanee Chonhenchob. Poly(lactic acid)/poly(butylene-succinate-co-adipate) (PLA/PBSA) blend films containing thymol as alternative to synthetic preservatives for active packaging of bread. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020. 25.
74. Mónica Hernández-López, Zormy Nacary Correa-Pacheco, Silvia Bautista-Baños, Leonor Zavaleta-Avejar, José Jesús Benítez-Jiménez, Marcos Antonio Sabino-Gutiérrez, and Pedro Ortega-Gudiño. Bio-based composite fibers from pine essential oil and PLA/PBAT polymer blend. Morphological, physicochemical, thermal and mechanical characterization. *Materials Chemistry and Physics*, 2019. 234: p. 345-353.

75. Nattakarn Yangcheepyuenyoodee. (2017). "Development of antibacterial food packaging films from polymer blend between poly(butylene succinate) and poly(butylene adipate-co-terephthalate)." Master degree of Polymer Science and Engineering, Faculty of engineering and industrial technology, Silpakorn university.
76. Wenwen Chen, Chenze Qi, Yao Li, and Hongyu Tao. The degradation investigation of biodegradable PLA/PBAT blend: Thermal stability, mechanical properties and PALS analysis. *Radiation Physics and Chemistry*, 2021. 180.
77. Kun Feng, Peng Wen, Huan Yang, Ning Li, Wen Y. Lou, Min H. Zong, and Hong Wu. Enhancement of the antimicrobial activity of cinnamon essential oil-loaded electrospun nanofilm by the incorporation of lysozyme. *RSC Advances*, 2017. 7(3): p. 1572-1580.
78. Monika Strasakova, Martina Pummerova, Kateryna Filatova, and Vladimir Sedlarik. Immobilization of Caraway Essential Oil in a Polypropylene Matrix for Antimicrobial Modification of a Polymeric Surface. *Polymers (Basel)*, 2021. 13(6).
79. Nor Azowa Ibrahim, V. S. Giita Silverajah, Wan Md Zin Wan Yunus, Hazimah Abu Hassan, Chieng Buong Woei. A comparative study on the mechanical, thermal and morphological characterization of poly(lactic acid)/epoxidized Palm Oil blend. *Int J Mol Sci*, 2012. 13(5): p. 5878-98.
80. Paula Judith, Pérez Espitia, Wen-Xian Du, Roberto de Jesús Avena-Bustillos, Nilda de Fátima Ferreira Soares, and Tara H. McHugh. Edible films from pectin: Physical-mechanical and antimicrobial properties - A review. *Food Hydrocolloids*, 2014. 35: p. 287-296.
81. Wei Li, Kewang Zheng, Hujian Chen, Shirong Feng, Wei Wang, and Caiqin Qin. Influence of Nano Titanium Dioxide and Clove Oil on Chitosan-Starch Film Characteristics. *Polymers (Basel)*, 2019. 11(9).
82. Shen Su, Mona Duhme, and Rodion Kopitzky. Uncompatibilized PBAT/PLA Blends: Manufacturability, Miscibility and Properties. *Materials (Basel)*, 2020. 13(21): p. 1-17.
83. Arianna Pietrosanto, Paola Scarfato, Luciano Di Maio, Maria Rossella Nobile, and Loredana Incarnato. Evaluation of the Suitability of Poly(Lactide)/Poly(Butylene-

- Adipate-co-Terephthalate) Blown Films for Chilled and Frozen Food Packaging Applications. *Polymers (Basel)*, 2020. 12(4).
84. Zhenya Tang, Fangling Fan, Chunli Fan, Kai Jiang, and Yuyue Qin. The Performance Changes and Migration Behavior of PLA/Nano-TiO₂ Composite Film by High-Pressure Treatment in Ethanol Solution. *Polymers (Basel)*, 2020. 12(2): p. 1-14.
85. Mahmood Alizadeh-Sani, Arezou Khezerlou, and Ali Ehsani. Fabrication and characterization of the bionanocomposite film based on whey protein biopolymer loaded with TiO₂ nanoparticles, cellulose nanofibers and rosemary essential oil. *Industrial Crops and Products*, 2018. 124: p. 300-315.
86. Esfahani Arezoo, Ehsani Mohammadreza, Mizani Maryam, and Mohammadi NafchiAbdorreza. The synergistic effects of cinnamon essential oil and nano TiO₂ on antimicrobial and functional properties of sago starch films. *Int J Biol Macromol*, 2020. 157: p. 743-751.
87. Roberto Scaffaro, Andrea Maio, Michele Gammino, and Francesco Paolo La Mantia. Effect of an organoclay on the photochemical transformations of a PBAT/PLA blend and morpho-chemical features of crosslinked networks. *Polymer Degradation and Stability*, 2021. 187.
88. Roberto Scaffaro, Andrea Maio, Michele Gammino, and Francesco Paolo La Mantia. Biodegradation Assessment of Poly (Lactic Acid) Filled with Functionalized Titania Nanoparticles (PLA/TiO₂) under Compost Conditions. *Nanoscale Res Lett*, 2019. 14(1): p. 56.
89. hjunkel-thailand. **How many hours in a QUV Weathering Tester equals a year of outdoor exposure?** Accessed June 10. Available from: <https://www.hjunkel-thailand.com/17751667/how-many-hours-in-a-quv-weathering-tester-equals-a-year-of-outdoor-exposure?>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ฉัตรกมล คล้ายจันทร์พงษ์
วัน เดือน ปี เกิด	17 ธันวาคม 2538
สถานที่เกิด	จังหวัดนครปฐม
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ปีโตะเคมีและวัสดุพอลิเมอร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	222/70 ม.6 ต.พลูตาหลวง อ.สัตหีบ จ.ชลบุรี 20180

