การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มเสริมองค์ประกอบพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท สำหรับยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้

โดย
นางสาวณัฐนรี อาศนสุวรรณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มเสริมองค์ประกอบพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท สำหรับยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้

โดย

นางสาวณัฐนรี อาศนสุวรรณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) BIOCOMPOSITES FILMS FOR EXTENDED SHELF-LIFE OF FRUITS

By

MISS Natnaree ARSSANASUWAN

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 2020

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มเสริมองค์ประกอบพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท สำหรับยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้
โดย	ณัฐนรี อาศนสุวรรณ์
สาขาวิชา	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกูล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร)

....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกูล)

....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ดร.อำนาจ สิทธัตตระกูล)

....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย)

....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(ดร.ชนินทร์ กุลเศรษฐ์ญชลี)

มหาวิทยาลัยศิลปากร

61402209 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

นางสาว ณัฐนรี อาศนสุวรรณ์: การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มเสริมองค์ประกอบพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท สำหรับยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกูล

ปัจจุบันมีการใช้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุผลผลิตทางการเกษตรหรือผลไม้สดเป็นจำนวนมาก ซึ่งเมื่อใช้งานเสร็จสิ้นแล้ว จะส่งผลให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับขยะและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากบรรจุภัณฑ์เหล่านั้นไม่สามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำพลาสติกที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพคือ พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (Polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) มาใช้ในการทำบรรจุภัณฑ์ โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้ที่สามารถดักจับก๊าซเอทิลีน ยับยั้งแบคทีเรีย และต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระได้ งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาผลของ TiO_2 ในปริมาณ 0.25, 0.50, 1.00 และ 3.00 % wt ต่อสมบัติของฟิล์มพลาสติกชีวภาพ PBAT ซึ่งขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Cast film extrusion ได้แก่ สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติทางสัณฐานวิทยา อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ การยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและการยืดอายุผลไม้ พบว่าเมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณ 0.25-1.00 % wt ลงใน PBAT ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนดีขึ้น สมบัติการซึมผ่านลดลง แต่เมื่อเติม TiO_2 3 % wt จะทำให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนลดลง สมบัติการซึมผ่านเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการเติม TiO_2 ในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและยืดอายุผลไม้ได้ดีขึ้น ดังนั้นฟิล์มสูตรที่เหมาะสมในการนำไปใช้ศึกษาต่อในส่วนที่สองคือสูตร PBAT/TiO_2 0.50 % wt เนื่องจากฟิล์มสูตรนี้สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและชะลอการสุกของผลไม้อันเนื่องมาจากการปลดปล่อยก๊าซเอทิลีนได้ นอกจากนี้ฟิล์มที่ได้ยังมีความทึบแสงต่ำ ทำให้สามารถมองเห็นผลไม้หรือสินค้าผ่านฟิล์มบรรจุภัณฑ์นี้ได้ ส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของการเติมสารสกัดจากพืชสองชนิดลงใน PBAT คือ สารสกัดว่านหางจระเข้ (AL) และสารสกัดแอปเปิล (AP) ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr ต่อสมบัติของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT ผสม TiO_2 ซึ่งทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Cast film extrusion ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางสัณฐานวิทยา สมบัติการซึมผ่าน ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ การยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและการยืดอายุผลไม้ พบว่าเมื่อเติม AL และ AP ในปริมาณมากขึ้นจะส่งผลในทำนองเดียวกัน กล่าวคือ ฟิล์มมีสมบัติการซึมผ่านที่ลดลง มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและการยืดอายุผลไม้ได้ดีขึ้น ดังนั้นหากต้องการฟิล์มที่มีสมบัติในด้านการต้านอนุมูลอิสระ ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและช่วยยืดอายุผลไม้ให้สุกช้าลงหรือชะลอการสุก ควรใช้เป็นฟิล์มสูตร PBAT/AP 1 phr และ สูตร PBAT/T0.5/AP 1 phr เนื่องจากใน AP มีสารสำคัญคือสารประกอบพอลิฟีนอลในปริมาณมาก จึงมีส่วนช่วยในการต้านอนุมูลอิสระ ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และสามารถยืดอายุของผลไม้ได้นานขึ้น และนอกจากนี้ยังเป็นผลมาจากการเติม TiO_2 ที่มีสมบัติในด้านการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และช่วยชะลอการสุกของผลไม้เนื่องจากสามารถยับยั้งเอทิลีนที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการสุกของผลไม้ได้

61402209 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

MISS NATNAREE ARSSANASUWAN : PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) BIOCOMPOSITES FILMS FOR EXTENDED SHELF-LIFE OF FRUITS THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR POONSUB THREEPOPNATKUL, D.Eng.

Nowadays, packagings are widely used in post-harvest agro industry which subsequently caused the environmental problems due to it is not biodegradable. In this research, biodegradable materials i.e., Polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT) is the selection for this study. The aim of this research is to develop packagings for extending shelf life of fruits with ethylene scavenging, antimicrobial and antioxidant agents. The study was divided into two parts: the first part, the effect of TiO_2 at different weight percentages of TiO_2 (0.25, 0.50, 1.00 and 3.00 % wt) in PBAT were prepared by cast film extrusion and then characterized for thermal properties, mechanical properties, morphological properties, water vapor transmission rate, gas transmission rate, antimicrobial activity and storage-life. Mechanical, thermal and barrier properties of PBAT incorporating TiO_2 at 0.25-1.00 % wt were higher than the ones of PBAT. The addition of TiO_2 more than 1.00 % wt (3.00 % wt) however exhibited lower mechanical, thermal and barrier property. Moreover, antimicrobial and shelf life of fruits were improved by the increasing of TiO_2 concentration. PBAT/TiO_2 0.50 % w/w film had the optimal properties and provided antimicrobial activity and anti-deterioration of fruits that caused by ripening process induced by ethylene. Furthermore, this film was low opacity which enabled to show the quality of fruits when used as packaging. Thus, this proportion was selected to study in the following part. Next, the effect of plant extract i.e., Aloe vera extract and Apple extract at different weight (0.25, 0.50 and 1.00 phr) in PBAT and PBAT/TiO_2 were prepared by cast film extrusion and characterized for the mechanical properties, morphological properties, water vapor transmission rate, gas transmission rate, antioxidant activity, antimicrobial activity and storage-life. The barrier property, antioxidant activity, antimicrobial activity and shelf life of fruits were improved by the increment of Aloe vera extract and Apple extract. The PBAT/AP 1.00 phr and PBAT/T0.5/AP 1.00 phr exhibited the antioxidant activity, antimicrobial activity and retarding the ripening of fruits. As a result, polyphenols in Apple extract could act as antioxidant and antimicrobial agent. As a result, TiO_2 effect provided antimicrobial activity and anti-deterioration of fruits that caused by ripening process induced by ethylene.

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูนทรัพย์ ตรีภพนาถกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.อำนาจ สิทธัตตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ผู้คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย และ ดร.ชนินทร์ กุลเศรษฐ์ญชลี ที่สละเวลามาเป็นประธานและคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆในการสอบและทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่อบรมสั่งสอน ให้ความรู้ และสนับสนุนทุนการศึกษาและทุนวิจัยในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ และคุณไพโรจน์ ตั้งศุภธวัช วิศวกรประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดเตรียมสารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนวิธีการใช้เครื่องมือต่างๆ และขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชา สำหรับการอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานจนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) (National Research Council of Thailand, NRCT) โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยทุนพัฒนาบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2563 จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาโท เพื่อน และน้อง นักศึกษาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและกำลังใจจนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จตามแผนที่วางไว้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัว ที่อบรม สั่งสอน เลี้ยงดูและคอยให้คำปรึกษา รวมถึงเป็นกำลังใจสำคัญในเรื่องต่างๆ ทั้งด้านการเรียนและการดำรงชีวิต ตลอดจนการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ณัฐนรี อาศนสุวรรณ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.......... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.......... จ

กิตติกรรมประกาศ.......... ฉ

สารบัญ.......... ช

สารบัญตาราง.......... ฐ

สารบัญรูป.......... ด

บทที่ 1 บทนำ (Introduction).......... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา (Statements and significance of the problems).......... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย (Objective of research).......... 3

1.3 ขอบเขตของการวิจัย (Scope or delimitation of the study).......... 3

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.......... 4

บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Review of related literature).......... 5

2.1 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (Polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT).......... 5

2.1.1 ข้อมูลทั่วไป.......... 5

2.1.2 กระบวนการสังเคราะห์.......... 5

2.2 บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active packaging).......... 7

2.2.1 สารดักจับออกซิเจน (Oxygen scavenger หรือ Oxygen absorber).......... 7

2.2.2 สารคายคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide release).......... 7

2.2.3 สารควบคุมความชื้น (Humidity control).......... 7

2.2.4 สารดักจับเอทิลีน (Ethylene scavenger).......... 8

2.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2) 8
2.3.1 สมบัติของ Titanium dioxide 8
2.3.2 กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ Titanium dioxide 9
2.3.3 ประโยชน์ของ Titanium dioxide 11
2.4 อนุมูลอิสระ (Free radical) 11
2.5 สารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant agent) 12
2.5.1 ประเภทของสารต้านอนุมูลอิสระ 12
2.5.2 แหล่งที่มาของสารต้านอนุมูลอิสระ 13
2.5.3 สารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) 13
2.5.4 พอลิฟีนอล (Polyphenol) 14
2.6 สารสกัดจากพืช 14
2.6.1 สารสกัดจากเมล็ดองุ่น 15
2.6.2 สารสกัดจากเปลือกมังคุด 15
2.6.3 สารสกัดจากชาเขียว 16
2.6.4 สารสกัดจากแอปเปิล 17
2.6.5 สารสกัดจากว่านหางจระเข้ 18
2.7 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Review of related literature) 18
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 28
3.1 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 28
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 28
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 29
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ 30
3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน 31
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย 31

3.2.1 การเตรียมฟิล์มจากวัสดุคอมพอสิตชีวภาพระหว่าง PBAT และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (PBAT/TiO_2 biocomposite) 31

3.2.2 การทดสอบสมบัติของ PBAT/TiO_2 biocomposite 31

3.2.2.1ศึกษาความทึบแสงของฟิล์ม (Opacity of films) 31

3.2.2.2 ศึกษาโครงสร้างและความเป็นผลึกของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) 32

3.2.2.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) 32

3.2.2.4 ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์มPBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเครื่อง Thermal Gravimetric Analyser (TGA) 32

3.2.2.5 ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite โดยการทดสอบสมบัติการดึงยืดด้วยเครื่อง Universal testing machine 33

3.2.2.6 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) 33

3.2.2.7 ศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate: WVTR) โดยใช้เทคนิค Cup method แบบ Desiccant 33

3.2.2.8 ศึกษาอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของก๊าซ (Gas transmission rate, GTR) 34

3.2.2.9 ศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Antimicrobial activity) โดยใช้แบคทีเรีย 2 ชนิดคือ *Staphylococcus aureus* (Gram-positive) และ *Escherichia coli* (Gram-negative) 34

3.2.2.10 ศึกษาการยืดอายุ (Storage-life) ของผลไม้ 39

3.2.3 การเตรียมวัสดุคอมพอสิตระหว่าง PBAT, Titanium dioxide และสารสกัดจากพืช (PBAT biocomposite) และการทดสอบสมบัติของฟิล์มที่ได้ 40

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 42

4.1 การศึกษาสมบัติของฟิล์มจากวัสดุเสริมองค์ประกอบระหว่าง PBAT และ Titanium dioxide ($PBAT/TiO_2$ biocomposite) 42

4.1.1 ศึกษาความทึบแสงของฟิล์ม (Opacity of films) ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer 42

4.1.2 ศึกษาโครงสร้างและความเป็นผลึกของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม $PBAT/TiO_2$ biocomposite ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) 44

4.1.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม $PBAT/TiO_2$ biocomposite ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) 45

4.1.4 ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม $PBAT/TiO_2$ biocomposite ด้วยเครื่อง Thermal Gravimetric Analyser (TGA) 46

4.1.5 ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม $PBAT/TiO_2$ biocomposite โดยการทดสอบสมบัติการดึงยืดด้วยเครื่อง Universal testing machine 48

4.1.6 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม $PBAT/TiO_2$ biocomposite ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) 52

4.1.7 ศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate: WVTR) โดยใช้เทคนิค Cup method แบบ Desiccant 53

4.1.8 ศึกษาอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม $PBAT/TiO_2$ biocomposite ด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของก๊าซ (Gas transmission rate) 55

4.1.9 ศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Antimicrobial activity) 57

4.1.10 ศึกษาการยืดอายุ (Storage-life) ของผลไม้ 62

4.2 การศึกษาสมบัติของฟิล์มจากวัสดุเสริมองค์ประกอบระหว่าง PBAT, Titanium dioxide และสารสกัดจากพืช (PBAT biocomposite) 73

4.2.1 ศึกษาความทึบแสงของฟิล์ม (Opacity of films) ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer 73

4.2.2 ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่เติมสารสกัดจากพืช โดยการทดสอบสมบัติการดึงยืดด้วยเครื่อง Universal testing machine 77

4.2.3 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่เติมสารสกัดจากพืช ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) 86

4.2.4 ศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate: WVTR) โดยใช้เทคนิค Cup method แบบ Desiccant 90

4.2.5 ศึกษาอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของก๊าซ (Gas transmission rate) 94

4.2.6 การศึกษาความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ (Radical scavenging activity) โดยใช้วิธี DPPH• radical scavenging assay 99

4.2.7 ศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Antimicrobial activity) 106

4.2.8 ศึกษาการยืดอายุ (Storage-life) ของผลไม้ 111

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 119

5.1 การศึกษาฟิล์มจากวัสดุเสริมองค์ประกอบระหว่าง PBAT และ Titanium dioxide (PBAT/TiO_2 biocomposite) 119

5.2 การศึกษาฟิล์มจากวัสดุเสริมองค์ประกอบระหว่าง PBAT, Titanium dioxide และสารสกัดจากพืช (PBAT biocomposite) 119

5.3 ข้อเสนอแนะ 120

ภาคผนวก 122

ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่างๆ 123

ภาคผนวก ข การคำนวณ 166

ภาคผนวก ค การนำเสนอผลงานวิจัย 168

รายการอ้างอิง 176

ประวัติผู้เขียน..181

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารสำคัญที่มีคุณสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียและต้านอนุมูลอิสระที่อยู่ในสารสกัดว่านหางจระเข้และสารสกัดแอปเปิล [40], [35] 29

ตารางที่ 3.2 แสดง Dilution factor ของแต่หลอดการทดลองที่เจือจางเชื้อแบคทีเรีย 38

ตารางที่ 3.3 แสดงสัดส่วนการผสมและชื่อย่อที่ใช้ในงานวิจัย 40

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความทึบแสงของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณต่างกัน 43

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าจากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเทคนิค DSC 45

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าจากการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเทคนิค TGA 47

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite 51

ตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติเชิงกลของบรรจุภัณฑ์ LLDPE และ CPP จากบริษัท วรรณประไพ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด 51

ตารางที่ 4.6 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite 53

ตารางที่ 4.7 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite 56

ตารางที่ 4.8 แสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย S.Aureus และ E.Coli ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่ไม่มีการฉายแสง UV 58

ตารางที่ 4.9 แสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย S.Aureus และ E.Coli ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่มีการฉายแสง UV เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 59

ตารางที่ 4.10 แสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย S.Aureus และ E.Coli ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่มีการฉายแสง UV เป็นเวลา 3 ชั่วโมง 59

ตารางที่ 4.11 แสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย S.Aureus และ E.Coli ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่มีการฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง 60

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความทึบแสงของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน 74

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความทึบแสงของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 74

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าความทึบแสงของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน 76

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าความทึบแสงของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 77

ตารางที่ 4.16 แสดงค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน 81

ตารางที่ 4.17 แสดงค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 81

ตารางที่ 4.18 แสดงค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน 85

ตารางที่ 4.19 แสดงค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 85

ตารางที่ 4.20 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน 91

ตารางที่ 4.21 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 91

ตารางที่ 4.22 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน 93

ตารางที่ 4.23 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 93

ตารางที่ 4.24 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน 95

ตารางที่ 4.25 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 95

ตารางที่ 4.26 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน 98

ตารางที่ 4.27 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 98

ตารางที่ 4.28 แสดงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของผงสารสกัดว่านหางจระเข้และสารสกัดแอปเปิล 99

ตารางที่ 4.29 แสดงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน 102

ตารางที่ 4.30 แสดงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 102

ตารางที่ 4.31 แสดงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน 104

ตารางที่ 4.32 แสดงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 105

ตารางที่ 4.33 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย S.Aureus และ E.Coli ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน 107

ตารางที่ 4.34 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.Aureus* และ *E.Coli* ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 107

ตารางที่ 4.35 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.Aureus* และ *E.Coli* ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน 110

ตารางที่ 4.36 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย S.Aureus และ E.Coli ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน.................................. 110

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มสูตรต่างๆด้วยเครื่อง Universal testing machine.. 127

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ (Radical scavenging activity)... 162

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของ PBAT [1] 5

รูปที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์จากกรดอะดิพิกและ 1,4-Butanediol [13]..... 6

รูปที่ 2.3 แสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ของ Butane terephthalate [13] 6

รูปที่ 2.4 การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ PBAT [13] 6

รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ (ก) อะนาเทส (Anatase) (ข) รูไทล์ (Rutile) และ (ค) บรูคไคต์ (Brookite) [15] 8

รูปที่ 2.6 แสดงกลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ [15] . 9

รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของสารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์ [19] 13

รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของสารประกอบฟีนอล [20], [21] 14

รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของ Anthocyanins ที่เป็นสารพอลิฟีนอล [23] 14

รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของ Proanthocyanidin [24] 15

รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างของ Mangostin, Mangostenol และ 1-isomangostin ตามลำดับ [27], [28], [29] 16

รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของ Tannin [31] 16

รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างของ EGCG และ EGC ตามลำดับ [33], [34] 17

รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างของ ECG และ EC ตามลำดับ [34] 17

รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างของ Catechin และ Gallic acid ตามลำดับ [36], [37] 17

รูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างของ Phloretin และ Quercetin ตามลำดับ [38], [39] 17

รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างของ Aloin [42] 18

รูปที่ 2.18 แสดง Ethylene photocatalytic degradation ของ Chitosan (CS) และ Chitosan-TiO_2 (CT) nanocomposite films ที่มีการเติม TiO_2 0.25, 0.5, 1 และ 2% (CT0.25, CT0.5, CT1 และ CT2 ตามลำดับ) [5] 19

มหาวิทยาลัยศิลปากร

รูปที่ 2.19 แสดงกลไกการสลายตัวของ Ethylene ด้วยการใช้แสงและความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียของ Chitosan-TiO_2 nanocomposite film [5] 20

รูปที่ 2.20 แสดงปริมาณฟีนอลิกรวมและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์มไคโตซานคอมพอสิต (C: chitosan film; CN: chitosan-CNC; CR: chitosan-CF; CNR: chitosan-CNC-CF; CW: chitosan-VN; CNW: chitosan-CNC-VN) [10] 21

รูปที่ 2.21 แสดงปริมาณฟีนอลิกรวมในฟิล์มและปริมาณที่แตกต่างกัน [43] 22

รูปที่ 2.22 แสดงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระในฟิล์มและปริมาณที่แตกต่างกัน [43] 22

รูปที่ 2.23 แสดงปริมาณฟีนอลิกรวมของฟิล์ม Chitosan ที่มีการเติมสารสกัดจากชาเขียว [44] 23

รูปที่ 2.24 แสดงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม Chitosan ที่มีการเติมสารสกัดจากชาเขียว [44] 24

รูปที่ 2.25 แสดงปริมาณฟีนอลิกรวม (Total Phenolic content) ของ PVA/AP films เมื่อเติม AP ในปริมาณที่ต่างกัน [11] 25

รูปที่ 2.26 แสดงความสามารถในการดักจับอนุมูลอิสระ DPPH (DPPH radical scavenging activity) ของฟิล์ม PVA/AP ที่มีการเติม AP ในปริมาณต่างกัน [11] 25

รูปที่ 2.27 แสดงความสามารถในการดักจับอนุมูลอิสระ DPPH (DPPH radical scavenging activity) ของฟิล์มเจลาตินที่มีการเติมเจลว่านหางจระเข้ในปริมาณ 0-9% [12] 26

รูปที่ 2.28 แสดงความสามารถในการดักจับอนุมูลอิสระ ABTS (ABTS radical scavenging activity) ของฟิล์มเจลาตินที่มีการเติมเจลว่านหางจระเข้ในปริมาณ 0-9% [12] 27

รูปที่ 3.1 แสดงอาหารเหลวที่ผ่านการ Sterilize 35

รูปที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบความขุ่นของแบคทีเรียที่เพาะได้เทียบกับ McFARLAND SCALE ลำดับที่ 1 36

รูปที่ 3.3 แสดงการใส่ฟิล์มลงในอาหารเหลว (NB) 37

รูปที่ 3.4 แสดงการใส่ฟิล์มและเชื้อลงในอาหารเหลว (NB) และผ่านการบ่มแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 37

รูปที่ 3.5 แสดงแผนภูมิการเตรียม PBAT/TiO_2 biocomposite 39

รูปที่ 3.6 แสดงแผนภูมิการเตรียม PBAT biocomposite 41

รูปที่ 4.1 แสดงความทึบแสงของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณต่างกัน 43

รูปที่ 4.2 แสดง XRD pattern ของ a) ผง TiO_2 b) Neat PBAT c) PBAT/T0.25 d) PBAT/T0.5 e) PBAT/T1 และ f) PBAT/T3 44

รูปที่ 4.3 แสดง TGA thermogram ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite 46

รูปที่ 4.4 แสดง Stress-Strain Curve ของ Neat PBAT และ PBAT PBAT/TiO_2 biocomposite 48

รูปที่ 4.5 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite a) Young’s modulus b) Tensile strength และ c) Elongation at break 50

รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง TiO_2 ที่กำลังขยายต่างกัน a) 5000 เท่า (5000X) และ b) 50000 เท่า (50000X) โดยใช้โหมด SE 52

รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณต่างกันที่กำลังขยาย 10000 เท่า (10000X) a) 0.00 % wt b) 0.25 % wt c) 0.50 % wt d) 1.00 % wt และ e) 3.00 % wt โดยใช้โหมด BSE 52

รูปที่ 4.8 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite 53

รูปที่ 4.9 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite 55

รูปที่ 4.10 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite 55

รูปที่ 4.11 แสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย S.Aureus ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่มีการฉายแสง UV ฟิล์มที่เวลาต่างกัน 57

รูปที่ 4.12 แสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.Coli ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่มีการฉายแสง UV ฟิล์มที่เวลาต่างกัน 58

รูปที่ 4.13 แสดงการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการต้านเชื้อแบคทีเรียของ a) TiO_2 และ b) ZnO 62

รูปที่ 4.14 แสดงการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการสลายก๊าซเอทิลีนของ TiO_2 64

รูปที่ 4.15 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อไม่มีการฉายแสง UV เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน A) Blank B) Neat PBAT และ C) PBAT/TiO_2 0.25 % w/w........ 65

รูปที่ 4.16 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อไม่มีการฉายแสง UV เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน D) PBAT/TiO_2 0.5 %w/w E) PBAT/TiO_2 1 %w/w และ F) PBAT/TiO_2 3 %w/w........ 66

รูปที่ 4.17 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน A) Blank B) Neat PBAT และ C) PBAT/TiO_2 0.25 %w/w........ 67

รูปที่ 4.18 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน D) PBAT/TiO_2 0.5 %w/w E) PBAT/TiO_2 1 %w/w และ F) PBAT/TiO_2 3 %w/w........ 68

รูปที่ 4.19 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน A) Blank B) Neat PBAT และ C) PBAT/TiO_2 0.25 %w/w........ 69

รูปที่ 4.20 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน D) PBAT/TiO_2 0.5 %w/w E) PBAT/TiO_2 1 %w/w และ F) PBAT/TiO_2 3 %w/w........ 70

รูปที่ 4.21 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน A) Blank B) Neat PBAT และ C) PBAT/TiO_2 0.25 %w/w........ 71

รูปที่ 4.22 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน D) PBAT/TiO_2 0.5 %w/w E) PBAT/TiO_2 1 %w/w และ F) PBAT/TiO_2 3 %w/w........ 72

รูปที่ 4.23 แสดงค่าความทึบแสงของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน........ 74

รูปที่ 4.24 แสดงโครงสร้างของ Aloin ในสารสกัดว่านหางจระเข้ [42]........ 75

รูปที่ 4.25 แสดงโครงสร้างของ Polyphenols ในสารสกัดแอปเปิล a) Catechin [36] b) Gallic acid [37] c) Phloretin [38] และ d) Quercetin [39]........ 76

รูปที่ 4.26 แสดงค่าความทึบแสงของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 76

รูปที่ 4.27 แสดง Stress-Strain Curve ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัด ว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 77

รูปที่ 4.28 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน a) Young’s modulus b) Tensile strength และ c) Elongation at break 80

รูปที่ 4.29 แสดง Stress-Strain Curve ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 81

รูปที่ 4.30 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน a) Young’s modulus b) Tensile strength และ c) Elongation at break 84

รูปที่ 4.31 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง a) สารสกัดว่านหางจระเข้ (Aloe vera Extract) b) สารสกัดแอปเปิล (Apple Extract) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (200X) โดยใช้โหมด SE 86

รูปที่ 4.32 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง a) สารสกัดว่านหางจระเข้ (Aloe vera Extract) b) สารสกัดแอปเปิล (Apple Extract) ที่กำลังขยาย 500 เท่า (500X) โดยใช้โหมด SE 86

รูปที่ 4.33 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง a) สารสกัดว่านหางจระเข้ (Aloe vera Extract) b) สารสกัดแอปเปิล (Apple Extract) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (1000X) โดยใช้โหมด SE 86

รูปที่ 4.34 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน ที่กำลังขยาย 2500 เท่า (2500X) a) PBAT/AL0.25 b) PBAT/AL0.5 และ c) PBAT/AL1 โดยใช้โหมด SE 87

รูปที่ 4.35 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน ที่กำลังขยาย 2500 เท่า (2500X) a) PBAT/AP0.25 (โหมด SE) b1) PBAT/AP0.5 (โหมด BSE) b2) PBAT/AP0.5 (โหมด BSE) และ c) PBAT/AP1 (โหมด SE) 88

รูปที่ 4.36 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 0.50 % wt และ สารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน ที่กำลังขยาย 2500 เท่า (2500X) a1) PBAT/T0.5/AL0.25 b1) PBAT/T0.5/AL0.5 และ c1) PBAT/T0.5/AL1 (โหมด SE) และ a2) PBAT/T0.5/AL0.25 b2) PBAT/T0.5/AL0.5 และ c2) PBAT/T0.5/AL1 (โหมด BSE) 88

รูปที่ 4.37 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม Neat PBAT ที่มีการเติม TiO_2 0.50 % wt และสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน ที่กำลังขยาย 2500 เท่า (2500X) a1) PBAT/T0.5/AP0.25 b1) PBAT/T0.5/AP0.5 และ c1) PBAT/T0.5/AP1 (โหมด SE) และ a2) PBAT/T0.5/AP0.25 b2) PBAT/T0.5/AP0.5 และ c2) PBAT/T0.5/AP1 (โหมด BSE) 89

รูปที่ 4.38 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 90

รูปที่ 4.39 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 92

รูปที่ 4.40 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 94

รูปที่ 4.41 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 95

รูปที่ 4.42 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 97

รูปที่ 4.43 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 97

รูปที่ 4.44 แสดงสารประกอบฟีนอลิกที่ทำหน้าที่ในการต้านอนุมูลอิสระในสารสกัดว่านหางจระเข้101

รูปที่ 4.45 แสดงสารประกอบฟีนอลิกที่ทำหน้าที่ในการต้านอนุมูลอิสระในสารสกัดแอปเปิล 101

รูปที่ 4.46 แสดงปฏิกิริยาในการต้านอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิก 101

รูปที่ 4.47 แสดงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 102

รูปที่ 4.48 แสดงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 104

รูปที่ 4.49 แสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย S.Aureus ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 106

รูปที่ 4.50 แสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.Coli ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 106

รูปที่ 4.51 แสดงความสามารถในการแสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย S.Aureus ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 109

รูปที่ 4.52 แสดงความสามารถในการแสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.Coli ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน 109

รูปที่ 4.53 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน A) Neat PBAT B) PBAT/AL0.25 C) PBAT/AL0.5 และ D) PBAT/AL1 113

รูปที่ 4.54 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน E) PBAT/AP0.25 F) PBAT/AP0.5 และ G) PBAT/AP1 114

รูปที่ 4.55 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน A) PBAT/T0.5 B) PBAT/T0.5/AL0.25 C) PBAT/T0.5/AL0.5 และ D) PBAT/T0.5/AL1 115

รูปที่ 4.56 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน E) PBAT/T0.5/AP0.25 F) PBAT/T0.5/AP0.5 และ G) PBAT/T0.5/AP1 116

รูปที่ ก.1 DSC thermogram ของ Neat PBAT 124

รูปที่ ก.2 DSC thermogram ของ PBAT/T0.25 124

รูปที่ ก.3 DSC thermogram ของ PBAT/T0.5 125

รูปที่ ก.4 DSC thermogram ของ PBAT/T1 125

รูปที่ ก.5 DSC thermogram ของ PBAT/T3 126

รูปที่ ก.6 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ที่กำลังขยาย 250 เท่า (250X) a) PBAT/AL0.25 b) PBAT/AL0.5 และ c) PBAT/AL1 141

รูปที่ ก.7 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (1000X) a) PBAT/AL0.25 b) PBAT/AL0.5 และ c) PBAT/AL1 141

รูปที่ ก.8 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิลที่กำลังขยาย 250 เท่า (250X) a) PBAT/AP0.25 b) PBAT/AP0.5 และ c) PBAT/AP1 141

รูปที่ ก.9 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิลที่กำลังขยาย 1000 เท่า (1000X) a) PBAT/AP0.25 b) PBAT/AP0.5 และ c) PBAT/AP1 142

รูปที่ ก.10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ที่กำลังขยาย 250 เท่า (250X) a) PBAT/T0.5/AL0.25 b) PBAT/T0.5/AL0.5 และ c) PBAT/T0.5/AL1 142

รูปที่ ก.11 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 0.50 % wt และสารสกัดว่านหางจระเข้ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (1000X) โดยใช้โหมด SE (ซ้าย) และ BSE (ขวา) a) PBAT/T0.5/AL0.25 b) PBAT/T0.5/AL0.5 และ c) PBAT/T0.5/AL1 143

รูปที่ ก.12 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิลที่กำลังขยาย 250 เท่า (250X) a) PBAT/T0.5/AP0.25 และ b) PBAT/T0.5/APL0.5 143

รูปที่ ก.13 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 0.50 % wt และสารสกัดแอปเปิลที่กำลังขยาย 1000 เท่า (1000X) a) PBAT/T0.5/AP0.25 b) PBAT/T0.5/AP0.5 และ c) PBAT/T0.5/AP1 144

รูปที่ ก.14 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม Neat PBAT 145

รูปที่ ก.15 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T0.25 145

รูปที่ ก.16 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T0.5 146

รูปที่ ก.17 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T1 146

รูปที่ ก.18 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T3 147

รูปที่ ก.19 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/AL0.25 147

รูปที่ ก.20 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/AL0.5 148

รูปที่ ก.21 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/AL1 148

รูปที่ ก.22 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/AP0.25 149

รูปที่ ก.23 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/AP0.5 149

รูปที่ ก.24 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/AP1 150

รูปที่ ก.25 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T0.5/AL0.25 150
รูปที่ ก.26 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T0.5/AL0.5 151
รูปที่ ก.27 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T0.5/AL1 151
รูปที่ ก.28 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T0.5/AP0.25............................ 152
รูปที่ ก.29 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T0.5/AP0.5 152
รูปที่ ก.30 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T0.5/AP1 153
รูปที่ ก.31 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT.......................... 153
รูปที่ ก.32 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.25 154
รูปที่ ก.33 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.5 154
รูปที่ ก.34 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T1 155
รูปที่ ก.35 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T3 155
รูปที่ ก.36 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/AL0.25...................... 156
รูปที่ ก.37 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/AL0.5 156
รูปที่ ก.38 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/AL1 157
รูปที่ ก.39 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/AP0.25...................... 157
รูปที่ ก.40 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/AP0.5 158
รูปที่ ก.41 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/AP1 158
รูปที่ ก.42 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.5/AL0.25 159
รูปที่ ก.43 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.5/AL0.5................ 159
รูปที่ ก.44 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.5/AL1................... 160
รูปที่ ก.45 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.5/AP0.25 160
รูปที่ ก.46 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.5/AP0.5................ 161
รูปที่ ก.47 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.5/AP1................... 161

รูปที่ ก.48 อัตราการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย S.aureus ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม AL 0.25, 0.50 และ 1.00 phr 163
รูปที่ ก.49 อัตราการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย S.aureus ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม AP 0.25, 0.50 และ 1.00 phr 163
รูปที่ ก.50 อัตราการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.coli ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม AL 0.25, 0.50 และ 1.00 phr 164
รูปที่ ก.51 อัตราการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.coli ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม AP 0.25, 0.50 และ 1.00 phr 164
รูปที่ ก.52 อัตราการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.coli ของฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติม AL 0.25, 0.50 และ 1.00 phr 165
รูปที่ ก.53 อัตราการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.coli ของฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติม AP 0.25, 0.50 และ 1.00 phr 165

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา (Statements and significance of the problems)

ปัจจุบันมีการใช้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุผลผลิตทางการเกษตรหรือผลไม้สดเป็นจำนวนมาก ซึ่งเมื่อใช้งานเสร็จสิ้นแล้ว จะส่งผลให้เกิดเป็นปัญหาเกี่ยวกับขยะและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากบรรจุภัณฑ์เหล่านั้นไม่สามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ ดังนั้นในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทยจึงได้มีแนวคิดในการนำพลาสติกหรือพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้มาใช้ในการผลิตฟิล์มบรรจุภัณฑ์ เช่น พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (Polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) ซึ่งนอกจากข้อดีในด้านการย่อยสลายทางชีวภาพแล้ว PBAT ยังมีความเหนียว มีความยืดหยุ่นสูงคล้ายกับ LDPE และยังสามารถขึ้นรูปได้ง่ายอีกด้วย [1] นอกจากนี้ยังพบว่ามีนักวิจัยอีกหลายกลุ่มที่ทำการศึกษาผลของสารตัวเติมที่ส่งผลต่อสมบัติของ PBAT เพื่อเป็นการปรับปรุงฟิล์ม PBAT ให้มีสมบัติที่ดีขึ้น เช่น การนำ PBAT มาผสมกับ Organoclay [2], Zinc oxide (ZnO) [3] และ Titanium dioxide (TiO_2) [4] เป็นต้น ซึ่ง Raja Venkatesan และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาผลของการเติม TiO_2 ลงใน PBAT เพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ได้ ซึ่งพบว่าฟิล์มที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเมื่อมีการเติม TiO_2 ในปริมาณที่มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มที่เตรียมได้นั้นเป็นการศึกษาจากการขึ้นรูปด้วยวิธี Solvent casting ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มจากพลาสติกชีวภาพ PBAT และ TiO_2 ที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยวิธี Cast film extrusion นอกจากนี้ยังพบว่า TiO_2 มีคุณสมบัติที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยการใช้แสง (Photocatalyst) ที่สามารถช่วยในการดักจับก๊าซเอทิลีนและยับยั้งแบคทีเรียได้ ซึ่งสามารถยืนยันผลดังกล่าวได้ด้วยงานวิจัยของ Ubonrat Siripatrawan และคณะ [5] พบว่าฟิล์มไคโตซานที่ผสม TiO_2 มีความสามารถในการดักจับก๊าซเอทิลีน และสามารถยับยั้งแบคทีเรียได้ทั้งแกรมบวก แกรมลบ รวมถึงเชื้อรา และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Raja Venkatesan และคณะ [4] ที่มีการเติม TiO_2 ลงใน PBAT พบว่าฟิล์มที่ได้สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งแกรมบวกและแกรมลบเช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตาม ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ได้มีการเติมสารตัวเติมจะมีคุณสมบัติที่ไม่เพียงพอสำหรับการยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้ เนื่องจากฟิล์มเหล่านั้นจะสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้ได้แค่ประมาณ 5 วัน เช่น กรณีของกล้วยไข่พบว่าหลังจากผ่านไป 5 วัน ผลไม้เริ่มมีกลิ่นฉุนและมีสีดำซึ่งไม่น่ารับประทาน [6] โดยปัจจัยหลักของการเน่าเสียและเสื่อมสภาพของผลไม้มีสาเหตุมาจากการสุกของ

ผลไม้ซึ่งเกี่ยวข้องกับก๊าซเอทิลีน [7] การปนเปื้อนของแบคทีเรีย [5] รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เป็นสาเหตุของการเกิดสารอนุมูลอิสระ (Free radicals) [8] ที่ส่งผลให้ผลไม้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี กลิ่น รส รวมถึงเนื้อสัมผัส ดังนั้นฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับการยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้จึงควรมีคุณสมบัติที่สามารถป้องกันการเน่าเสียและเสื่อมสภาพของผลไม้ได้เป็นระยะเวลานาน เนื่องจากเราเน้นการส่งออกผลไม้ไปที่ต่างประเทศ ซึ่งการจัดส่งไปต่างประเทศจะใช้ระยะเวลาที่ค่อนข้างนาน คือ ประมาณ 2 – 3 สัปดาห์ ด้วยสาเหตุเหล่านี้จึงมักมีการเติมสารประเภท Active compounds ได้แก่ สารดูดออกซิเจน สารคายคาร์บอนไดออกไซด์ สารควบคุมความชื้น และสารดักจับเอทิลีนลงไปในบรรจุภัณฑ์ที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาเหล่านั้นและทำให้ได้ออกมาเป็นบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active packaging) [9] ซึ่งนอกจากจะช่วยปกป้องผลไม้แล้วยังสามารถช่วยในการควบคุมสภาพอากาศภายในบรรจุภัณฑ์และช่วยยืดอายุการเก็บรักษา (Shelf-life) ของผลไม้ได้อีกด้วย นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้จะมีการศึกษาสารตัวเติมที่เป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant agents) เพื่อรักษาความสดของผลไม้และป้องกันไม่ให้ผลไม้เกิดการเสื่อมสภาพในระยะเวลาอันสั้น โดยสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระที่จะใช้ในงานวิจัยนี้จะมาจากสารสกัดจากพืช ซึ่งสารสกัดจากพืชเหล่านั้นจะประกอบไปด้วยสารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) ที่จัดว่าเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระและที่มาจากธรรมชาติ (Natural antioxidant agents) ซึ่งเมื่อเติมลงในฟิล์มจะส่งผลให้ฟิล์มเหล่านั้นสามารถต้านสารอนุมูลอิสระได้ เช่น งานวิจัยของ Yixiang Xu และคณะ [10] ที่มีการเติมสารสกัดจากกากองุ่นลงไปใน Chitosan โดยจากผลการทดลองพบว่าการเติมสารสกัดจากกากองุ่นจะทำให้ฟิล์มมีประสิทธิภาพในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant activity) ที่ดี เนื่องจากองุ่นประกอบไปด้วยสารประกอบฟีนอลิกจำนวนมาก (Total phenolic content: TPC) ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกเหล่านี้สามารถช่วยในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระได้ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Kirtiraj K. Gaikwad และคณะ [11] ที่มีการเติมกากแอปเปิลลงไปใน PVA (Polyvinyl alcohol) ซึ่งผลการทดลองพบว่าเมื่อเติมการแอปเปิลลงใน PVA ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่ดีขึ้น เนื่องจากในแอปเปิลมีสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds) ที่ทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระอยู่จำนวนมาก เมื่อเติมกากแอปเปิลในปริมาณมากขึ้นจึงทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้มากขึ้น และสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการเติมสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ ได้แก่ ว่านหางจระเข้คืองานวิจัยของ S. Sui Chin และคณะ [12] ซึ่งได้เติมสารสกัดเจลว่านหางจระเข้ลงใน

Fish gelatin ซึ่งพบว่าเมื่อเติมสารสกัดเจลว่านหางจระเข้ในปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากขึ้น เนื่องจากในสารสกัดว่านหางจระเข้จะมีสารประกอบฟีนอลิกเป็นสารสำคัญ จึงส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้นั่นเอง

ดังนั้นแนวคิดทั้งหมดของงานวิจัยนี้คือ เพื่อพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้สำหรับยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้โดยการพัฒนาให้เป็นฟิล์มที่สามารถดักจับก๊าซเอทิลีน ยับยั้งแบคทีเรีย และสามารถต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระได้ โดยการนำพลาสติกชีวภาพชนิด PBAT มาผสมกับ TiO_2 ที่มีสมบัติในการดักจับก๊าซเอทิลีนและยับยั้งแบคทีเรีย รวมถึงมีการเติมสารสกัดจากพืช ได้แก่ สารสกัดจากว่านหางจระเข้และสารสกัดจากแอปเปิลเพื่อทำหน้าที่เป็นสารต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระ และขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธี Cast film extrusion

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย (Objective of research)

เพื่อพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้ที่สามารถดักจับก๊าซเอทิลีน ยับยั้งแบคทีเรีย และสามารถต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระได้ โดยพิจารณาความสามารถในการดักจับก๊าซเอทิลีนในทางอ้อม ซึ่งจะพิจารณาจากการสุกและการเปลี่ยนแปลงสีของผลไม้ (กล้วยหอมทอง) โดยการนำพลาสติกชีวภาพ PBAT มาผสมกับ TiO_2 และสารสกัดจากพืช ได้แก่ สารสกัดว่านหางจระเข้และสารสกัดแอปเปิล โดยขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยวิธี Cast film extrusion

1.3 ขอบเขตของการวิจัย (Scope or delimitation of the study)

1. ศึกษาการเตรียมฟิล์มเสริมองค์ประกอบพลาสติกชีวภาพพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดจากพืช ได้แก่ สารสกัดว่านหางจระเข้และสารสกัดแอปเปิล โดยขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Cast film extrusion

2. ศึกษาผลของการเติม TiO_2 (0.25, 0.50, 1.00 และ 3.00 % โดยน้ำหนัก) ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน การดักจับก๊าซเอทิลีนและการยับยั้งแบคทีเรียของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท

3. ศึกษาผลของการเติมสารสกัดจากพืช ได้แก่ สารสกัดว่านหางจระเข้และสารสกัดแอปเปิล ปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ที่อยู่ในรูปแบบผงที่มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 40 μm ซึ่งสกัดด้วยวิธี Solvent Extraction โดยใช้ Solvent เป็น Deionized water ที่ส่งผลต่อความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระ รวมถึงสมบัติเชิงกล อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ การยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และการยืดอายุผลไม้ (กล้วยหอมทอง) ของฟิล์มพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้ที่สามารถดักจับก๊าซเอทิลีน ยับยั้งแบคทีเรีย และสามารถต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระได้ โดยการนำพลาสติกชีวภาพ PBAT มาผสมกับ TiO_2 และสารสกัดจากพืช ได้แก่ สารสกัดว่านหางจระเข้และสารสกัดแอปเปิล โดยขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยวิธี Cast film extrusion

มหาวิทยาลัยศิลปากร

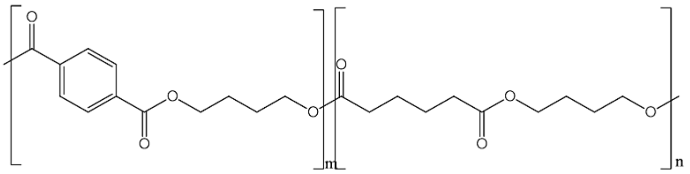
บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Review of related literature)

2.1 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (Polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT)

2.1.1 ข้อมูลทั่วไป

พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (Polybutylene Adipate-co-Terephthalate: PBAT) เป็นพลาสติกชีวภาพที่ผลิตได้จากแหล่งปิโตรเคมี แต่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ โดย PBAT สามารถเรียกได้ทั้งชื่อทางเคมี คือ Polybutylene Adipate-co-Terephthalate และชื่อทางการค้าซึ่งขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิต เช่น Ecoflex® , Wango, Ecoworld, Easter Bio และ Origo-Bi ซึ่ง PBAT เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์และวงอะโรมาติกรวมถึงสายโซ่อะลิฟาติกเป็นองค์ประกอบบนสายโซ่หลัก (Synthetic aliphatic-aromatic polyester) ดังรูปที่ 2.1 ส่งผลให้มีความแข็งแรง เหนียว ขึ้นรูปได้ง่าย และมีความยืดหยุ่นสูงคล้ายกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene : LDPE) ดังนั้น PBAT จึงถูกนำมาใช้ในด้านการผลิตฟิล์มประเภทต่างๆได้อย่างหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นฟิล์มบรรจุอาหาร ฟิล์มบรรจุภัณฑ์และฟิล์มที่ใช้ในการเกษตร เป็นต้น [1]

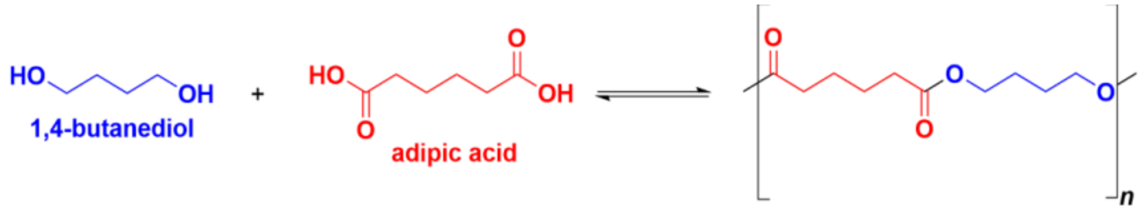


รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของ PBAT [1]

2.1.2 กระบวนการสังเคราะห์

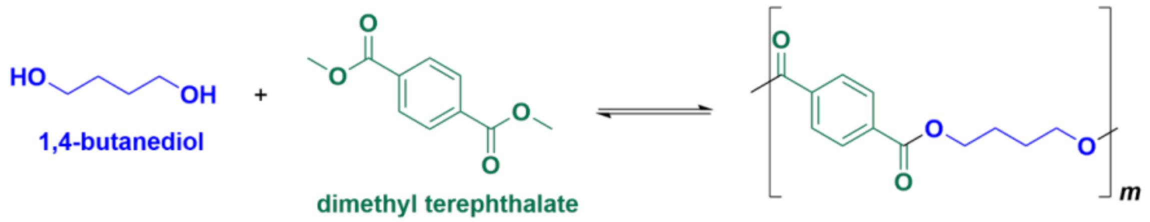
PBAT สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation polymerization หรือ Melt polycondensation) ของมอนอเมอร์ 3 ชนิด คือ กรดเทเรฟทาลิกแอซิด (Terephthalic acid) กรดอะดิปิก (Adipic acid) และ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-Butanediol) โดยมีกระบวนการสังเคราะห์ ดังนี้ [13]

ขั้นที่ 1 เป็นการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์จากกรดอะดิพิกและ 1,4-Butanediol โดยความยาวของสายโซ่จะถูกควบคุมให้สั้นได้ด้วยการเติม 1,4-Butanediol ที่มากเกินพอลงในปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.2



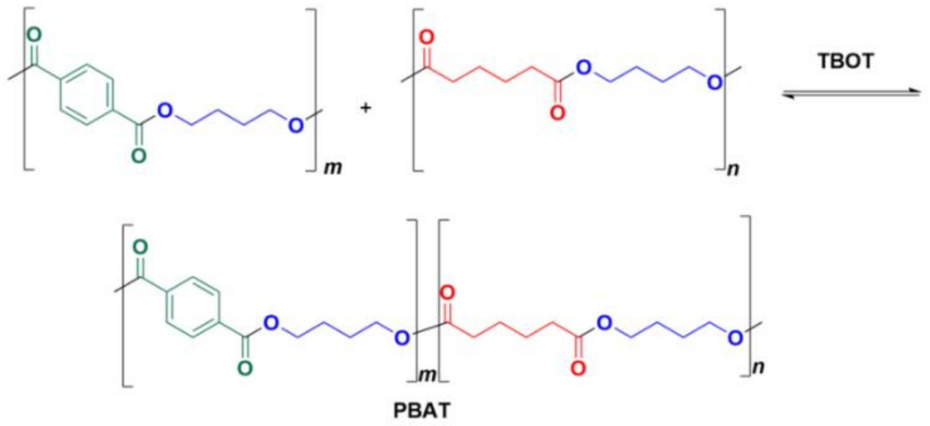
รูปที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์จากกรดอะดิพิกและ 1,4-Butanediol [13]

ขั้นที่ 2 พอลิเอสเทอร์ของ Dimethyl terephthalate (DMT) ถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยใช้ 1,4-Butanediol ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ตัวที่ 2 ที่จะถูกใช้กับผลิตภัณฑ์ของขั้นที่ 1 ในการสังเคราะห์เป็นโคพอลิเมอร์ PBAT ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์ของ Butane terephthalate [13]

ขั้นที่ 3 การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ PBAT แบบสุ่ม โดยใช้ Tetrabutoxytitanium (TBOT) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่น (transesterification) ของพอลิเอสเทอร์ของกรดอะดิพิกและ DMT ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ PBAT [13]

2.2 บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active packaging)

บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ (Active packaging) หมายถึง บรรจุภัณฑ์ (Packaging) ที่สามารถทำหน้าที่ปกป้องอาหารและสามารถช่วยควบคุมสภาพบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ได้ โดยมีหลักการคือการยอมหรือสกัดกั้นการแพร่ของก๊าซต่างๆ ที่ผ่านเข้า-ออกจากบรรจุภัณฑ์ให้มีความเหมาะสมตามความต้องการของอาหารหรือผลิตผลนั้นๆ เพื่อยืดอายุการวางจำหน่าย (Shelf life) และรักษาคุณภาพ การควบคุมส่วนประกอบของบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ จะใช้สารเคมี ได้แก่ สารดูดออกซิเจน สารดักจับเอทิลีน สารดูดกลิ่น สารดูดความชื้น สารคายคาร์บอนไดออกไซด์ หรือสารยับยั้งจุลินทรีย์ (Preservative) โดยอาจบรรจุใส่ในซองเล็กๆ หรือผสมกับฟิล์มที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ได้โดยตรง โดยตัวอย่างของสารเคมีหรือสารประเภท Active compounds ที่ใช้ ได้แก่

2.2.1 สารดักจับออกซิเจน (Oxygen scavenger หรือ Oxygen absorber)

สารดักจับออกซิเจน คือ สารที่สามารถดูดซับออกซิเจนได้โดยการนำตัวเองทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง ซึ่งมักใช้กับบรรจุภัณฑ์อาหารเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ที่เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้อาหารเสื่อมคุณภาพ ทั้งการเปลี่ยนสี กลิ่น และรสชาติ (Off-flavour) เช่น ปฏิกิริยา Lipid oxidation ที่ทำให้อาหารที่มีไขมันและน้ำมันสูงเกิดกลิ่นหืน เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Browning reaction) ทำให้อาหารเปลี่ยนสี รวมทั้งป้องกันการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ (Microbial spoilage) ที่ต้องการออกซิเจน เช่น รา (Mold) และแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน (Aerobic bacteria)

2.2.2 สารคายคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide release)

สารคายคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารที่ใช้กับบรรจุภัณฑ์ที่ช่วยเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสารคายคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนตหรือหินปูน โดยสารคายคาร์บอนไดออกไซด์นี้สามารถช่วยลดปริมาณออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ได้ และคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกมาจะรวมกับน้ำในอาหารได้เป็นกรดคาร์บอนิก ส่งผลให้ค่า pH ที่ผิวหน้าของอาหารลดลง ซึ่งสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยเฉพาะแบคทีเรียที่ก่อโรค (Pathogen) ได้ เช่น อาหารประเภท เนื้อสด เนื้อไก่ เนื้อปลา เนยแข็ง ขนมปัง และ ผลไม้ เช่น สตรอเบอร์รี และลิ้นจี่

2.2.3 สารควบคุมความชื้น (Humidity control)

สารควบคุมความชื้นมักใช้กับบรรจุภัณฑ์สำหรับควบคุมความชื้น เหมาะสำหรับบรรจุผลิตผลทางการเกษตร เช่น ผัก ผลไม้ และดอกไม้ชนิดต่างๆ เพื่อไม่ให้คายน้ำออกมามากเกินไป ทำให้สูญเสียน้ำหนักและเร่งการเจริญของเชื้อราอีกด้วย สารควบคุมความชื้นที่ใช้ ได้แก่ ซิลิกาเจล

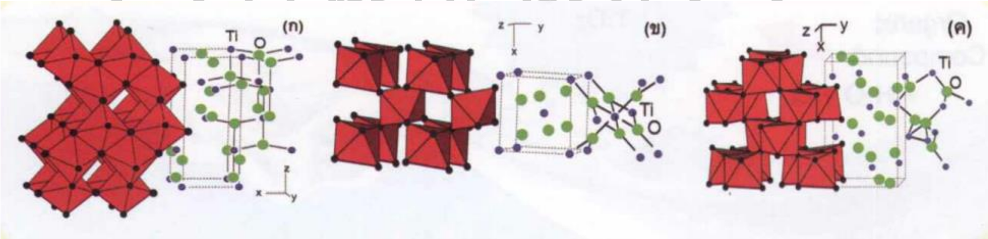
2.2.4 สารดักจับเอทิลีน (Ethylene scavenger)

สารดักจับเอทิลีนเป็นสารที่ใช้กับบรรจุภัณฑ์สำหรับลดปริมาณเอทิลีน เหมาะสำหรับบรรจุผลผลิตทางการเกษตร เช่น ผัก และผลไม้ โดยเฉพาะผลไม้กลุ่ม Climacteric fruit เพื่อชะลอการสุก สารดักจับเอทิลีน ได้แก่ โพแทสเซียมเพอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate) [9]

2.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2)

2.3.1 สมบัติของ Titanium dioxide

Titanium dioxide (TiO_2) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียม ที่ถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษ และราคาถูก มีชื่อทางการค้าคือ ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) ไททานิกแอนไฮไดร (Titanic anhydride) และไททาเนีย (Titania) [14] โดย Titanium dioxide จะมีตำแหน่งที่ว่างของออกซิเจนในโครงสร้างผลึก และจัดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ซึ่ง Titanium dioxide จะอยู่ในรูปของผลึกที่สำคัญ 3 รูปคือ อะนาเทส (Anatase) รูไทล์ (Rutile) และบรูคไคต์ (Brookite) โดยที่เฟสอะนาเทสและรูไทล์จะมีโครงสร้างแบบเตตระโกนอล ส่วนบรูคไคต์จะมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธรอมบิก ซึ่งทุกโครงสร้างจะประกอบขึ้นจากหน่วยพื้นฐานรูปทรงแปดหน้า (TiO_6 octahedral) อะตอมไทเทเนียม (Ti) หนึ่งอะตอมถูกล้อมรอบด้วยอะตอมออกซิเจน (O) หกอะตอม โครงสร้างแต่ละรูปแบบขึ้นอยู่กับการบิดเบี้ยวของการจัดเรียงรูปทรงแปดหน้าบริเวณขอบมุมและหน้า ดังรูปที่ 2.5

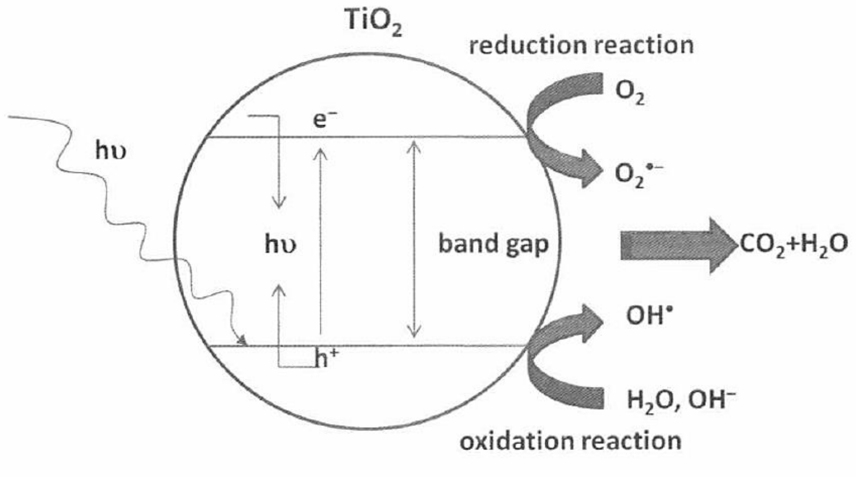


รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ (ก) อะนาเทส (Anatase) (ข) รูไทล์ (Rutile) และ (ค) บรูคไคต์ (Brookite) [15]

Titanium dioxide ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอย่างแพร่หลายด้วยเหตุผลหลายประการ คือ สามารถดูดซับแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตได้ดี มีความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ได้ดี มีโครงสร้างที่เหมาะสมในการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง มีความเสถียรทางแสงและทางเคมี ราคาถูก และสามารถเตรียมในรูปผลึกขนาดเล็กได้ง่าย [15]

2.3.2 กลไกการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ Titanium dioxide

หลักการและกลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์มีปัจจัยสำคัญ คือ ความยาวคลื่นแสง (Wavelength) ที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ของตัวเร่งปฏิกิริยา ออกซิเจน น้ำ และตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับพลังงานแสงในรูปพลังงานโฟตอนมากพอที่จะกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอนและโฮล พลังงานนี้เรียกว่าพลังงานกระตุ้น จากการกระตุ้นด้วยแสงทำให้อิเล็กตรอนที่แถบเวเลนซ์ (Valence band) ซึ่งจะเป็นระดับศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยโฮล (Hole) ที่เหลืออยู่หลังจากที่อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปแล้วส่งผลทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล (Electron-hole pairs) สามารถเคลื่อนที่ไปมาระหว่างแถบเวเลนซ์และแถบการนำ (Conduction band) ได้ง่ายและรวดเร็ว โดยปกติแล้วระดับของพลังงานต่ำที่สุดของแถบการนำจะเป็นระดับของศักย์พลังงานที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันด้วยอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น สามารถเกิดกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction reactions) ดังรูปที่ 2.6 [15]



รูปที่ 2.6 แสดงกลไกของการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ [15]

ปฏิกิริยาที่แถบเวเลนซ์ (Valence band) ที่มีโฮลอยู่สามารถอธิบายได้ว่า ตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) สามารถเคลื่อนที่ไปที่โฮลในแถบเวเลนซ์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยที่โฮลจะเกิดการทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) และไฮดรอกไซด์แอนไอออน (OH^-) ได้เป็นไฮดรอกซิลเรดิคอล (OH•) ซึ่งถือว่าเป็นตัวออกซิแดนท์ (Oxidant) ที่แรงในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงทำให้สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดต่างๆได้ ในขณะที่แถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากแถบการนำไฟฟ้าไปยังตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor)

ในปฏิกิริยารีดักชัน ออกซิเจน (O_2) ที่ถูกดูดซับจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์เรดิคอลแอนไอออน ($O_2•^-$) และเมื่อซูเปอร์ออกไซด์เรดิคอลแอนไอออนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะเกิดเป็นไฮโดรเปอโรซิลเรดิคอล ($HO_2•$) เมื่อไฮโดรเปอโรซิลรดิคอลเกิดการรวมตัวกันจะส่งผลให้เกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และออกซิเจน ซึ่ง H_2O_2 สามารถรับอิเล็กตรอนจากแถบการนำหรือจากซูเปอร์ออกไซด์เรดิคอลแอนไอออนกลายเป็นไฮดรอกซิลแรดิคอล ดังนั้นไฮดรอกซิลแรดิคอลอาจเกิดจากปฏิกิริยารีดักชันและส่งผลให้สามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ได้ โดยสารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายแล้วจะกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์จะต้องใช้ความเข้มแสงที่เหมาะสมในการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยความเข้มแสงที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงอัลตราไวโอเลตหรือช่วงแสงที่ตามองเห็น (Visible) ซึ่งขึ้นอยู่กับแถบช่องว่างพลังงานของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสและรูไทล์ จะมีแถบช่องว่างพลังงาน 3.2 eV และ 3.0 eV ตามลำดับ โดยโครงสร้างอะนาเทสสามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 380 nm ในขณะที่โครงสร้างรูไทล์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 410 nm ด้วยความแตกต่างเหล่านี้จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ประกอบไปด้วยโครงสร้างผลึก 3 แบบ แต่แบบที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงคือ โครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสและรูไทล์ เนื่องจากโครงสร้างอะนาเทสสามารถเกิดการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮลในอัตราที่ต่ำกว่าเพราะมีแถบช่องว่างพลังงานสูงกว่ารูไทล์ รวมถึงโครงสร้างอะนาเทสสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำ จึงมีพื้นที่ผิวมากจึงสามารถดูดซับไฮดรอกไซด์แอนไอออนได้มากกว่า ทำให้สามารถผลิตไฮดรอกซิลเรดิคอลออกมาได้ปริมาณมาก และโครงสร้างอะนาเทสยังมีความสามารถในการดึงดูดติดผิวสูงกว่าโครงสร้างรูไทล์อีกด้วย และจากงานวิจัยยังพบว่าการใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกผสมระหว่างแบบอะนาเทสและรูไทล์จะมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าการใช้โครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสหรือรูไทล์เพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง เนื่องจากอิเล็กตรอนที่เกิดระหว่างกระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะถูกส่งผ่านจากโครงสร้างรูไทล์ไปยังโครงสร้างอะนาเทส เพราะแถบการนำของโครงสร้างอะนาเทสจะอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานสูงกว่าแถบการนำของโครงสร้างรูไทล์ประมาณ 0.2 eV ส่งผลให้ช่วยลดอัตราการรวมตัวกันใหม่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮลจากการสร้างประจุโดยใช้พลังงานแสงได้

2.3.3 ประโยชน์ของ Titanium dioxide

ปัจจุบันไททาเนียมไดออกไซด์ที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์ มักใช้ในรูปของผลึกแบบรูไทล์ (Rutile) ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมในด้านต่างๆ ซึ่งพบมากในธรรมชาติ ส่วนชนิดอะนาเทส (Anatase) นิยมใช้ในกระบวนการใช้แสงขั้นสูง การนำมาใช้ประโยชน์เกี่ยวข้องกับด้านต่างๆ ได้แก่ การใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสังเคราะห์แสง โดยไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับแสงและความร้อน จะแตกตัวให้สารและรังสีที่มีคุณสมบัติหลายประการที่สามารถกำจัดของเสียหรือมลพิษในน้ำ และอากาศ รวมถึงการกำจัดและต้านเชื้อจุลินทรีย์ โดยมีกลไกดังนี้

- การต้านเชื้อจุลินทรีย์ เมื่อแผ่นนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ได้รับแสงจะปลดปล่อยไฮดรอกซิลแรดิคัล (OH•) และซุปเปอร์ออกไซด์แอนไอออน (O_2^-) ออกมาสู่อากาศ อะตอมดังกล่าวจะเข้าดึงอะตอมไฮโดรเจน และคาร์บอนจากผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ รวมถึงสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดกลิ่นทำให้จุลินทรีย์และสารมลพิษต่างๆสลายตัวไป
- การบำบัดมลพิษทางอากาศ เช่น การกำจัดก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และสารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) ด้วยการผ่านแสงอุลตร้าไวโอเลต ในช่วงคลื่น 300-400 นาโนเมตร ทำให้เกิดอนุภาคข้างต้นเข้าทำปฏิกิริยากับสารมลพิษ แล้วกลายเป็นกรดไนตริกและกรดซัลฟูริก ส่วนสารอินทรีย์ที่ระเหยง่ายจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นสารอื่นที่มีความเป็นอันตรายน้อยลง
- การบำบัดมลพิษในน้ำ ทำได้โดยการให้แสงแก่แผ่นตัวกลางนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่แขวนอยู่ในน้ำ เมื่อได้รับแสงจะเกิดการปลดปล่อยอนุภาคดังที่กล่าวข้างต้นเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่แขวนลอยในน้ำกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [14]

$$C_nO_mH + OH\bullet + + O^{2-} \longrightarrow nCO_2 + (n\text{-}m\text{-}1)\,H_2O$$

2.4 อนุมูลอิสระ (Free radical)

อนุมูลอิสระหรืออนุมูลเสรี คือ อะตอมหรือโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนไม่เป็นคู่ (Unpaired electron) อย่างน้อย 1 ตัวโคจรรอบวงนอกสุด โดยอนุมูลอิสระสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อพันธะระหว่างอะตอมแตกออก ทำให้อนุมูลอิสระไม่เสถียรและไวต่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว จึงทำปฏิกิริยากับโมเลกุลที่อยู่รอบๆ โดยดึงอะตอมไฮโดรเจนจากโมเลกุลข้างเคียงเพื่อให้ตัวมันเสถียร โมเลกุลข้างเคียงที่สูญเสียหรือรับอิเล็กตรอนจะกลายเป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยากับ

โมเลกุลอื่นต่อไปเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain reaction) โดยการเกิดอนุมูลอิสระในอาหารและสิ่งมีชีวิตเกิดขึ้นจากการกระตุ้นโมเลกุลของสารด้วยปฏิกิริยาเคมี เช่น

- ปฏิกิริยาการเกิดลิพิดออกซิเดชัน (Lipid oxidation)
- เกิดจากพลังงาน เช่น การฉายรังสีอาหาร (Food irradiation) หรือแสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet)
- ควันไฟ มลพิษทางอากาศ หรือควันจากการสูบบุหรี่ [16]

อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง ส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่องค์ประกอบภายในเซลล์ได้ ดังนั้นจึงต้องมีสารที่ช่วยในการกำจัดหรือต้านอนุมูลอิสระเหล่านี้เพื่อยับยั้งการสร้างความเสียหายให้แก่เซลล์ [17]

2.5 สารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant agent)

สารต้านออกซิเดชัน (Antioxidant) หรือ สารกำจัดอนุมูลอิสระ คือ สารที่สามารถยับยั้งหรือชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) [18] หลักการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระ คือ การทำหน้าที่ไม่ให้อนุมูลอิสระเกิดการก่อตัวขึ้น โดยการยับยั้งปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระและหยุดการก่อตัวของอนุมูลอิสระ นอกจากนี้ยังช่วยซ่อมแซมความเสียหายที่เกิดจากตัวอนุมูลอิสระที่ไปทำลายเซลล์ต่างๆ รวมทั้งสามารถกำจัดและแทนที่โมเลกุลที่ถูกทำลายได้

2.5.1 ประเภทของสารต้านอนุมูลอิสระ

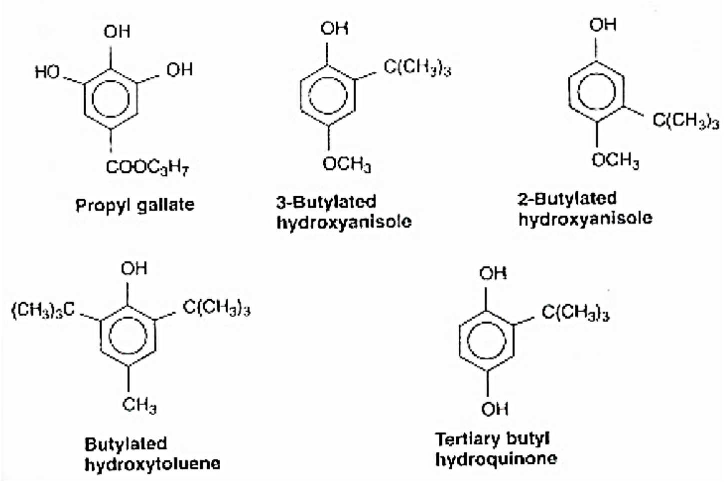
สารต้านอนุมูลอิสระสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะการออกฤทธิ์ ได้แก่ สารต้านอนุมูลอิสระปฐมภูมิ ซึ่งเป็นสารที่หยุดปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระโดยการให้ไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนแก่อนุมูลอิสระโดยตรง ส่งผลให้อนุมูลอิสระนั้นกลายเป็นสารที่มีความเสถียรขึ้น โดยสารออกฤทธิ์ในลักษณะดังกล่าว ได้แก่ สารประกอบ Phenolic (Phenolic compounds) เช่น Flavonoids, Eugenol และ Vanillin เป็นต้น และประเภทต่อมาคือสารต้านอนุมูลอิสระทุติยภูมิ ซึ่งเป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับอนุมูลอิสระ แต่จะช่วยในการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระปฐมภูมิในลักษณะต่างๆ เช่น ช่วยจับกับ Fe^{2+} ดักจับออกซิเจนและดูดซับรังสียูวี เป็นต้น

2.5.2 แหล่งที่มาของสารต้านอนุมูลอิสระ

สารต้านอนุมูลอิสระสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตามแหล่งที่มา ได้แก่

1. สารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์ ซึ่งจัดเป็นสารประกอบ Phenolic สังเคราะห์ 5 ชนิด ได้แก่ propyl gallate, 2-butylated hydroxyanisole, 3-butylate hydroxyanisole, BHT (butylated hydroxytoluene) และtertiary butylhydroquinone โดยสารเหล่านี้มีประสิทธิภาพและความคงตัวสูงกว่าสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ แต่มีข้อจำกัดของการใช้งานเนื่องจากความปลอดภัยในการบริโภค ดังรูปที่ 2.7

2. สารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ (Natural antioxidant) เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่พบได้ทั้งในจุลชีพ สัตว์ และพืชทั้งที่มีวิตามิน เช่น วิตามินซี วิตามินอี และสารที่ไม่ให้คุณค่าทางโภชนาการซึ่งมีโครงสร้างเป็นสารประกอบ Phenolic โดยเฉพาะสารประเภท Polyphenols เช่น แซนโธนและฟลาโวนอยด์ ที่ประกอบด้วยหมู่ Aromatic hydroxyl 2 หมู่ขึ้นไป ซึ่งหมู่ฟังก์ชันนี้มีบทบาทในการดักจับอนุมูลอิสระโดยการให้โปรตอนแก่อนุมูลอิสระ [19]

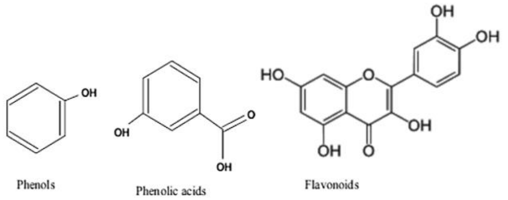


รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของสารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์ [19]

2.5.3 สารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds)

สารประกอบฟีนอลเป็นสารที่พบได้ตามธรรมชาติในพืชหลายชนิด เช่น ผัก ผลไม้ เครื่องเทศ สมุนไพร ถั่วเมล็ดแห้ง เมล็ดธัญพืช ซึ่งสารประกอบฟีนอลจัดได้ว่าเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ดี โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบฟีนอลประกอบไปด้วยวงแหวนที่เป็นอนุพันธ์ของวงแหวนเบนซีนที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) ต่ออยู่อย่างน้อย 1 หมู่ โดยสารประกอบฟีนอลสามารถพบได้หลาย

ชนิดในธรรมชาติ ซึ่งจะมีโครงสร้างทางเคมีที่ต่างกันออกไป เช่น กรดฟีนอลิก (Phenolic acid) และสารประกอบพวกฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.8 นอกจากนี้สารประกอบฟีนอลที่พบในพืชมักจะรวมอยู่ในโมเลกุลของน้ำตาลในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ (Glycoside) โดยน้ำตาลที่พบมากที่สุดในสารประกอบฟีนอลคือน้ำตาลกลูโคส และพบว่าอาจเกิดการรวมตัวกันระหว่างสารประกอบฟีนอลด้วยกันเอง หรือเกิดจากสารประกอบฟีนอลกับสารชนิดอื่น เช่น กรดอินทรีย์รวมอยู่ในโมเลกุลของโปรตีน แอลคาลอยด์ และเทอร์พีนอยด์ เป็นต้น [20]



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของสารประกอบฟีนอล [20], [21]

2.5.4 พอลิฟีนอล (Polyphenol)

พอลิฟีนอลจัดเป็นสารที่อยู่ในกลุ่มของสารประกอบฟีนอล มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic ring) ที่มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) รวมอยู่ในโมเลกุลซึ่งมีวงแหวนเบนซีนตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป พอลิฟีนอลเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่จัดเป็นไฟโตเคมิคัล (Phytochemical) ที่สังเคราะห์โดยพืช ประกอบด้วย Bioflavonoids เช่น Anthocyanins, Coumestanes, Flavonoids, Isoflavonoids และ Stilbenes เป็นต้น ซึ่งสูตรโครงสร้างของสาร Anthocyanins จะแสดงดังรูปที่ 2.9 [22]

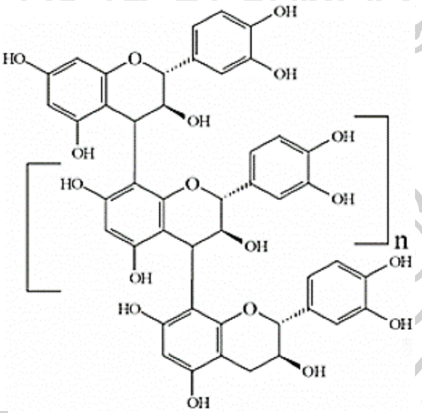
รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของ Anthocyanins ที่เป็นสารพอลิฟีนอล [23]

2.6 สารสกัดจากพืช

สารสกัดจากพืชเป็นสารที่ประกอบไปด้วยสารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) จำนวนมาก ซึ่งมีความสามารถในการเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant agents) โดยตัวอย่างของสารสกัดจากพืช ได้แก่

2.6.1 สารสกัดจากเมล็ดองุ่น

องุ่น (*Vitis vinifera*) เป็นพืชที่อยู่ในสายพันธุ์ *Vitis* มีถิ่นกำเนิดในแถบภูมิภาคเมดิเตอร์เรเนียน ยุโรปกลาง และเอเชียตะวันออกกลาง แต่ในปัจจุบันได้มีการปลูกองุ่นในพื้นที่เขตร้อนด้วย เถาวัลย์ขององุ่นเลื้อยได้ยาวถึง 35 หลา (32 เมตร) เปลือกเป็นชั้น ๆ ใบจะแยกอยู่เดี่ยวมีลักษณะคล้ายมือ ผลที่ได้จะเป็นพวงซึ่งในช่วงฤดูเก็บเกี่ยวจะมีความใหญ่เป็นพิเศษ [24] โดยในเมล็ดองุ่นประกอบไปด้วยสารสำคัญคือ Oligomeric proanthocyanidin complexes (OPCs) ดังรูปที่ 2.10 ซึ่ง OPCs นี้จัดอยู่ในกลุ่ม Bioflavonoids ที่เป็นสารประเภทพอลิฟีนอล และถือได้ว่าเป็นสารต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพสูง (Super antioxidant) เนื่องจากมีอนุภาพสูงกว่าวิตามินซี 20 เท่า และสูงกว่าวิตามินอี 50 เท่า นอกจากนี้พบว่า OPCs ที่สกัดได้จากเมล็ดองุ่นจะมีปริมาณสูงถึง 80 - 95% จึงทำให้จับกับอนุมูลอิสระได้ดี รวมถึงต้านอนุมูลอิสระได้หลายหลายรูปแบบ [25]

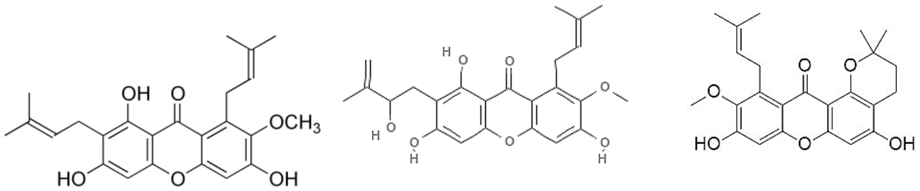


รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของ Proanthocyanidin [24]

2.6.2 สารสกัดจากเปลือกมังคุด

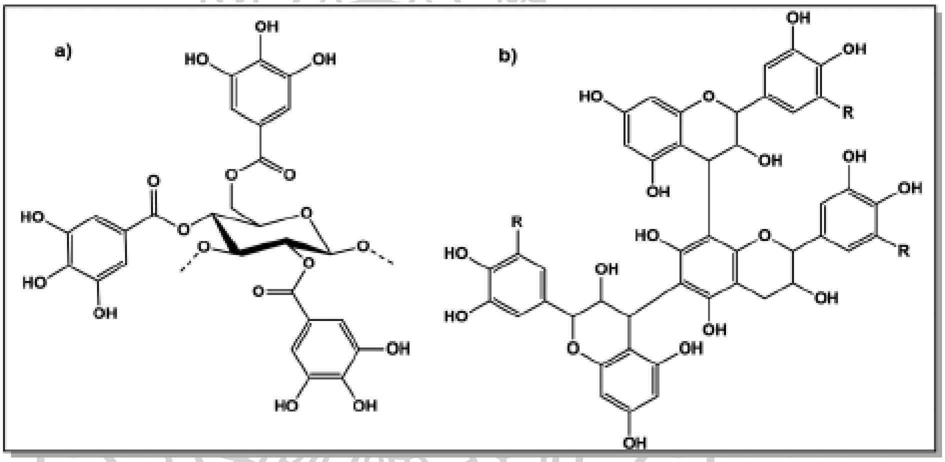
มังคุด (Mangosteen) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Garcinia mangostana Linn.* มีถิ่นกำเนิดบริเวณคาบสมุทรมลายู โดยในเปลือกมังคุดจะประกอบด้วยสารสำคัญ 2 กลุ่มใหญ่คือ กลุ่มแซนโธน (Xanthone) และกลุ่มของแทนนิน (Tannin) ซึ่งจัดเป็นสารที่มีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ [26]

ในกลุ่มของ Xanthone ประกอบไปด้วยอนุพันธ์ที่หลากหลาย ได้แก่ Mangostin, Mangostenol, 1-isomangostin และ Mangostintriacetate โดยตัวอย่างโครงสร้างของสารในกลุ่ม Xanthone จะแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงโครงสร้างของ Mangostin, Mangostenol และ 1-isomangostin ตามลำดับ [27], [28], [29]

ในกลุ่มของ Tannin จะประกอบไปด้วย Gallic acid ที่เกิดจากการ Hydrolyse ของ Tannin ดังรูปที่ 2.12 (a) และ Condensed tannin หรือ Proanthocyanidins ดังรูปที่ 2.12 (b) [30]

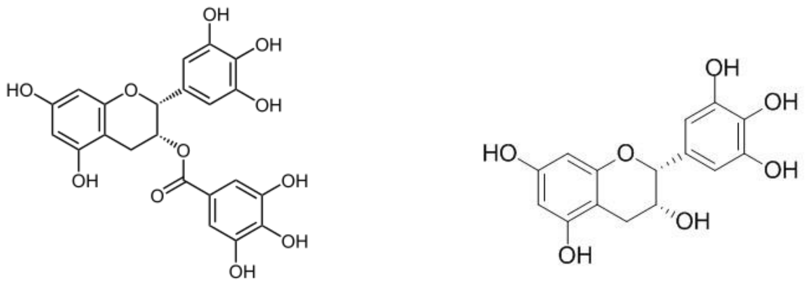


รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของ Tannin [31]

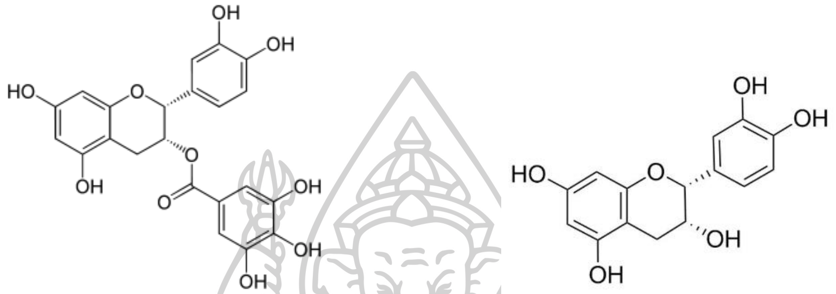
2.6.3 สารสกัดจากชาเขียว

สารสกัดจากชาเขียว สกัดจากต้นชาสายพันธุ์ *Camellia sinensis* ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่มี Flavonoids สูงถึง 30% ของน้ำหนักใบชาแห้ง เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพ โดยสารสำคัญหลักในชาเขียวคือ Polyphenols และ Catechins [32]

ใน Catechins ประกอบไปด้วยอนุพันธ์หลายชนิด คือ EGCG (Epigallocatechin-3-gallate), EGC (Epigallocatechin), ECG (Epicatechin gallate), EC (Epicatechin), GC (Gallocatechin) และ C (Catechin) ซึ่งแสดงโครงสร้างของสารดังรูปที่ 2.13 และ 2.14



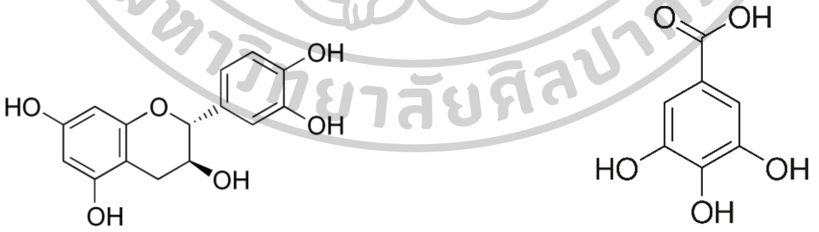
รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างของ EGCG และ EGC ตามลำดับ [33], [34]



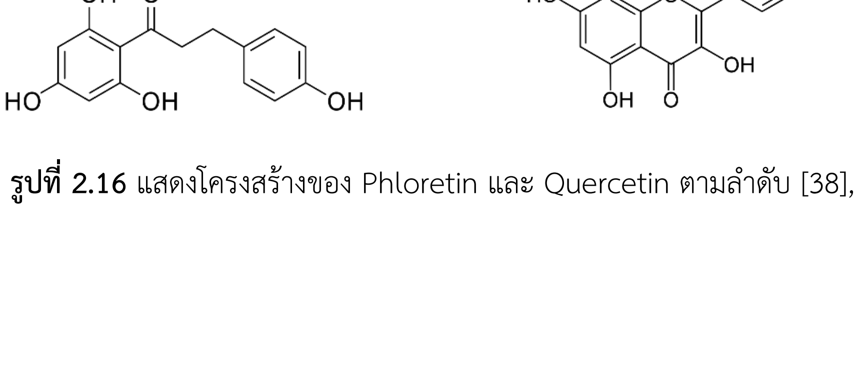
รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างของ ECG และ EC ตามลำดับ [34]

2.6.4 สารสกัดจากแอปเปิล

แอปเปิลเป็นพืชในสกุล ROSACEAE มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Malus domestica* ลักษณะต้นและใบเป็นไม้เนื้อแข็ง รูปร่างของยอดที่เจริญเต็มวัยจะแตกต่างไปตามชนิดและตามพันธุ์ โดยในแอปเปิลจะประกอบไปด้วยสารประเภท polyphenols ที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ คือ Catechin, Gallic acid, Phloretin และ Quercetin ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และ 2.16 [35]



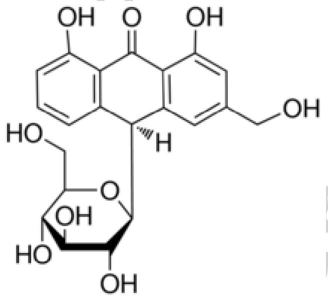
รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างของ Catechin และ Gallic acid ตามลำดับ [36], [37]



รูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างของ Phloretin และ Quercetin ตามลำดับ [38], [39]

2.6.5 สารสกัดจากว่านหางจระเข้

ว่านหางจระเข้เป็นพืชในวงศ์ Aloaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Aloe vera* (L.) Burm.f. หรือชื่อพ้องคือ Aloe barbadensis Mill. มีลักษณะเป็นไม้ล้มลุก ลำต้นสั้นและมีใบซ้อนกันเป็นกอ ด้านการใช้งานมักใช้วุ้นใสจากใบสดในด้านการรักษาโรค เนื่องจากมีสรรพคุณในการลดการอักเสบของแผล หรือในอีกด้านหนึ่งคือการนำมาบริโภค เนื่องจากในวุ้นใสจากใบว่านหางจระเข้ประกอบไปด้วยสารสำคัญในกลุ่ม Anthraquinone คือ Aloin ที่เป็นสารประเภท polyphenols ที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ [40], [41] โดยโครงสร้างของ Aloin แสดงดังรูปที่ 2.17

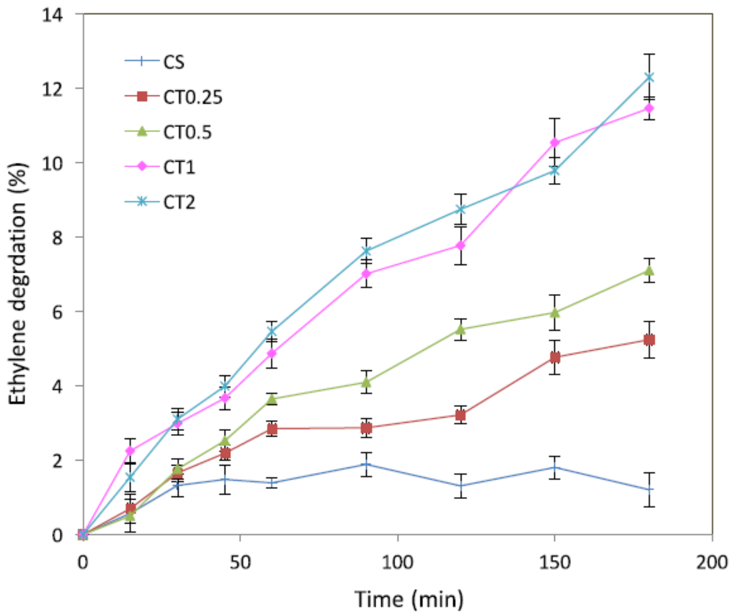


รูปที่ 2.17 แสดงโครงสร้างของ Aloin [42]

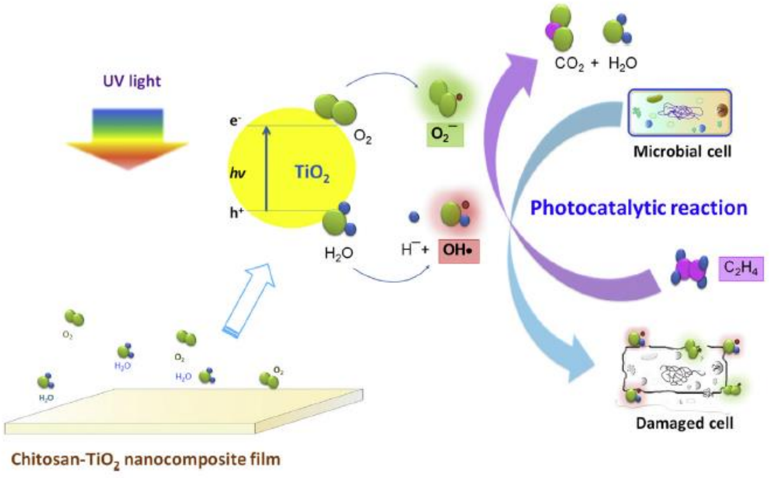
2.7 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Review of related literature)

จากงานวิจัยของ Raja Venkatesan และคณะ [4] ได้ศึกษาผลของการเตรียมฟิล์มคอมพอสิตระหว่าง Poly(butylene adipate-co-terephthalate: PBAT) และ TiO_2 nanoparticle สำหรับประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร ในการเตรียมฟิล์มจะใช้วิธีการ Solvent casting โดยเตรียมเป็นสารละลายพอลิเมอร์ของ PBAT จากนั้นผสม TiO_2 nanoparticle ในปริมาณ 1, 3, 5, 7 และ 10 % wt แล้วจึงขึ้นรูปเป็นฟิล์ม และนำฟิล์มที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการซึมผ่าน และความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรีย จากผลการทดลองพบว่าการเติม TiO_2 nanoparticle ในปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น รวมถึงช่วยเพิ่มระดับความเป็นผลึกให้แก่ PBAT composites ในด้านการซึมผ่านพบว่าฟิล์มมีอัตราการซึมผ่านของน้ำและก๊าซออกซิเจนลดลง เนื่องจาก TiO_2 nanoparticle จะช่วยขัดขวางการแพร่ผ่านของความชื้นและก๊าซใน Polymer matrix และจากการทดสอบความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียพบว่าการเติม TiO_2 nanoparticle สามารถช่วยต้านเชื้อแบคทีเรียได้ทั้ง *Staphylococcus aureus* (แกรมบวก) และ *Escherichia coli* (แกรมลบ) โดยจะเห็นได้ชัดในการเติม TiO_2 nanoparticle 10 % wt (PT-10) ที่มีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียสูงที่สุด

จากงานวิจัยของ Ubonrat Siripatrawan และคณะ [5] ได้ศึกษาการขึ้นรูปและพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มคอมพอสิตระหว่าง Chitosan และ TiO_2 nanopowders เพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่ช่วยลดปริมาณเอทิลีนและต้านเชื้อแบคทีเรีย ในการเตรียมฟิล์มจะใช้วิธีการ Solvent casting โดยเตรียมเป็นสารละลายพอลิเมอร์ของไคโตซาน จากนั้นจึงทำการเติม TiO_2 nanopowders ลงไปในปริมาณ 0.25, 0.5, 1 และ 2 % w/w แล้วจึงขึ้นรูปเป็นฟิล์ม ฟิล์มที่ได้จะถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติการซึมผ่าน การสลายตัวของ Ethylene (Ethylene photodegradation) และความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรีย จากผลการทดลองพบว่าการเติม TiO_2 nanopowders ส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นและอัตราการซึมผ่านของน้ำมีค่าลดลง แต่เมื่อเติมในปริมาณที่มากเกินไปคือ 2 %w/w จะทำให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลต่ำลง และทำให้อัตราการซึมผ่านของน้ำมากขึ้น เนื่องจากเกิดการรวมกลุ่มกันของ TiO_2 จากการทดสอบการสลายตัวของ Ethylene พบว่าการสลายตัวของ Ethylene ใน Chitosan-TiO_2 nanocomposite films มีค่ามากขึ้นเมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณที่มากขึ้น ดังรูปที่ 2.18 และสามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 แสดง Ethylene photocatalytic degradation ของ Chitosan (CS) และ Chitosan-TiO_2 (CT) nanocomposite films ที่มีการเติม TiO_2 0.25, 0.5, 1 และ 2% (CT0.25, CT0.5, CT1 และ CT2 ตามลำดับ) [5]

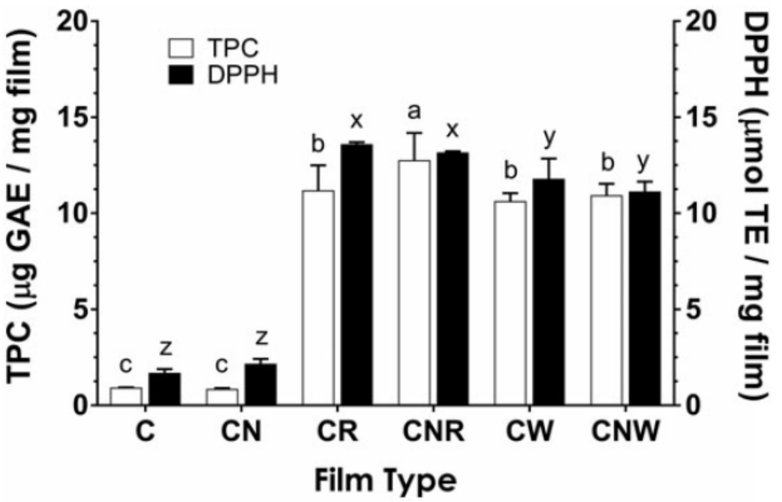


รูปที่ 2.19 แสดงกลไกการสลายตัวของ Ethylene ด้วยการใช้แสงและความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียของ Chitosan-TiO_2 nanocomposite film [5]

จากรูปที่ 2.19 เป็นรูปที่ใช้อธิบายกลไกการสลายตัวของ Ethylene โดยเมื่อ TiO_2 ได้รับการกระตุ้นด้วยแสง UV นั้นจะเกิด Electrons บนผิวของ TiO_2 แล้วจะเกิดการย้ายจาก Valence band ไปสู่ Conduction band ซึ่งจะทำให้เกิดเป็น Electron-hole pairs ใน Valence band จากนั้นตัว Positive hole (h^+) จะทำปฏิกิริยากับน้ำหรือ Hydroxide ions (OH^-) ที่ดูดซับอยู่บนผิวของ TiO_2 ทำให้เกิดเป็น Highly reactive hydroxyl radicals (OH•) นอกจากนี้ electron (e-) จะเข้าไป Reduce oxygen ทำให้ได้เป็น Superoxide ions (O_2^-) ซึ่ง O_2^- และ OH• จะเป็น Strong reactive oxygen species (ROS) ที่สามารถ Oxidize ethylene ให้กลายเป็น Carbon dioxide และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย ดังนั้นการสลายตัวของ Ethylene ที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นผลมาจากการเติม TiO_2 ในปริมาณที่มากขึ้น จึงทำให้มีประสิทธิภาพของการดูดซับรวมถึงมี ROS มากขึ้นนั่นเอง และจากการทดสอบความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียพบว่า TiO_2 สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้ทั้ง Gram-positive, Gram-negative bacteria และเชื้อรา เนื่องจากเมื่อได้รับแสง TiO_2 ใน nanocomposite จะเกิด Photocatalytic reaction และเกิดเป็น ROS ที่เข้าไป Oxidize polyunsaturated phospholipids ของ Microbial cell membranes ในแบคทีเรีย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเซลล์และทำให้เซลล์ตายในที่สุด

จากงานวิจัยของ Yixiang Xu และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์ม Composites โดยการเติม Cellulose nanocrystal (CNC) และสารสกัดจากกากองุ่น (Grape pomace extract: GPE) 2 ชนิด คือ Cabernet Franc (CF; สายพันธุ์สีแดง) และ Viognier (VN; สายพันธุ์สีขาว) ลงใน

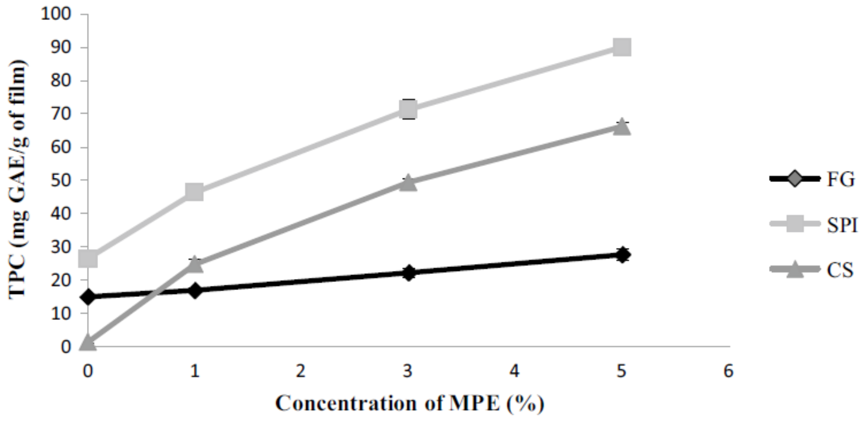
Chitosan matrix ในการเตรียมฟิล์มจะใช้วิธี Solvent casting โดยการเติม CNC และ GPE ลงในสารละลายพอลิเมอร์ของ Chitosan แล้วจึงขึ้นรูปเป็นฟิล์ม ฟิล์มที่ได้จะนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการซึมผ่าน ปริมาณฟีนอลิกรวม (Total phenolic content: TPC) และความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant activity) จากผลการทดลองพบว่าการเติมสารสกัดจากกากองุ่นส่งผลให้ค่า Tensile strength ลดลง ค่า % Elongation at break เพิ่มขึ้น อัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น รวมถึงมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ลดลง เนื่องจากสารสกัดจากกากองุ่นทำหน้าที่คล้ายกับ Plasticizer ให้แก่ฟิล์ม จากการวัดปริมาณฟีนอลิกรวม (TPC) และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH) ดังรูปที่ 2.20 พบว่าฟิล์มที่เติมสารสกัดจากกากองุ่นจะมีปริมาณฟีนอลิกรวมที่สูงขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณฟีนอลิกรวม ดังนั้นฟิล์มที่มีการเติมสารสกัดจากกากองุ่นจะสามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้แก่ฟิล์มและสามารถต้านอนุมูลอิสระได้



รูปที่ 2.20 แสดงปริมาณฟีนอลิกรวมและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์มไคโตซานคอมพอสิต (C: chitosan film; CN: chitosan-CNC; CR: chitosan-CF; CNR: chitosan-CNC-CF; CW: chitosan-VN; CNW: chitosan-CNC-VN) [10]

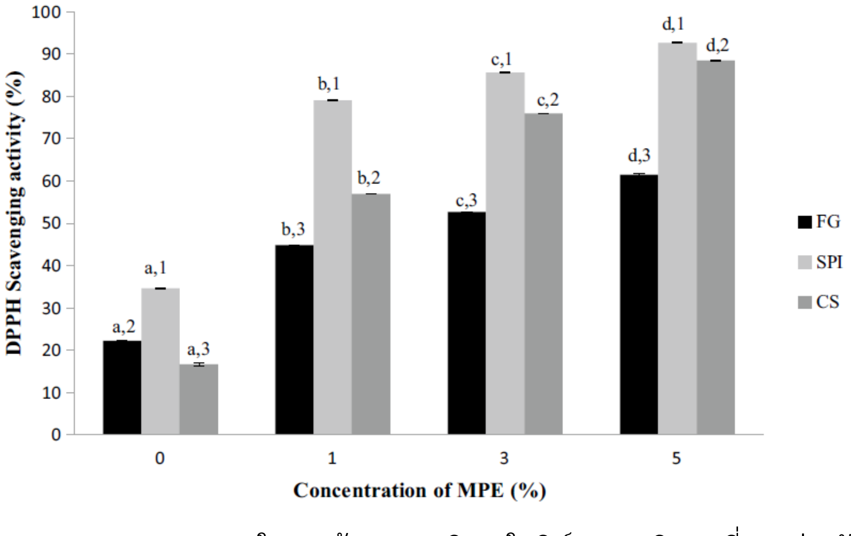
จากงานวิจัยของ Bakar Nabilah และคณะ [43] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมสารสกัดจากเปลือกมังคุด (Mangosteen pericarp extract: MPE) ที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระลงใน Matrix ที่ต่างกัน 3 ชนิด คือ Fish gelatin (FG), Soy protein isolates (SPI) และ Corn starch (CS) โดยจะทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยวิธี Solvent casting ซึ่งมีการเติม MPE ในปริมาณที่ต่างกันคือ 1,

3, และ 5 %w/w จากนั้นนำฟิล์มไปทดสอบปริมาณฟีนอลิกรวม (Total phenolic content: TPC) และความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant activity) จากผลการทดลองพบว่าฟิล์มทุกชนิดที่มีการเติมสารสกัดจากเปลือกมังคุดจะมีปริมาณฟีนอลิกรวมที่สูงขึ้น ซึ่งปริมาณฟีนอลิกรวมจะแปรผันตรงกับปริมาณของสารสกัดจากเปลือกมังคุดที่เติมลงไป ดังรูปที่ 2.21



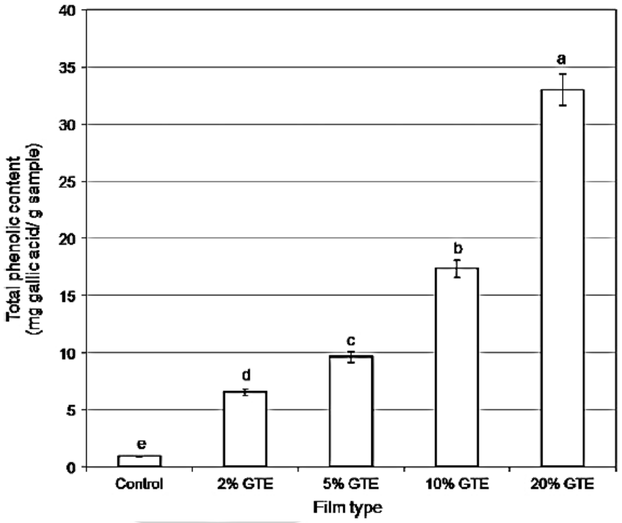
รูปที่ 2.21 แสดงปริมาณฟีนอลิกรวมในฟิล์มและปริมาณที่แตกต่างกัน [43]

และจากการทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระพบว่า ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณฟีนอลิกรวมซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณสารสกัดจากเปลือกมังคุดที่เติมลงไป ดังนั้นเมื่อปริมาณฟีนอลิกรวมสูงขึ้นจะส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.22

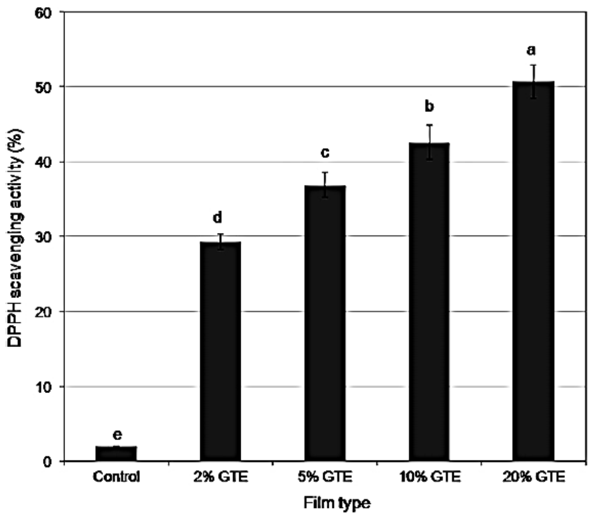


รูปที่ 2.22 แสดงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระในฟิล์มและปริมาณที่แตกต่างกัน [43]

จากงานวิจัยของ Ubonrat Siripatrawan และคณะ [44] ได้ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มที่มีการเติมสารสกัดจากชาเขียว (Green tea extract: GTE) ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ลงใน Chitosan matrix โดยทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยวิธี Solvent casting ซึ่งใช้สารสกัดจากชาเขียวในปริมาณที่ต่างกัน คือ 2, 5, 10 และ 20 %w/v แล้วนำฟิล์มที่ได้มาทดสอบปริมาณฟีนอลิกรวม (Total phenolic content: TPC) และความสามารถในการต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant activity) จากผลการทดลองพบว่าการเติมสารสกัดจากชาเขียวในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้มีปริมาณฟีนอลิกรวมที่มากขึ้น ดังรูปที่ 2.23 เนื่องจากในชาเขียวจะประกอบไปด้วยสารสำคัญเช่น Catechin, Theaflavins และ Thearubigins ซึ่งจัดเป็นสารประกอบฟีนอลิกที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และพบว่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์มมีผลที่สอดคล้องกับผลของปริมาณฟีนอลิกรวม ดังนั้นเมื่อเติมสารสกัดจากชาเขียวในปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 2.24

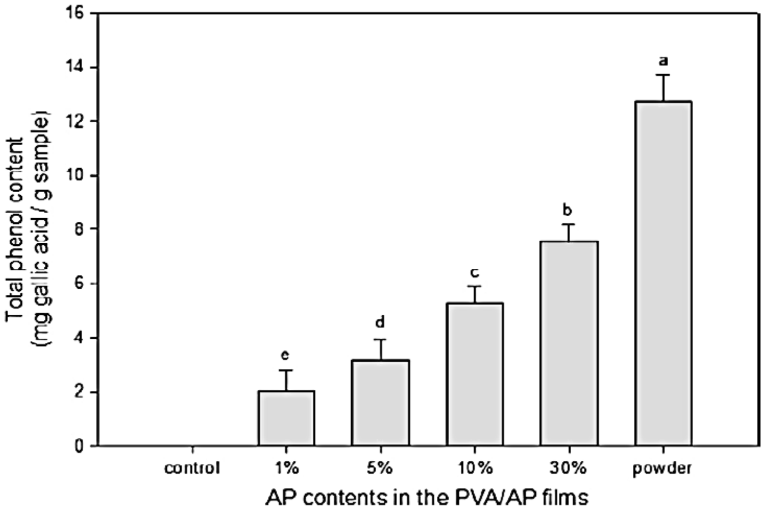


รูปที่ 2.23 แสดงปริมาณฟีนอลิกรวมของฟิล์ม Chitosan ที่มีการเติมสารสกัดจากชาเขียว [44]



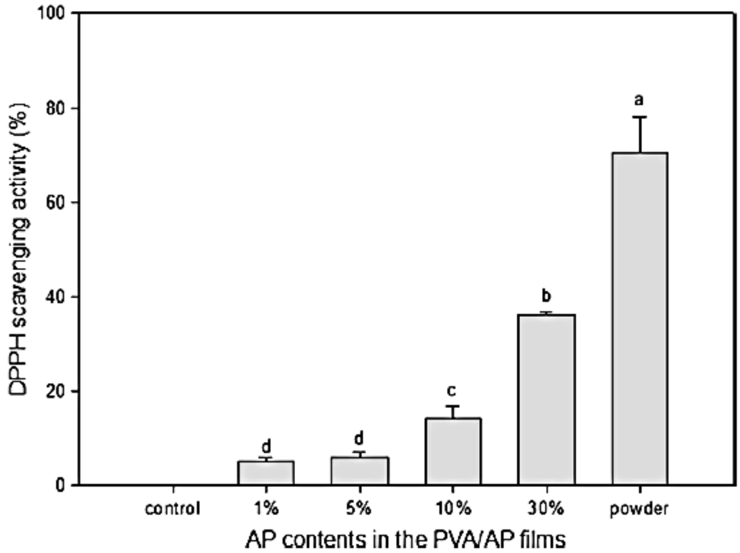
รูปที่ 2.24 แสดงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม Chitosan ที่มีการเติมสารสกัดจากชาเขียว [44]

จากงานวิจัยของ Kirtiraj K. Gaikwad [11] และคณะ ได้ทำการศึกษาและพัฒนาฟิล์มโดยการเติมกากแอปเปิล (Apple pomace: AP) ที่ประกอบด้วยสารต้านอนุมูลอิสระลงใน Polyvinyl alcohol (PVA) matrix เพื่อใช้เป็น Active food packaging โดยจะทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยวิธี Solvent casting ซึ่งมีการเติมกากแอปเปิลในปริมาณที่ต่างกันคือ 1, 5, 10 และ 30 %w/w จากนั้นนำฟิล์มที่ได้มาทดสอบปริมาณฟีนอลิกรวม (Total phenolic content: TPC) และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant activity) จากผลการทดลองพบว่า การเติมกากแอปเปิลลงในฟิล์ม PVA ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีปริมาณฟีนอลิกรวมที่มากขึ้น ดังรูปที่ 2.25 เนื่องจากในแอปเปิลประกอบไปด้วยสารสำคัญประเภท Polyphenol และ Procyanidins ซึ่งจัดเป็นสารประกอบฟีนอลิกที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ



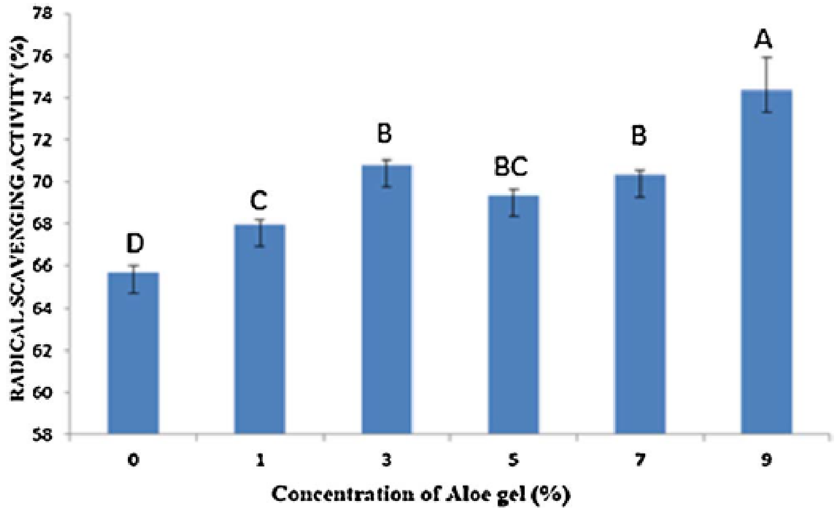
รูปที่ 2.25 แสดงปริมาณฟีนอลิกรวม (Total Phenolic content) ของ PVA/AP films เมื่อเติม AP ในปริมาณที่ต่างกัน [11]

และจากการทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์มพบว่า ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเป็นสัดส่วนกับปริมาณฟีนอลิกรวม ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณของกากแอปเปิลที่เติมลงไป ดังนั้นเมื่อเติมกากแอปเปิลในปริมาณที่มากขึ้น จะยิ่งส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่สูงขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.26

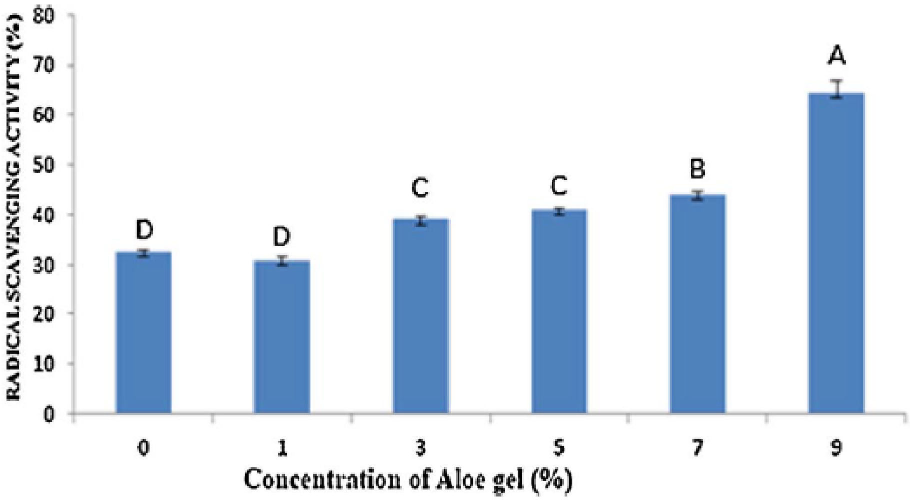


รูปที่ 2.26 แสดงความสามารถในการดักจับอนุมูลอิสระ DPPH (DPPH radical scavenging activity) ของฟิล์ม PVA/AP ที่มีการเติม AP ในปริมาณต่างกัน [11]

จากงานวิจัยของ S. Sui Chin และคณะ [12] ได้ทำการศึกการการเตรียมฟิล์มคอมพอสิตเพื่อทำเป็นบรรจุภัณฑ์ โดยการนำเจลว่านหางจระเข้ (Aloe gel) มาผสมกับ Fish gelatin ในปริมาณที่ต่างกันคือ 1, 3, 5, 7 และ 9 % wt/wt โดยทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธี Solution casting จากนั้นนำฟิล์มที่ได้มาทดสอบสมบัติทางกายภาพและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant activity) ด้วยวิธี DPPH และ ABTS ซึ่งผลการทดลองพบว่าค่า Tensile strength ของฟิล์มมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระทั้งวิธี DPPH และ ABTS พบว่าการเติมเจลว่านหางจระเข้ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้มากขึ้นทั้งวิธี DPPH และ ABTS เนื่องจากในเจลว่านหางจระเข้มีสารสำคัญที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ นั่นคือสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds) ดังนั้นเมื่อเติมเจลว่านหางจระเข้มากขึ้น ก็จะส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้มากขึ้น ดังรูปที่ 2.27 และ 2.28



รูปที่ 2.27 แสดงความสามารถในการดักจับอนุมูลอิสระ DPPH (DPPH radical scavenging activity) ของฟิล์มเจลาตินที่มีการเติมเจลว่านหางจระเข้ในปริมาณ 0-9% [12]



รูปที่ 2.28 แสดงความสามารถในการดักจับอนุมูลอิสระ ABTS (ABTS radical scavenging activity) ของฟิล์มเจลาตินที่มีการเติมเจลว่านหางจระเข้ในปริมาณ 0-9% [12]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องชั่งสาร
2. ตู้อบสาร
3. Hot plate
4. อลูมิเนียมฟอยล์
5. บีกเกอร์
6. ขวดรูปชมพู่
7. กระบอกตวง
8. หลอดทดลอง
9. ตะแกรงใส่หลอดทดลอง
10. แท่งแก้วคนสาร
11.ช้อนตักสาร
12. ปิเปต
13. ลูกยางปิเปต
14. ไมโครปิเปต
15. จานเพาะเชื้อ (Petri dish)
16. ตะเกียงแอลกอฮอล์
17. เข็มเขี่ยเชื้อปลายกลม (Loop)
18. เครื่อง UV สำหรับฆ่าเชื้อ
19. ตู้บ่มเชื้อ (Incubator)
20. เครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave)

มหาวิทยาลัยศิลปากร

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. เม็ดพลาสติก Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)

ผู้ผลิต : BASF

เกรด : Ecoflex® F Blend C1200

MFR : 2.7 - 4.9 g/ 10 min

Melting point : 110 - 120 °C

2. Titanium dioxide

สูตรเคมี : TiO_2

น้ำหนักโมเลกุล : 79.87

ลักษณะ : ผง

ขนาดอนุภาค : ต่ำกว่า 325 mesh (ต่ำกว่า 45 µm)

ปริมาณ : 1000 กรัม

ผู้ผลิต : SIGMA-ALDRICH

3. สารสกัดจากเจลว่านหางจระเข้

ลักษณะ : ผงสีขาว

ขนาดอนุภาค : ต่ำกว่า 40 µm

ปริมาณ : 500 กรัม

ผู้ผลิต : ASIAN BIOPLEX

4. สารสกัดจากแอปเปิ้ล

ลักษณะ : ผงสีเหลืองอ่อน

ขนาดอนุภาค : ต่ำกว่า 40 µm

ปริมาณ : 500 กรัม

ผู้ผลิต : ASIAN BIOPLEX

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารสำคัญที่มีคุณสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียและต้านอนุมูลอิสระที่อยู่ในสารสกัดว่านหางจระเข้และสารสกัดแอปเปิล [40], [35]

Sample	Polyphenols (mg/500g)
สารสกัดว่านหางจระเข้ (AL)	0.00005
สารสกัดแอปเปิล (AP)	694.5

5. อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดแข็ง (Nutrient Agar)

ลักษณะ : ผงสีเหลือง

ปริมาณ : 500 กรัม

ผู้ผลิต : HiMedia Laboratories Pvt. Ltd.

6. อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดเหลว (Nutrient Broth)

ลักษณะ : ผงสีเหลือง

ปริมาณ : 500 กรัม

ผู้ผลิต : HiMedia Laboratories Pvt. Ltd.

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่องวัดความหนาของฟิล์ม (Micrometer)

2. เครื่องวัดการดูดกลืนแสงในช่วง UV-Visible spectroscopy รุ่น UV-1800 จากบริษัท Bara Scientific Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น

3. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) รุ่น Lab-X, XRD-6100 (CuK_{α}, λ = 1.5418 Å) จากบริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น

4. เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter, DSC) รุ่น DSC1 จากบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

5. เครื่องวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal Gravimetric Analyser, TGA) รุ่น TGA/DSC1 จากบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

6. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) ชื่อทางการค้า Instron โมเดล 5969 บริษัท Instron Engineering Corporation จากประเทศสหรัฐอเมริกา

7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ TESCAN รุ่น Mira3 จากบริษัท Czech Republic ประเทศมาเลเซีย

8. เครื่องทดสอบสมบัติการกั้นผ่านของก๊าซ (Gas Permeability Tester) รุ่น GDP-C-Gas Permeability Tester จากบริษัท Brugger feinmechanik จำกัด ประเทศเยอรมนี

3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน

1. เครื่องอัดรีดพลาสติกชนิดเกลียวคู่ (Twin Screw Extruder) รุ่น SHJ-25 จากบริษัท Yongteng ประเทศจีน โดยสกรูมีความยาวอยู่ที่ 360 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร และมีค่า L/D เท่ากับ 144

2. เครื่องอัดรีดขึ้นรูป (Cast film extruder) รุ่น LE 25-30/C จากบริษัท Labtech Engineering จำกัด ประเทศไทย

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การเตรียมฟิล์มจากวัสดุคอมพอสิตชีวภาพระหว่าง PBAT และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (PBAT/TiO_2 biocomposite)

1. นำเม็ดพลาสติก PBAT ไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. นำเม็ดพลาสติก PBAT ที่อบแล้ว มาผสมกับ TiO_2 ในอัตราส่วน 0.25, 0.50, 1.00 และ 3.00 % wt โดยใช้เครื่อง Twin screw extruder ที่อุณหภูมิในช่วง 110 - 160 °C ความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 45 rpm และใช้การหล่อเย็นด้วยอากาศ โดยสัดส่วนการผสมและชื่อย่อที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 3.3

3. นำเส้น Extrudate ไปตัดให้เป็นเม็ดเพื่อใช้สำหรับการขึ้นรูปฟิล์ม

4. นำเส้น Extrudate ที่ตัดแล้วไปขึ้นรูปด้วยเครื่อง Cast film extruder โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 110 – 160 °C ความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 26 rpm ความเร็ว Chill roll และ Nip roll เท่ากับ 1.4 และ 1.9 m/min ตามลำดับ

3.2.2 การทดสอบสมบัติของ PBAT/TiO_2 biocomposite

3.2.2.1ศึกษาความทึบแสงของฟิล์ม (Opacity of films)

การศึกษาความทึบแสงของฟิล์มสามารถทำได้ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 nm ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$\text{Opacity} = \frac{Abs_{600}}{X} \qquad \text{(สมการที่ 3.1)}$$

โดยที่ Abs_{600} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 nm

X คือ ความหนาของฟิล์มในหน่วย mm

3.2.2.2 ศึกษาโครงสร้างและความเป็นผลึกของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

การศึกษาโครงสร้างและความเป็นผลึกของฟิล์มสามารถทำได้โดยการตัดชิ้นงานให้มีขนาด 2 × 2 cm^2 วางบน glass slide ใช้การทดสอบด้วย Cu-K_α radiation โดยทดสอบในช่วง 10-80 องศา อัตราเร็วในการทดสอบ 5 องศาต่อนาที ปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20 มิลลิแอมแปร์ และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์

3.2.2.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC)

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลว (T_m) และปริมาณการเกิดผลึกของฟิล์ม (Percent crystallinity: X_c(%)) ซึ่งจะทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 200 °C ที่อัตรา 5 °C /min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งปริมาณผลึกสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.2

$$X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_m^{\circ} \times \emptyset} \times 100\ \% \qquad \text{(สมการที่ 3.2)}$$

โดย X_c คือ ปริมาณผลึก (Degree of crystallinity)

ΔH_m คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมผลึกต่อหนึ่งหน่วย (J/g)

ΔH_{cc} คือ พลังงานความร้อนที่ทำให้เกิดผลึกต่อหนึ่งหน่วย (J/g)

ΔH_m° คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมผลึก 100% (J/g)

และ $\emptyset$ คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่อยู่ในคอมพอสิต

3.2.2.4 ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์มPBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเครื่อง Thermal Gravimetric Analyser (TGA)

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่เริ่มสลายตัว (Onset Temperature) อุณหภูมิที่สลายตัวสูงสุด (Inflection point) อุณหภูมิที่สิ้นสุดการสลายตัว (End Temperature) และ % Weight loss ซึ่งจะทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 600 °C ที่อัตรา 10 °C /min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

3.2.2.5 ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite โดยการทดสอบสมบัติการดึงยืดด้วยเครื่อง Universal testing machine

การศึกษาสมบัติเชิงกลทำได้โดยใช้มาตรฐาน ASTM D882-02 โดยเตรียมฟิล์มตัวอย่างขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 1 x 4 นิ้ว^2 ขนาดของ gauge length เท่ากับ 2 นิ้ว ขนาด Load cell 5 กิโลนิวตัน และอัตราเร็วในการดึงชิ้นงาน 500 มิลลิเมตร/นาที

3.2.2.6 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานฟิล์มสามารถทำได้โดยการหักชิ้นงานใน Liquid Nitrogen เพื่อให้ชิ้นงานแข็งตัวและนำมาหักอย่างรวดเร็ว จากนั้นนำชิ้นงานมาเคลือบด้วยทอง แล้วทดสอบด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) โดยใช้ศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลวัตต์ที่กำลังขยาย 10000 เท่า (10000X)

3.2.2.7 ศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate: WVTR) โดยใช้เทคนิค Cup method แบบ Desiccant

การทดลองทำได้โดยเตรียมสารละลายอิ่มตัว NaCl ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใส่ลงใน Desiccator โดยให้มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ 75 % จากนั้นเตรียมถ้วยแก้วและวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปากถ้วยแก้ว แล้วจึงตัดฟิล์มทดสอบให้มีขนาดพอดีกับปากถ้วยแก้วคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 นิ้ว จากนั้นอบซิลิกาเจลแล้วจึงนำซิลิกาเจลใส่ลงในถ้วยแก้วให้มีปริมาณเท่ากันแล้วปิดปากถ้วยแก้วด้วยฟิล์มทดสอบและพันทับด้วยพาราฟินฟิล์ม บันทึกน้ำหนักถ้วยแก้วที่มีซิลิกาเจลและปิดด้วยแผ่นฟิล์มตอนเริ่มต้น จากนั้นนำถ้วยแก้วที่มีซิลิกาเจลและปิดด้วยแผ่นฟิล์มไปไว้ใน Desiccator แล้วบันทึกน้ำหนักของถ้วยแก้วทุกๆ 24 ชั่วโมงจนน้ำหนักของถ้วยแก้วคงที่ โดยอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.3

$$\text{WVTR} = \frac{\text{ความชันของกราฟ}\left(\text{น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป}\right)}{\text{พื้นที่หน้าตัดของฟิล์ม}} \qquad \text{(สมการที่ 3.3)}$$

โดยกำหนดพื้นที่หน้าตัดของฟิล์มเท่ากับ 1.552 x 10^{-3} m^2

3.2.2.8 ศึกษาอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของก๊าซ (Gas transmission rate, GTR)

โดยการเตรียมชิ้นงานฟิล์มให้มีขนาด 5x5 เซนติเมตร^2 แล้วนำฟิล์มมาติดลงบนฟอยล์ทดสอบสำหรับ GTR จากนั้นนำฟิล์มทดสอบใส่ลงในเครื่อง โดยใช้เวลาในการไล่อากาศ (Evacuation Period) 10 นาที และใช้เวลาในการทดสอบ (Test Period) 15 นาที โดยอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

$$\mathbf{OP = GTR \times L} \quad \text{(สมการที่ 3.4)}$$

โดย OP คือ อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ($mm.cm^3/m^2.day.bar$)

GTR คือ อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของก๊าซ (Gas Permeability Tester) ($cm^3/m^2.day.bar$)

L คือ ความหนาของฟิล์มตัวอย่าง (mm)

$$\mathbf{CP = GTR \times L} \quad \text{(สมการที่ 3.5)}$$

โดย CP คือ อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ($mm.cm^3/m^2.day.bar$)

GTR คือ อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่ได้จากเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของก๊าซ (Gas Permeability Tester) ($cm^3/m^2.day.bar$)

L คือ ความหนาของฟิล์มตัวอย่าง (mm)

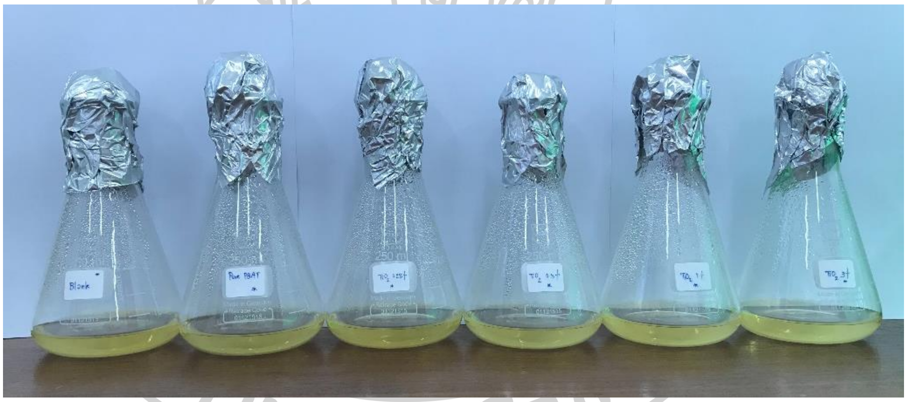
3.2.2.9 ศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Antimicrobial activity) โดยใช้แบคทีเรีย 2 ชนิดคือ *Staphylococcus aureus* (Gram-positive) และ *Escherichia coli* (Gram-negative)

1.) การเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อและสารละลายเจือจางสำหรับเลี้ยงเชื้อ

การเตรียมอาหารแข็ง (Nutrient Agar: NA) ทำได้โดยการนำ NA 16.8 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 600 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ นำสารละลายที่ได้มาแบ่งใส่ขวดรูปชมพู่ 2 ขวด ขวดละ 300 มิลลิลิตร แล้วปิดปากขวดด้วยสำลีและอลูมิเนียมฟอยล์ จากนั้นนำไปฆ่าเชื้อ (Sterilize) ด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 121˚C เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นรอให้เครื่องมีอุณหภูมิลดลงถึงประมาณ 60˚C แล้วจึงนำขวดรูปชมพู่ออกมา นำปากขวดลนไฟด้วยตะเกียงแอลกอฮอล์ และเทลงในจานเพาะเชื้อ (Petri dish) จานละประมาณ 10 มิลลิลิตร และหมุนจานเบาๆเพื่อให้อาหารกระจาย

ทั่วและสม่ำเสมอในจานเพาะเชื้อ รอให้อาหารเย็นตัวลงและแข็งตัวจึงคว่ำจานเพาะเชื้อและเรียงใส่ในถุงร้อนแล้วนำเก็บในตู้เย็นก่อนการใช้งาน

การเตรียมอาหารเหลว (Nutrient Broth: NB) ทำได้โดยการนำ NB 13 กรัมละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 1000 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ จากนั้นใช้แท่งแก้วคนจนอาหารละลาย แล้วแบ่งอาหารเหลวออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเทใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ขวดละ 50 มิลลิลิตร โดยจะเทลงในขวดตามจำนวนตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ (1 ขวด : 1 ตัวอย่าง) ปิดปากขวดด้วยสำลีและอลูมิเนียมฟอยล์ จากนั้นนำอาหารส่วนที่สองมาปิเปตใส่หลอดทดลอง หลอดละ 5 มิลลิลิตร จากนั้นปิดหลอดทดลองด้วยฝาพลาสติกและอลูมิเนียมฟอยล์ จากนั้นนำขวดรูปชมพู่และหลอดทดลองที่มีอาหารเหลวไปฆ่าเชื้อ (Sterilize) ด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 121˚C เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นรอให้เครื่องมีอุณหภูมิลดลงถึงประมาณ 60˚C แล้วจึงนำขวดรูปชมพู่และหลอดทดลองออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อหลอดทดลองเย็นตัวจึงนำไปเก็บในตู้เย็นก่อนการใช้งาน

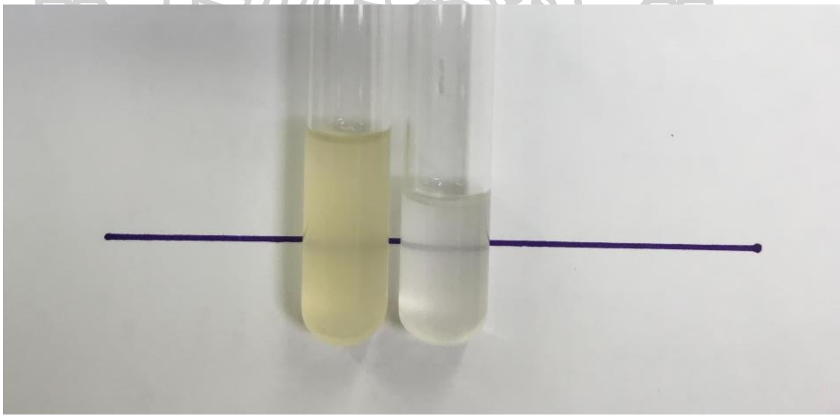


รูปที่ 3.1 แสดงอาหารเหลวที่ผ่านการ Sterilize

การเตรียมสารละลายเจือจางโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.85 เปอร์เซ็นต์ ทำได้โดยการนำ NaCl (99 เปอร์เซ็นต์) 8.59 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 1000 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ จากนั้นใช้แท่งแก้วคนจนอาหารละลาย และปิเปตใส่หลอดทดลองหลอดละ 4.5 มิลลิลิตร โดย 1 ตัวอย่างการทดสอบจะใช้สารละลายเจือจาง 9 หลอด จากนั้นปิดหลอดทดลองด้วยฝาพลาสติกและอลูมิเนียมฟอยล์ นำหลอดทดลองไปฆ่าเชื้อ (Sterilize) ด้วยเครื่องนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 121˚C เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นรอให้เครื่องมีอุณหภูมิลดลงถึงประมาณ 60˚C แล้วจึงนำหลอดทดลองออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

การเตรียมเชื้อแบคทีเรีย ทำได้โดยการนำเข็มเขี่ยเชื้อปลายกลม (Loop) มาลนไฟด้วยตะเกียงแอลกอฮอล์จนร้อนแดง จากนั้นนำไปแตะที่บริเวณอาหารใน stock เชื้อเพื่อให้ห่วงเย็นลง จากนั้นลากเชื้อแบคทีเรียจำนวน 1 ห่วง (1 loop) ใส่ลงในหลอด NB ซึ่งการเปิดหรือปิดฝาหลอดทดลองทุกครั้งจะต้องนำปากหลอดทดลองลนไฟก่อนทุกครั้งเพื่อเป็นการฆ่าเชื้อ จากนั้นนำหลอดทดลองไปใส่ในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง

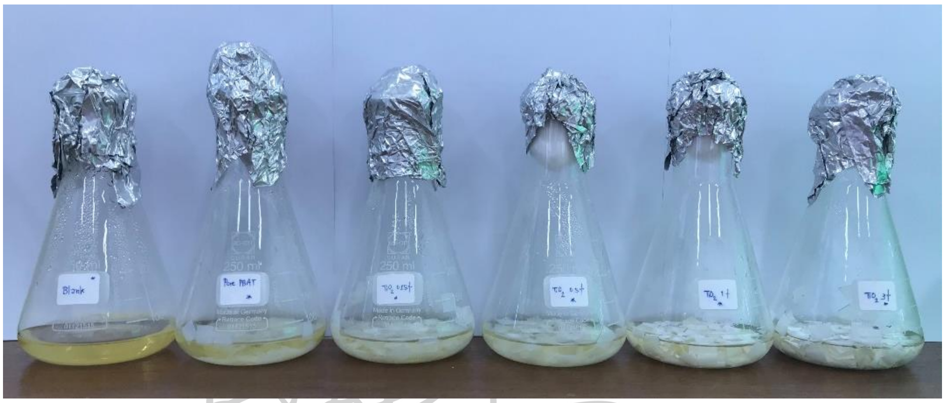
งานวิจัยนี้ใช้แบคทีเรียประมาณ 3×10^8 cfu/ml ตามวิธีของ McFARLAND SCALE ลำดับที่ 1 เพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบความขุ่นของเชื้อแบคทีเรียที่เพาะได้ ซึ่งการเตรียมสารละลายของ McFARLAND SCALE ลำดับที่ 1 ทำได้โดยนำแบเรียมคลอไรด์ ($BaCl_2$) 1 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร มาผสมกับกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) 1 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 9.9 มิลลิลิตรในหลอดทดลองและปิดฝาให้สนิท โดยต้องเขย่าสารละลายให้เข้ากันก่อนเปรียบเทียบทุกครั้ง จากนั้นนำหลอดทดลองที่มีเชื้อและผ่านการบ่มแล้วมาปั่นเหวี่ยง แล้วใช้ไมโครปิเปตดูดมาใส่หลอดทดลองที่มีเพียง NB โดยจะทำการหยดไปเรื่อยๆจนกว่าหลอด NB จะมีความขุ่นเท่ากับหลอดของ McFARLAND SCALE ลำดับที่ 1 ซึ่งเราสามารถเทียบความขุ่นได้โดยการนำปากกาขีดลงบนกระดาษสีขาว จากนั้นนำหลอดทดลองที่มีเชื้ออยู่ใน NB และหลอดของ McFARLAND SCALE ลำดับที่ 1 มาวางไว้หน้ากระดาษที่ขีดเส้นไว้ แล้วทำการเปรียบเทียบความขุ่นให้อยู่ในระดับเดียวกัน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบความขุ่นของแบคทีเรียที่เพาะได้เทียบกับ McFARLAND SCALE ลำดับที่ 1

การเตรียมฟิล์มตัวอย่างและการบ่มเชื้อ ทำได้โดยการนำฟิล์มตัวอย่าง 3 กรัม มาตัดให้มีขนาดเท่ากัน จากนั้นนำฟิล์มที่ตัดแล้วใส่จานเพาะเชื้อแล้วนำไปฆ่าเชื้อด้วยรังสี UV ด้านละ 15 นาที

เมื่อครบเวลานำฟิล์มที่ได้มาใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มี NB 50 มิลลิลิตร (1 ขวด : 1 ตัวอย่างทดสอบ) โดยก่อนและหลังใส่ฟิล์มทุกครั้งต้องนำปากขวดไปลนไฟเพื่อเป็นการฆ่าเชื้อด้วย รวมถึงต้องนำ forcepts มาลนไฟด้วยทุกครั้งเช่นกันก่อนที่จะคีบฟิล์มใส่ลงไปในขวดรูปชมพู่ ดังรูปที่ 3.3 จากนั้นนำไมโครปิเปตดูดเชื้อแบคทีเรีย (ที่ทำการเทียบ McFARLAND SCALE ลำดับที่ 1) ปริมาตร 200 ไมโครลิตรใส่ลงในขวด เขย่าขวดเพื่อให้เชื้อแบคทีเรียกระจายในขวดได้อย่างทั่วถึง แล้วนำขวดไปใส่ในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37˚C เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 แสดงการใส่ฟิล์มลงในอาหารเหลว (NB)

รูปที่ 3.4 แสดงการใส่ฟิล์มและเชื้อลงในอาหารเหลว (NB) และผ่านการบ่มแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

การทำ Dilution เป็นการเจือจางตัวอย่างเชื้อแบคทีเรียที่บ่มแล้ว โดยการทำให้เชื้อเจือจางลงครั้งละ 10 เท่า (10 fold serial dilutions) ในสารละลายเจือจางของโซเดียมคลอไรด์ที่เตรียมไว้ โดยในแต่ละตัวอย่างการทดสอบจะทำการ dilute ไม่เกิน 9 หลอด และเขียนเลขกำกับไว้ทุกหลอด เริ่มจากการปิเปตเชื้อแบคทีเรียจากขวดรูปชมพู่ปริมาตร 500 ไมโครลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองหมายเลข 1 นำหลอดทดลองเขย่าโดยใช้เครื่อง Vortex เพื่อให้เชื้อเข้ากันได้ดีกับสารละลายเจือจาง

จากนั้นปิเปตเชื้อจากหลอดทดลองหมายเลข 1 ปริมาตร 500 ไมโครลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองหมายเลข 2 นำหลอดทดลองเขย่าโดยใช้เครื่อง Vortex และทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนครบ 9 หลอดทดลอง เมื่อเสร็จจากฟิล์มขวดแรกแล้ว ให้ทำแบบเดิมจนครบทุกสูตรของตัวอย่าง ซึ่งค่า Dilution factor ของแต่ละหลอดทดลองที่เจือจางจะแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดง Dilution factor ของแต่หลอดการทดลองที่เจือจางเชื้อแบคทีเรีย

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

หลังจากเจือจางเชื้อแบคทีเรียแล้ว จะเลือกความเข้มข้นจำนวน 3 ความเข้มข้นมาหยดลงบนจานเพาะเชื้อที่มี NA โดยขีดเส้นแบ่งครึ่งจานเพาะเชื้อออกเป็น 2 ฝั่ง จากนั้นหยดเชื้อลงไปบนจานเพาะเชื้อฝั่งละ 10 หยด หยดละ 10 ไมโครลิตร และทำแบบนี้ทั้งสามความเข้มข้นต่อหนึ่งตัวอย่างทดสอบจนครบทุกสูตร จากนั้นนำจานเพาะเชื้อที่หยดเชื้อแล้วไปใส่ในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37˚C เป็นเวลา 18-24 ชั่วโมง

การนับจำนวนเชื้อแบคทีเรีย ทำได้โดยเลือกจานเพาะเชื้อมาหนึ่งความเข้มข้นต่อหนึ่งสูตรการทดลอง โดยเลือกจากจานที่มีการแยกโคโลนีกันอย่างชัดเจน จากนั้นนำมาคำนวณหาปริมาณเชื้อแบคทีเรียในหน่วยโคโลนีต่อมิลลิลิตร (CFU/ml) และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย (% Reduction) ได้ดังสมการที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

$$\text{ปริมาณเชื้อแบคทีเรีย (CFU/ml)} = \frac{\text{จำนวนโคโลนีที่นับได้} \times \text{Dilution factor}}{\text{ปริมาตรของเชื้อที่เลี้ยงบนอาหาร (ml)}} \quad \text{(สมการที่ 3.3)}$$

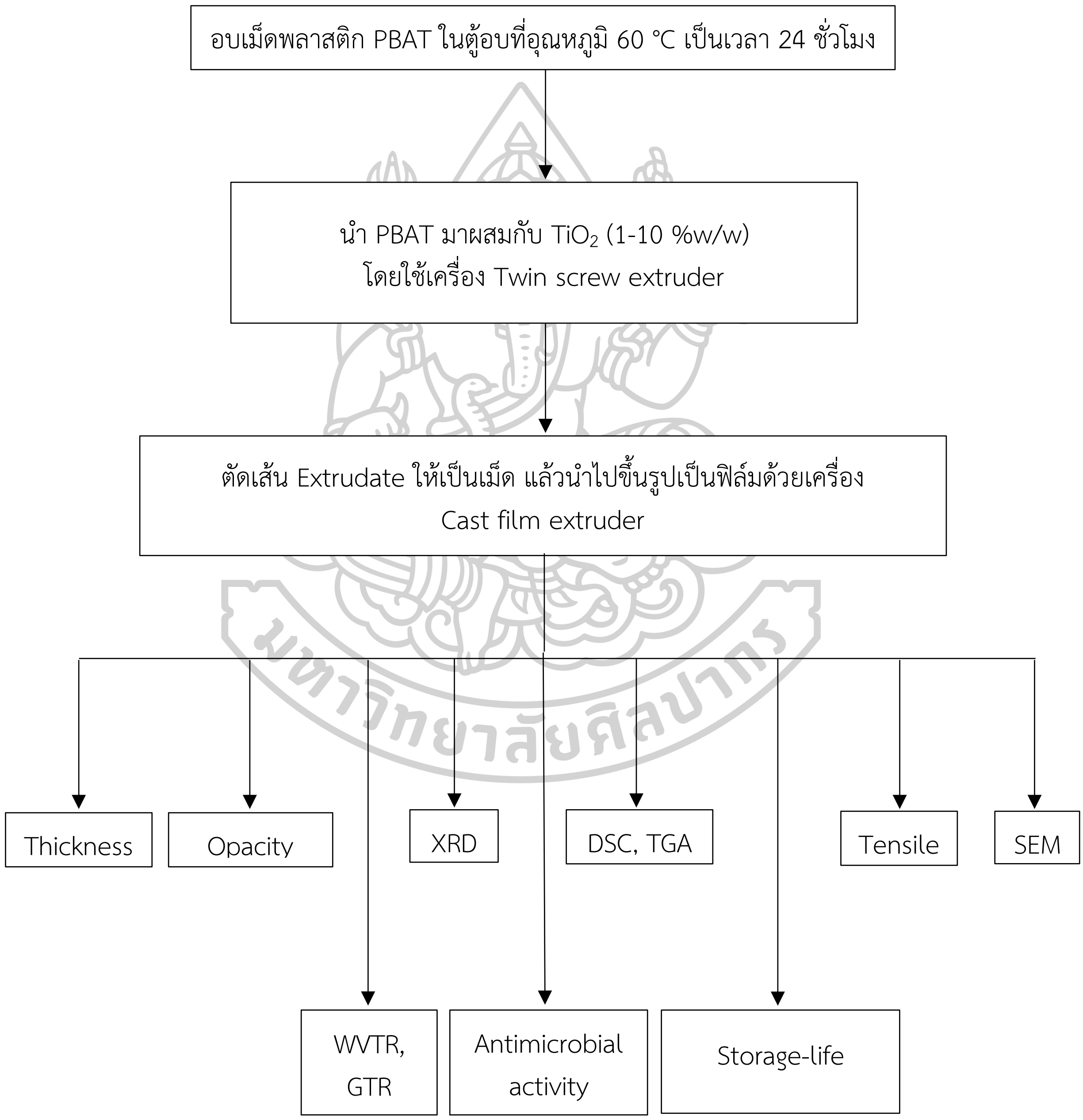
$$\text{เปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย (\% Reduction)} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad \text{(สมการที่ 3.4)}$$

โดยที่ A คือ CFU/ml ของฟิล์มที่ไม่มีการเติมสารที่ช่วยในการยับยั้งแบคทีเรีย

B คือ CFU/ml ของฟิล์มที่มีการเติมสารที่ช่วยในการยับยั้งแบคทีเรีย

3.2.2.10 ศึกษาการยืดอายุ (Storage-life) ของผลไม้

การศึกษาการยืดอายุของผลไม้ทำได้โดยการนำฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite มาทำให้เป็นถุงบรรจุภัณฑ์ขนาดประมาณ 25 x 28 ตารางเซนติเมตร จากนั้นนำผลไม้ตัวอย่าง ได้แก่ กล้วยหอมทอง ใส่ลงไปและซีลปากถุง เก็บถุงบรรจุภัณฑ์ไว้ที่อุณหภูมิห้องและสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพพร้อมถ่ายรูปทุกวันเป็นเวลา 14 วัน



รูปที่ 3.5 แสดงแผนภูมิการเตรียม PBAT/TiO_2 biocomposite

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 3.3 แสดงสัดส่วนการผสมและชื่อย่อที่ใช้ในงานวิจัย

ชื่อย่อ	**PBAT (% wt)**	**TiO_2 (% wt)**	**สารสกัดจากพืช (phr)**	
			สารสกัดว่านหางจระเข้	**สารสกัดแอปเปิล**
Neat PBAT	100.00	0.00	-	-
PBAT/T0.25	99.75	0.25	-	-
PBAT/T0.5	99.50	0.50	-	-
PBAT/T1	99.00	1.00	-	-
PBAT/T3	97.00	3.00	-	-
PBAT/T0.5/AL0.25	99.50	0.50	0.25	-
PBAT/T0.5/AL0.5	99.50	0.50	0.50	-
PBAT/T0.5/AL1	99.50	0.50	1.00	-
PBAT/T0.5/AP0.25	99.50	0.50	-	0.25
PBAT/T0.5/AP0.5	99.50	0.50	-	0.50
PBAT/T0.5/AP1	99.50	0.50	-	1.00

3.2.3 การเตรียมวัสดุคอมพอสิตระหว่าง PBAT, Titanium dioxide และสารสกัดจากพืช (PBAT biocomposite) และการทดสอบสมบัติของฟิล์มที่ได้

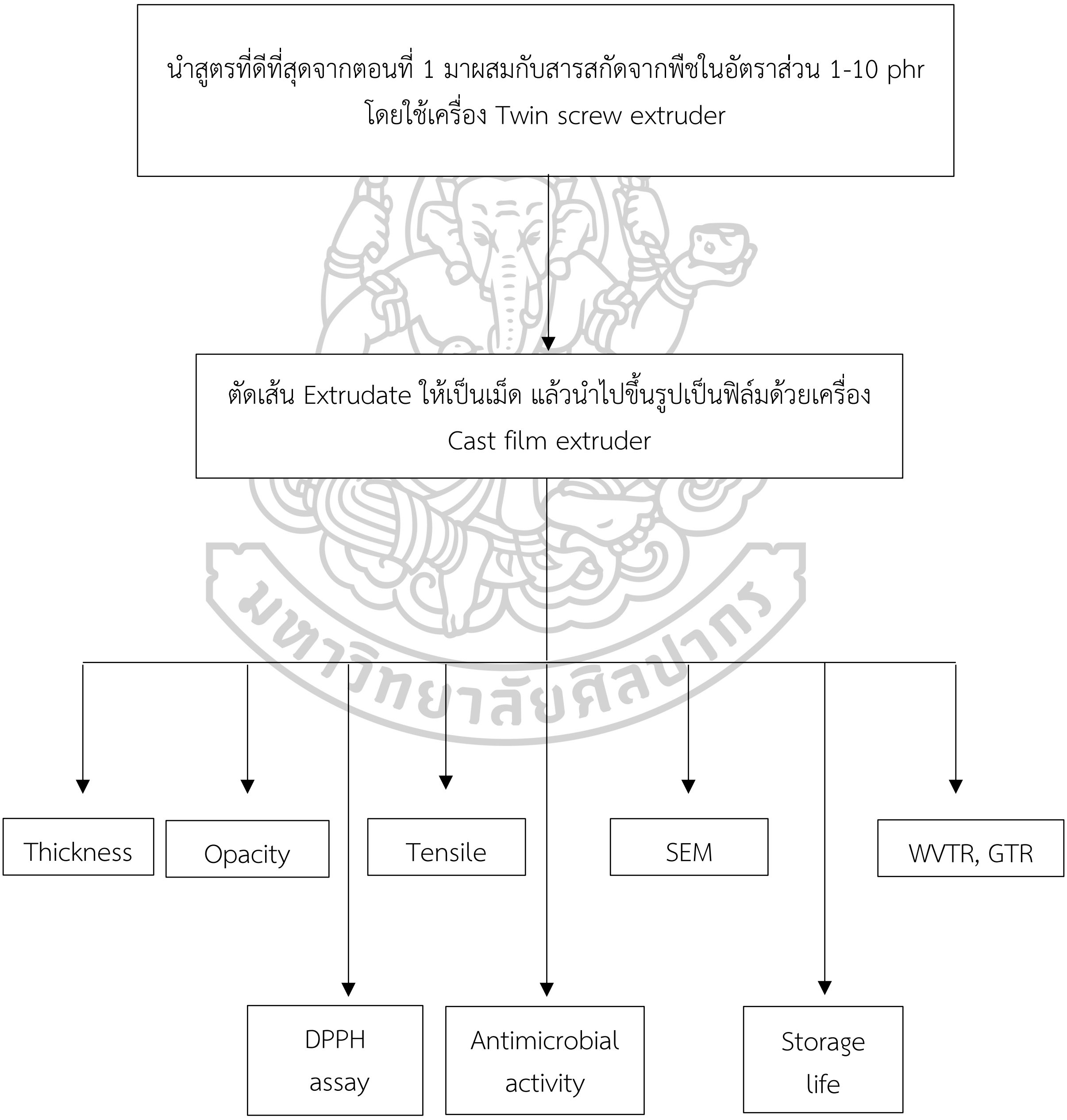
1. นำสูตรที่ดีที่สุดของฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite จากตอนที่ 1 (3.2.1) ได้แก่ PBAT/T0.5 มาผสมกับสารสกัดจากพืช ได้แก่ สารสกัดจากว่านหางจระเข้และสารสกัดจากกแอปเปิล ปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr โดยใช้เครื่อง Twin screw extruder ที่อุณหภูมิในช่วง 110 - 160 °C ความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 45 rpm และใช้การหล่อเย็นด้วยอากาศ โดยสัดส่วนการผสมและชื่อย่อที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังตารางที่ 3.3

2. นำเส้น Extrudate ไปตัดให้เป็นเม็ดเพื่อใช้สำหรับการขึ้นรูปเป็นฟิล์ม

3. นำเส้น Extrudate ที่ตัดแล้วไปขึ้นรูปด้วยเครื่อง Cast film extruder โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 110 - 160 °C ความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 26 rpm ความเร็ว Chill roll และ Nip roll เท่ากับ 1.4 และ 1.9 m/min ตามลำดับ

4. นำฟิล์มที่ได้ไปทดสอบสมบัติความทึบแสง สมบัติเชิงกล สมบัติทางสัณฐานวิทยา อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ การยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และการยืดอายุผลไม้ ดังหัวข้อ 3.2.2 นอกจากนี้จะมีการทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ

(Radical scavenging activity) โดยใช้วิธี DPPH• radical scavenging assay ซึ่งเตรียมได้โดยการนำ Reagent ได้แก่ 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) ละลายในตัวทำละลายเมทานอล โดยสารละลายนี้จะมีสีม่วง ตัวอย่างทดสอบที่เป็นฟิล์มจะทำการละลายโดยใช้สารละลาย Dimethyl sulfoxide (DMSO) โดยใช้ฟิล์ม 1 กรัมต่อ DMSO 30 ml และทดสอบโดยใช้เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer เพื่อวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 515 nm หาก DPPH radical ทำปฏิกิริยากับสารที่มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระแล้ว จะทำให้สีของสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเหลือง



รูปที่ 3.6 แสดงแผนภูมิการเตรียม PBAT biocomposite

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้สำหรับยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้ โดยการนำพลาสติกชีวภาพชนิด PBAT มาผสมกับ TiO_2 ที่มีสมบัติในการดักจับก๊าซเอทิลีนและยับยั้งแบคทีเรีย รวมถึงมีการเติมสารสกัดจากพืช ได้แก่ สารสกัดว่านหางจระเข้และสารสกัดแอปเปิลเพื่อทำหน้าที่ในการเป็นสารต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระ เพื่อผลิตฟิล์มที่สามารถดักจับก๊าซเอทิลีน ยับยั้งแบคทีเรีย และสามารถต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระได้ โดยขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธี Cast film extrusion ซึ่งงานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การศึกษาสมบัติของฟิล์มจากวัสดุเสริมองค์ประกอบระหว่าง PBAT และ Titanium dioxide (PBAT/TiO2 biocomposite)

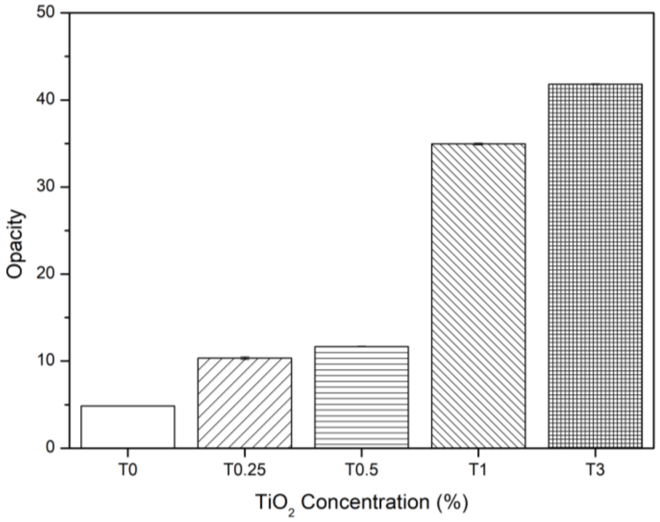
ส่วนที่ 2 การศึกษาสมบัติของฟิล์มจากวัสดุเสริมองค์ประกอบระหว่าง PBAT, Titanium dioxide และสารสกัดจากพืช (PBAT biocomposite)

4.1 การศึกษาสมบัติของฟิล์มจากวัสดุเสริมองค์ประกอบระหว่าง PBAT และ Titanium dioxide (PBAT/TiO_2 biocomposite)

ฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ปริมาณ 0.25, 0.50, 1.00 และ 3.00 % wt (PBAT/TiO_2 biocomposite) ซึ่งขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดรีดขึ้นรูปฟิล์ม (Cast film extrusion) โดยฟิล์มมีความหนา 70±20 ไมครอน

4.1.1 ศึกษาความทึบแสงของฟิล์ม (Opacity of films) ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

จากการทดสอบความทึบแสงของฟิล์ม Neat PBAT และ PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ซึ่งใช้ความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-800 นาโนเมตร และทำการพิจารณาค่าความทึบแสงของฟิล์ม (Opacity) โดยใช้การดูดกลืนแสงที่ช่วง 600 นาโนเมตร [45] แสดงดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงความทึบแสงของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณต่างกัน

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความทึบแสงของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณต่างกัน

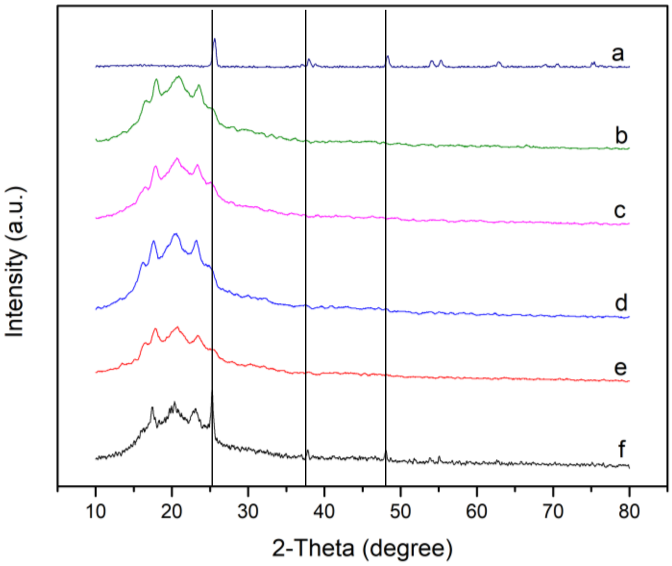
Sample	Opacity
Neat PBAT	4.83 ± 0.03^{e}
PBAT/T0.25	10.35 ± 0.16^{d}
PBAT/T0.5	11.68 ± 0.04^{c}
PBAT/T1	34.95 ± 0.10^{b}
PBAT/T3	41.81 ± 0.05^{a}

จากรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1 แสดงค่าความทึบแสงของฟิล์ม Neat PBAT และ PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณ 0.25, 0.50, 1.00 และ 3.00 % wt พบว่าฟิล์ม Neat PBAT มีค่าความทึบแสงเท่ากับ 4.83±0.03 แต่เมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณที่มากขึ้น จะส่งผลให้ฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite มีค่าความทึบแสงที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเติม TiO_2 ลงใน PBAT matrix จะทำให้อนุภาคของ TiO_2 เกิดการกระจายตัวใน matrix ส่งผลให้เกิดการกีดขวางทางเดินของแสง แสงจึงเดินทางผ่านฟิล์มได้ลดลง จะส่งผลให้ฟิล์มมีความขุ่นมากขึ้น รวมถึงมีความโปร่งแสงลดลง นอกจากนี้ TiO_2 ยังสามารถประพฤติตัวเป็น Nucleating agent ใน PBAT matrix ได้ จึงส่งผลให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.2 จึงส่งผลให้แสงส่องผ่านฟิล์มได้ยากขึ้น ผลการทดสอบทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ดังตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ปริมาณผลึกของฟิล์ม PBAT มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jiraporn

Nomai และคณะ [46] ที่ทำการศึกษาผลของ TiO_2 ที่มีต่อพฤติกรรมการตกผลึกของ PLA พบว่า TiO_2 ประพฤติตัวเป็น Nucleating agent สำหรับการตกผลึกของ PLA ได้ ซึ่งยืนยันได้จากผลการทดสอบทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

4.1.2 ศึกษาโครงสร้างและความเป็นผลึกของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

การศึกษาโครงสร้างและความเป็นผลึกของผง TiO_2, ฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดง XRD pattern ของ a) ผง TiO_2 b) Neat PBAT c) PBAT/T0.25 d) PBAT/T0.5 e) PBAT/T1 และ f) PBAT/T3

จากผลการศึกษาโครงสร้างและความเป็นผลึกของผง TiO_2 ดังรูปที่ 4.2 a) พบพีคเอกลักษณ์ที่ประมาณ 25.3˚, 36.08˚ และ 48.04˚ ซึ่งเป็นระนาบของผลึกแบบ anatase ที่ (101), (101) และ (200) ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาฟิล์ม Neat PBAT ดังรูปที่ 4.2 b) พบว่าปรากฏเป็น broad peak ที่ประมาณ 18.1˚ และ 20.3˚ ซึ่งแสดงถึงความเป็น Amorphous structure ของ PBAT matrix.

เมื่อพิจารณาฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ลงใน PBAT matrix พบว่าฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณ 0.25 % wt จะแสดงพีคเอกลักษณ์ของ PBAT ที่ประมาณ 17.8˚ แต่เมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณมากขึ้น คือ 0.5 - 3 % w/w จะพบพีคเอกลักษณ์ของ TiO_2 ที่ประมาณ 25.3˚ และพบพีคที่มีความชัดมากขึ้นที่ประมาณ 36.08˚ และ 48.04˚ รวมถึงมีค่า intensity มากขึ้นตามการเติมปริมาณ TiO_2 ที่มากขึ้นด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติม TiO_2 ลงใน

PBAT matrix จะส่งผลต่อความเป็นผลึกและปริมาณผลึกที่อยู่ในฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite โดยสอดคล้องกับผลจากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มด้วยเทคนิค DSC ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติม TiO_2 ในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้น เนื่องจาก TiO_2 สามารถประพฤติตัวเป็น Nucleating agent ใน PBAT matrix ได้

4.1.3 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC)

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเทคนิค DSC มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณผลึกของฟิล์ม โดยทำการทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิ 30-200 ˚C ที่อัตรา 5 ˚C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกของฟิล์ม Neat PBAT และ PBAT/TiO_2 biocomposite ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าจากการทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเทคนิค DSC

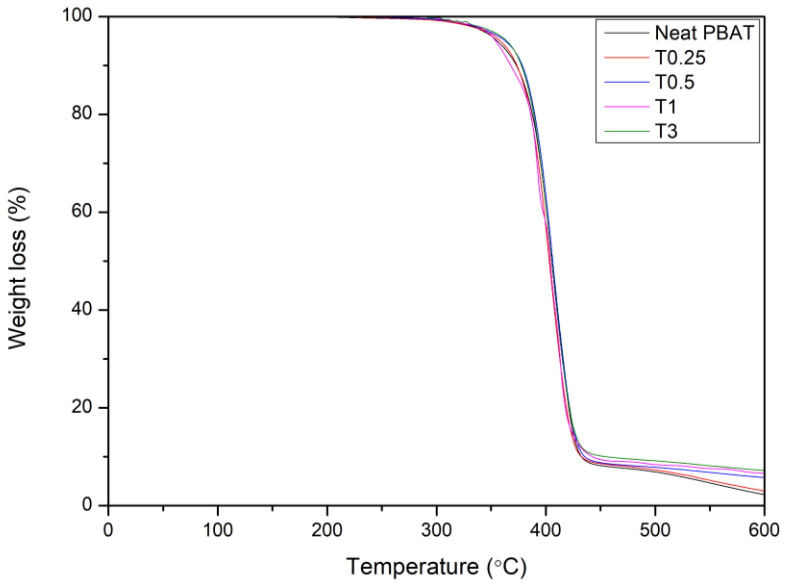
Sample	T_m (°C)	Tc (°C)	ΔH_m (J/g)	X_C (%)
Neat PBAT	124.72	87.20	5.86	5.14
PBAT/T0.25	124.64	86.62	7.77	6.83
PBAT/T0.5	125.45	88.04	8.03	7.08
PBAT/T1	125.05	88.54	8.18	7.25
PBAT/T3	125.03	86.96	7.71	6.97

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า ฟิล์ม Neat PBAT มีเปอร์เซ็นต์ของปริมาณผลึก (X_C) ที่ 5.14 % แต่เมื่อเติม TiO_2 ลงใน Neat PBAT ในปริมาณที่มากขึ้นคือ 0.25, 0.50 และ 1.00 % wt พบว่าฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite มีเปอร์เซ็นต์ของการเกิดผลึกที่มากขึ้นคือ 6.83, 7.08 และ 7.25 % ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเติม TiO_2 ลงใน PBAT matrix นั้น TiO_2 จะทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) จึงช่วยในการเหนี่ยวนำให้ PBAT matrix สามารถเกิดผลึกได้ง่ายขึ้นและเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jiraporn Nomai และคณะ [46] ที่ทำการศึกษาผลของ TiO_2 ที่มีต่อพฤติกรรมการตกผลึกของ PLA พบว่า TiO_2 ประพฤติตัวเป็น Nucleating agent สำหรับการตกผลึกของ PLA ได้ จึงส่งผลให้ PLA มีปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับการเติม TiO_2 ที่มากขึ้น ซึ่งยืนยันได้จากผลการทดสอบทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

แต่เมื่อพิจารณาผลของการเติม TiO_2 ในปริมาณที่มากขึ้นคือ 3.00 % wt พบว่าเปอร์เซ็นต์ของการเกิดผลึกมีค่าลดลงเป็น 6.97 % ซึ่งเป็นผลมาจากการที่อนุภาคของผง TiO_2 เกิดการรวมกลุ่มกัน ทำให้ TiO_2 มีพื้นที่ผิวที่ลดลง เป็นสาเหตุให้ TiO_2 เหนี่ยวนำให้เกิดผลึกใน PBAT matrix ได้ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ดังรูปที่ 4.7 e) โดยจะเห็นเป็นลักษณะของการรวมกลุ่มกันของอนุภาคผง TiO_2 ใน PBAT matrix ซึ่งส่งผลให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกที่ลดลง ซึ่งการลดลงของปริมาณผลึกสามารถส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มได้ โดยผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มดังรูปที่ 4.5 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในส่วนของอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมผลึก (T_m) และอุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึก (T_c) พบว่าการเติม TiO_2 ในปริมาณมากขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อค่า T_m และ T_c ของฟิล์ม

4.1.4 ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเครื่อง Thermal Gravimetric Analyser (TGA)

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเทคนิค TGA เป็นการศึกษาถึงเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์ม Neat PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณ 0.25, 0.50, 1.00 และ 3.00 % wt เมื่อต้องได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ โดยทำการทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิ 50-600 °C ที่อัตรา 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดง TGA thermogram ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite

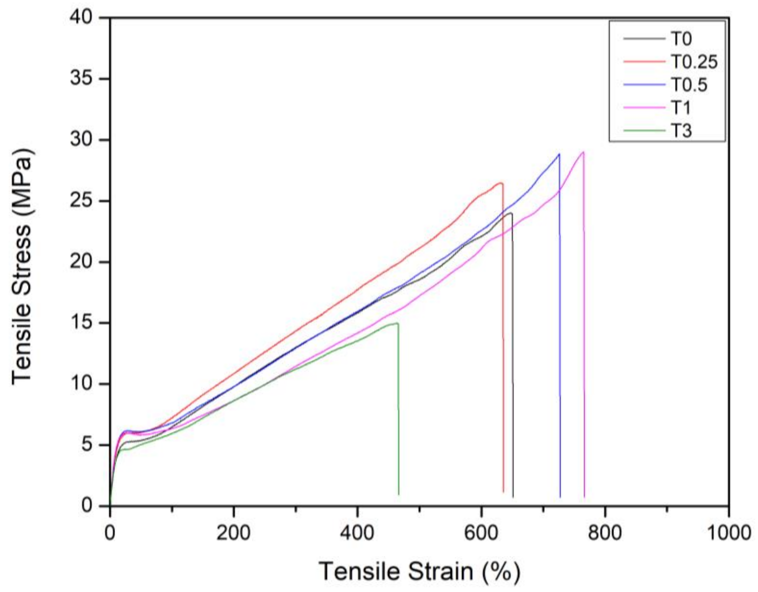
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าจากการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเทคนิค TGA

Sample	Temperature (°C)			Delta Y (% wt)	Residue (% wt)
	Onset	End	T_d		
Neat PBAT	246.54	451.01	406.11	89.11	2.25
PBAT/T0.25	256.45	476.77	406.59	89.66	3.01
PBAT/T0.5	278.24	451.80	408.04	88.61	5.75
PBAT/T1	288.94	439.52	405.28	86.75	6.63
PBAT/T3	289.34	449.82	404.51	85.80	7.20

TGA thermogram ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณที่ต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite เกิดการสลายตัวหนึ่งขั้น โดยเมื่อพิจารณาฟิล์ม Neat PBAT พบว่ามีอุณหภูมิที่ใช้ในการเริ่มสลายตัวอยู่ที่ 246.54 °C แต่ฟิล์ม PBAT ที่เติม TiO_2 ในปริมาณที่มากขึ้นคือ 0.25, 0.5, 1 และ 3 % wt พบว่ามีอุณหภูมิที่ใช้ในการเริ่มสลายตัวเพิ่มขึ้น คือ 256.45, 278.24, 288.94 และ 289.34 °C ตามลำดับ รวมถึงเมื่อพิจารณาปริมาณสารที่เหลืออยู่หลังจากการสลายตัวของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite พบว่าเมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณมากขึ้นจะมีแนวโน้มของเถ้าที่เหลืออยู่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติม TiO_2 สามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับ PBAT ได้ โดยอาจเป็นผลมาจากการที่ TiO_2 เป็นสารอนินทรีย์ที่มีเสถียรภาพความร้อนที่สูง ประกอบกับการเติม TiO_2 ลงใน PBAT matrix นั้นเป็นการเติมอนุภาคขนาดเล็กลงใน matrix ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Raja Venkatesan และคณะ [4] ที่พบว่าการเติม TiO_2 nanoparticle ในปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีเสถียรภาพทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติม TiO_2 เป็นการเติมอนุภาคขนาดเล็กลงใน matrix ซึ่งมีส่วนช่วยในการเพิ่มพื้นที่ผิว และนอกจากนี้ยังพบว่าอาจเป็นผลมาจากการที่สายโซ่ของ matrix ได้รับความร้อน จนอาจนำมาสู่การตัดหรือขาดของสายโซ่ ดังนั้นเมื่อเติม TiO_2 ลงไป อนุภาคของ TiO_2 จะทำหน้าที่ในการขัดขวางการขาดของสายโซ่ใน matrix ได้

4.1.5 ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite โดยการทดสอบสมบัติการดึงยืดด้วยเครื่อง Universal testing machine

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile stress และ Tensile strain ของฟิล์ม Neat PBAT และ PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณ 0.25, 0.50, 1.00 และ 3.00 % wt พบว่าฟิล์มมีลักษณะที่เป็น Ductile โดยมีช่วง Elastic deformation ที่ค่อนข้างสั้นและปรากฏจุด Yield point ซึ่งหลังจากจุด Yield point จะเป็นช่วงของ Plastic deformation และมีการเกิด Strain hardening ที่แสดงถึงการจัดเรียงตัวที่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแรง



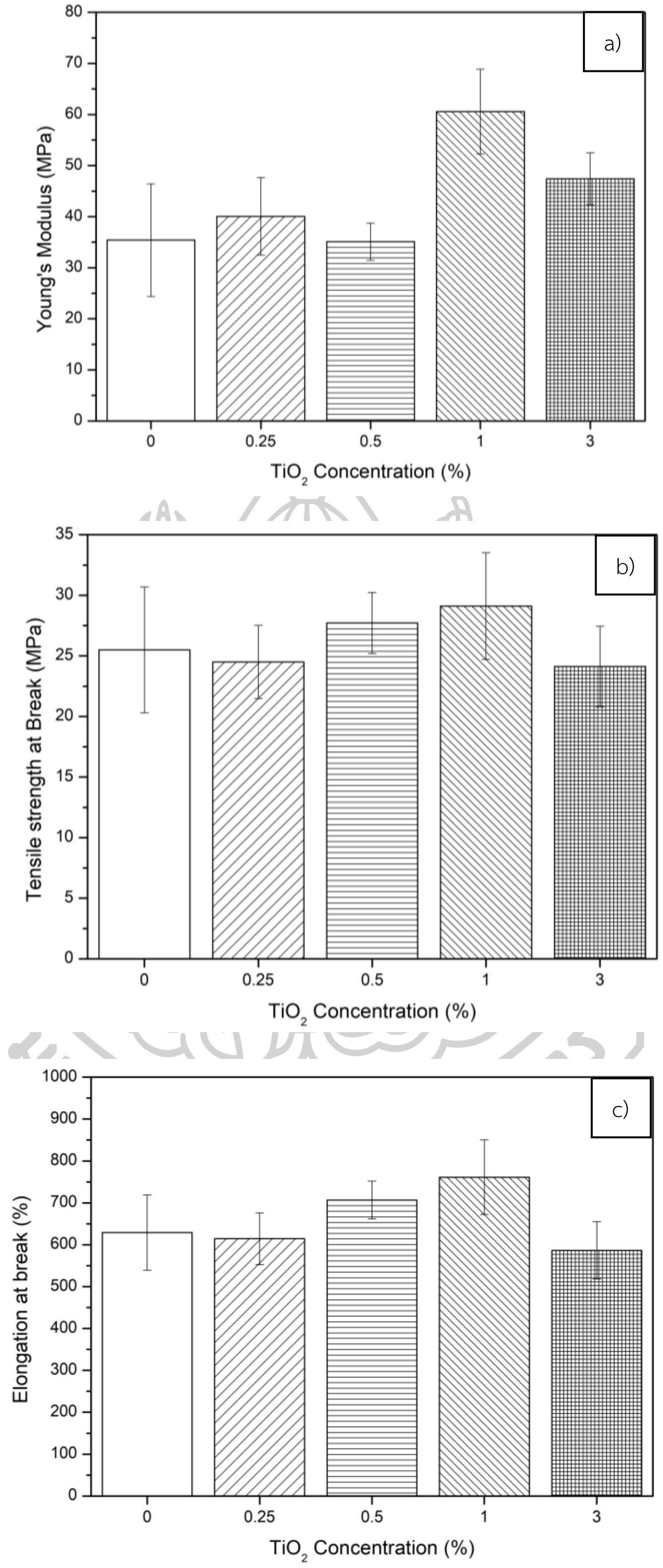
รูปที่ 4.4 แสดง Stress-Strain Curve ของ Neat PBAT และ PBAT PBAT/TiO_2 biocomposite

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม Neat PBAT และ PBAT/TiO_2 biocomposite แสดงผลการทดสอบดังรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาค่า Young's modulus ดังรูป 4.5 a) พบว่า เมื่อเติม TiO_2 ลงใน PBAT matrix ในปริมาณมากขึ้น คือ 0.25 และ 0.50 % wt จะทำให้ฟิล์ม PBAT/TiO_2 มีแนวโน้มของค่า Young's modulus ที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าที่ได้นั้นมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่เมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณ 1.00 % wt จะส่งผลให้ค่า Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเทียบกับฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณ 0.25 และ 0.50 % wt จะถือว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่ TiO_2 จัดเป็นสารอนินทรีย์และมีลักษณะเป็นของแข็งซึ่งมีค่าโมดูลัสสูง ดังนั้นเมื่อเติมลงไปใน PBAT matrix จะประพฤติตัวเป็น Filler ซึ่งช่วยเสริมแรงให้กับตัว matrix ได้ ดังนั้นเมื่อ matrix ได้รับแรงที่เกิดจากการดึงยืด TiO_2

จึงมีส่วนช่วยในการรับแรงก่อนที่จะถูกถ่ายโอนแรงมายัง matrix จึงส่งผลให้ฟิล์มที่มีการเติม TiO_2 นั้นมีความความสามารถในการต้านทานการเสียรูปได้มากเมื่อได้รับแรง แต่เมื่อพิจารณาการเติม TiO_2 ในปริมาณที่มากที่สุดคือ 3.00 % wt พบว่า Young's modulus มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการเติม TiO_2 ในปริมาณ 1.00 % wt ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่ TiO_2 เกิดการรวมกลุ่มกันส่งผลให้ TiO_2 เกิดการกระจายตัวใน PBAT matrix ได้ไม่ดี รวมถึงการรวมตัวของ TiO_2 อาจก่อให้เกิด Stress concentration ในฟิล์ม เมื่อฟิล์มได้รับแรงจึงส่งผลให้เกิดเป็นจุดศูนย์รวมในการรับแรงและทำให้เกิดการถ่ายโอนแรงได้ไม่ดี และส่งผลให้ฟิล์มเกิดการฉีกขาดในที่สุด โดยผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาดังภาพที่ 4.7 e) ซึ่งเห็นการรวมกลุ่มกันของ TiO_2 ได้อย่างชัดเจน

เมื่อพิจารณาค่า Tensile strength ดังรูปที่ 4.5 b) และตารางที่ 4.4 พบว่าค่า Tensile strength มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการเติม TiO_2 ในปริมาณที่มากขึ้น คือ 0.25, 0.50 และ 1.00 % wt และจะมีค่า Tensile strength สูงที่สุดเมื่อเติม TiO_2 1.00 % wt ซึ่งจะเห็นว่าค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับฟิล์ม Neat PBAT ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสาเหตุเดียวกับที่กล่าวไปข้างต้น กล่าวคือ TiO_2 จะประพฤติตัวเป็น Filler ซึ่งช่วยเสริมแรงให้กับตัว matrix ได้ ดังนั้นเมื่อ matrix ได้รับแรงที่เกิดจากการดึงยืด TiO_2 จึงมีส่วนช่วยในการรับแรงก่อนที่จะถูกถ่ายโอนแรงมายัง matrix จึงส่งผลให้ฟิล์มที่มีการเติม TiO_2 นั้นมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และสามารถรับแรงได้มากขึ้นก่อนเกิดการฉีกขาด แต่เมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณที่มากที่สุดคือ 3.00 % wt พบว่าค่า Tensile strength มีค่าลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม Neat PBAT ที่เติม TiO_2 0.25 % wt ซึ่งสาเหตุที่ Tensile strength มีค่าลดลงอาจเป็นผลมาจากการรวมตัวกันของ TiO_2 ดังที่กล่าวไปข้างต้น ซึ่งยืนยันได้จากผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาดังภาพที่ 4.7 e)

เมื่อพิจารณาค่า Elongation at Break ดังรูปที่ 4.5 c) และตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณ 0.25 % wt จะทำให้ฟิล์มมีค่า Elongation at Break ลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับฟิล์ม PBAT แต่เมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณที่มากขึ้นคือ 0.5 และ 1 % w/w จะทำให้ค่า Elongation at Break มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเติม TiO_2 ที่มีอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งสารอนุภาคขนาดเล็กนี้จะทำหน้าที่เสมือนเป็น Lubricant ให้กับ matrix [47] แต่เมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณ 3.00 % wt พบว่าค่า Elongation at Break มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์ม Neat PBAT ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเติม TiO_2 ในปริมาณมาก จึงทำให้ฟิล์มมีความแข็ง (Stiffness) มากขึ้น และมีความเหนียว (Ductile) ที่ลดลง จึงเป็นเหตุให้ฟิล์มเกิดการยืดออกได้น้อยลงเมื่อได้รับแรง



รูปที่ 4.5 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite a) Young's modulus b) Tensile strength และ c) Elongation at break

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite

Sample	Tensile properties		
	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
Neat PBAT	35.41±11.02^{c}	25.50±5.19^{b,c}	628.93±89.73^{b}
PBAT/T0.25	40.07±7.61^{c}	24.50±3.01^{c}	614.24±62.07^{b}
PBAT/T0.5	35.12±3.64^{c}	27.71±2.51^{a,b}	706.75±45.24^{a}
PBAT/T1	60.58±8.30^{a}	29.12±4.41^{a}	761.25±88.81^{a}
PBAT/T3	47.40±5.07^{b}	24.12±3.32^{c}	586.71±68.35^{b}

ตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติเชิงกลของบรรจุภัณฑ์ LLDPE และ CPP จากบริษัท วรรณประไพ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด

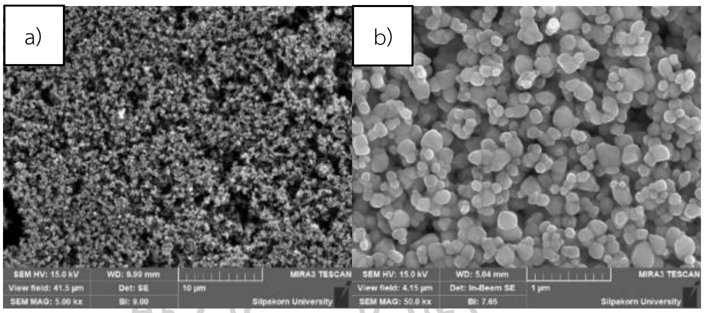
Properties	CPP 50 μ/d	LLDPE 50 μ/d
Thickness (μm)	50 ± 3	50 ± 3
Tensile Strength (MPa)	≥ 25	≥ 30
Young's modulus (MPa)	~ 1850 – 1950	~ 1850 – 1950
Elongation (%)	≥ 250	≥ 500

หมายเหตุ ข้อมูลได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท วรรณประไพ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด

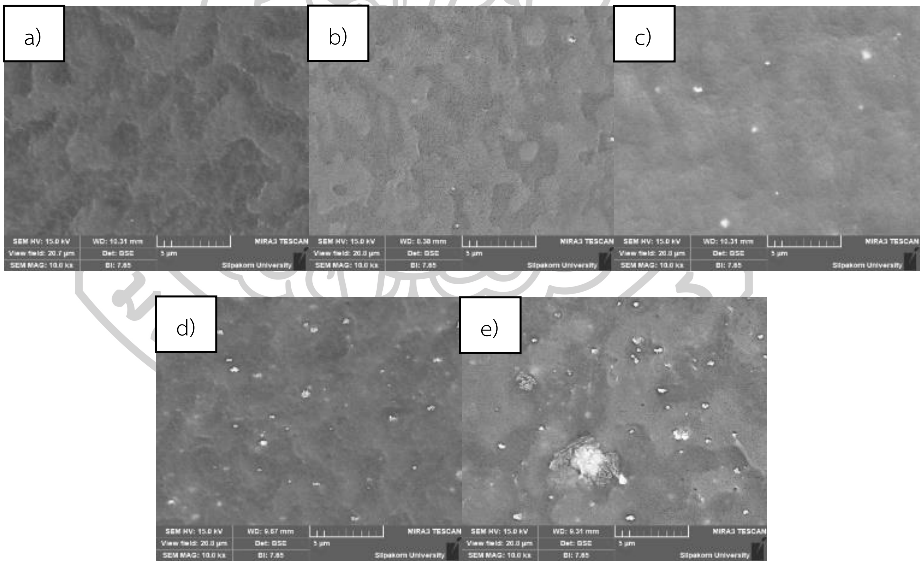
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจาก Low Linear Density Polyethylene (LLDPE) และ Co-extrusion cast Polypropylene (CPP) แสดงดังตารางที่ 4.5 เทียบกับฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 พบว่าฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 มีค่า Tensile strength ใกล้เคียงกับบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจาก LLDPE แต่มีค่า Young's Modulus ที่ต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อพิจารณาค่า Elongation at break จะพบว่ามีค่าสูงกว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจาก LLDPE ดังนั้นจะเห็นได้ว่าฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 นั้นมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการทำบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติในด้านการรับแรงและด้านความยืดหยุ่น แต่ไม่ต้องการสมบัติในการต้านทานการเสียรูป แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อทดลองนำฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ไปทำเป็นบรรจุภัณฑ์พบว่าฟิล์มมีสมบัติที่เพียงพอต่อการนำไปทำเป็นบรรจุภัณฑ์ในการบรรจุกล้วยหอมทองสำหรับการขนส่ง

4.1.6 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะทางกายภาพของผง Titanium dioxide (TiO_2) พบว่า TiO_2 มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ รวมถึงมีขนาดอนุภาคโดยรวมอยู่ที่ประมาณ 0.1 – 0.4 ไมครอน



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง TiO_2 ที่กำลังขยายต่างกัน a) 5000 เท่า (5000X) และ b) 50000 เท่า (50000X) โดยใช้โหมด SE

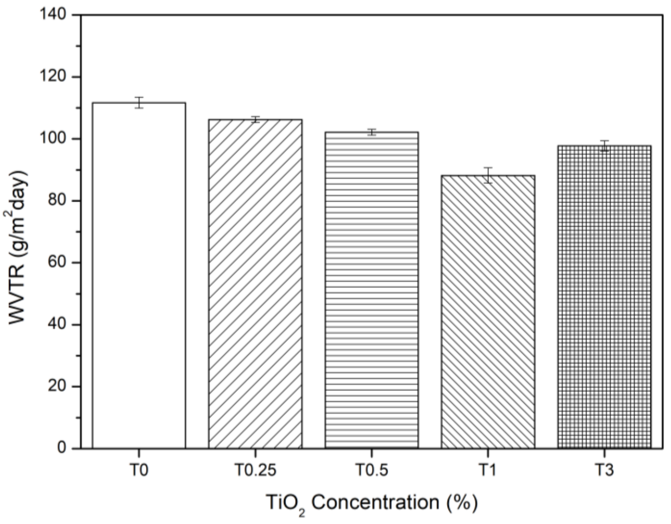


รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณต่างกันที่กำลังขยาย 10000 เท่า (10000X) a) 0.00 % wt b) 0.25 % wt c) 0.50 % wt d) 1.00 % wt และ e) 3.00 % wt โดยใช้โหมด BSE

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ดังรูปที่ 4.7 พบว่า Neat PBAT จะมีลักษณะพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบ เมื่อเติม TiO_2 ลงใน PBAT matrix จะพบอนุภาคของผง TiO_2 ใน PBAT matrix โดยผง TiO_2 สามารถกระจายตัวใน PBAT matrix ได้ค่อนข้าง

ดี และสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ ซึ่งหากเติม TiO_2 ในช่วง 0.25-1.00 % wt จะยังเห็นการกระจายตัวของผง TiO_2 อย่างสม่ำเสมอใน PBAT แต่เมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณ 3.00 % wt จะพบว่า TiO_2 เริ่มเกิดการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ รวมถึงเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งการรวมตัวกันของ TiO_2 จะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์ม ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลดังรูปที่ 4.5

4.1.7 ศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate: WVTR) โดยใช้เทคนิค Cup method แบบ Desiccant



รูปที่ 4.8 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite

ตารางที่ 4.6 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite

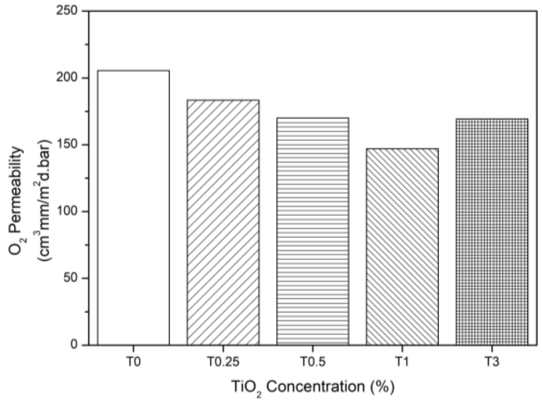
Sample	WVTR (g/m^2day)
Neat PBAT	111.66 ± 1.76^e
PBAT/T0.25	106.24 ± 0.93^d
PBAT/T0.5	102.11 ± 0.94^c
PBAT/T1	88.17 ± 2.46^b
PBAT/T3	97.74 ± 1.65^a

จากการทดสอบอัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite พบว่าเมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณ 0.25 – 1.00 % wt จะส่งผลให้ฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่ลดลง เนื่องจาก TiO_2 จะกระจายตัวอยู่ใน PBAT matrix และทำหน้าที่ขัดขวางการเดินทางหรือการแพร่ผ่านของไอน้ำได้ ทำให้ไอน้ำเกิดการแพร่ผ่านฟิล์มได้ยากขึ้น นอกจากนี้อาจเป็นไปได้ว่า TiO_2 ทำให้ฟิล์ม PBAT เกิดผลึกมากขึ้น ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นการช่วยเพิ่มความคดเคี้ยวของการเดินทางของไอน้ำ ทำให้ไอน้ำเกิดการแพร่ผ่านได้ยากขึ้นหรือใช้เวลานานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ซึ่งพบว่าเมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณ 0.25 – 1.00 % wt จะทำให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้น แต่เมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณ 3.00 % wt ส่งผลให้ฟิล์มมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจาก TiO_2 จะเกิดการเกาะกลุ่มกันเอง ทำให้อาจมีพื้นที่ว่างเกิดขึ้นมากขึ้นใน PBAT matrix จึงทำให้ไอน้ำสามารถเกิดการแพร่ผ่านฟิล์มได้มากขึ้นเล็กน้อย หรืออาจเป็นผลมาจากการที่ฟิล์มมีผลึกที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งพบว่า เมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณ 3.00 % wt จะทำให้ฟิล์มมีผลึกที่ลดลง ส่งผลให้ไอน้ำเกิดการแพร่ผ่านได้มากขึ้นนั่นเอง ซึ่งผลของอัตราการซึมผ่านที่ลดลงเนื่องจากการเติม TiO_2 ในงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Raja Venkatesan และคณะ [4] ที่มีการเติม TiO_2 nanoparticles ลงใน PBAT ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มมีค่าลดลง เนื่องจาก TiO_2 nanoparticles จะช่วยในการขัดขวางเส้นทางการแพร่ผ่านของไอน้ำ ทำให้เกิดความคดเคี้ยวใน matrix ได้มากขึ้น จึงทำให้ไอน้ำเกิดการซึมผ่านได้ลดลง นอกจากนี้การเติม TiO_2 nanoparticles ยังเป็นการช่วยเพิ่มปริมาณผลึกให้แก่ PBAT ส่งผลให้ไอน้ำเกิดการแพร่ผ่านได้ลดลง แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับการเติมสารอนินทรีย์ชนิดอื่น เช่น Zeolite ลงในฟิล์ม PBAT ดังงานวิจัยของ Kamonchanok Wongsuton และคณะ [48] ที่มีการเติม Zeolite ชนิด 5A และ 13X ลงใน PBAT ในปริมาณ 1, 3 และ 5 % wt พบว่าเมื่อเติม Zeolite ทั้งสองชนิดในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่เพิ่มขึ้น โดยที่ชนิด 5A จะมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่สูงกว่าชนิด 13X โดยเป็นผลมาจากการที่ Zeolite ชนิด 5A มีขนาดรูพรุน 5 อังสตรอม แต่ชนิด 13X มีขนาดรูพรุน 8 อังสตรอม ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสภายในมาก ไอน้ำที่มีความเป็นขั้วจึงเกิด Hydrogen bonding กับผิวของซีโอไลต์ได้มาก ทำให้ไอน้ำใช้เวลานานในการแพร่ผ่านฟิล์มจึงทำให้ฟิล์มมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่น้อยกว่าชนิด 5A และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการเติม TiO_2 และ Zeolite ในปริมาณที่เท่ากันคือ 1 และ 3% wt ลงใน PBAT พบว่าฟิล์ม PBAT ที่เติม TiO_2 มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่น้อยกว่าฟิล์มที่มีการเติม Zeolite ซึ่งเป็นผล

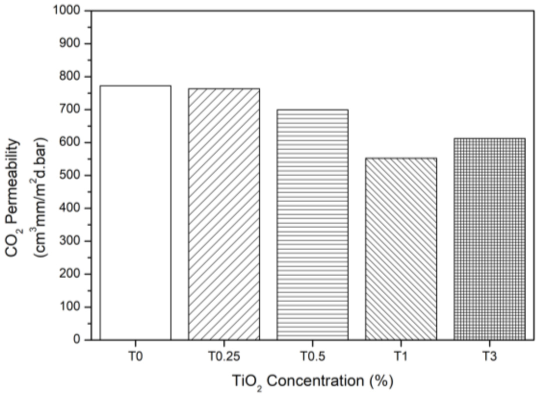
มาจากการที่ Zeolite มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสภายในมาก เมื่อไอน้ำเกิดการซึมผ่านจึงเกิด Hydrogen bonding กับผิวของ Zeolite ได้มากกว่า ไอน้ำจึงเกิดการแพร่ผ่านได้มากกว่า ดังนั้นจะเห็นได้ว่าฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 จะมีความสามารถในการต้านการซึมผ่านของไอน้ำได้ดีกว่าฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม Zeolite

4.1.8 ศึกษาอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของก๊าซ (Gas transmission rate)

จากการทดสอบอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite พบว่าอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มมีแนวโน้มที่เหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite



รูปที่ 4.10 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite

ตารางที่ 4.7 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite

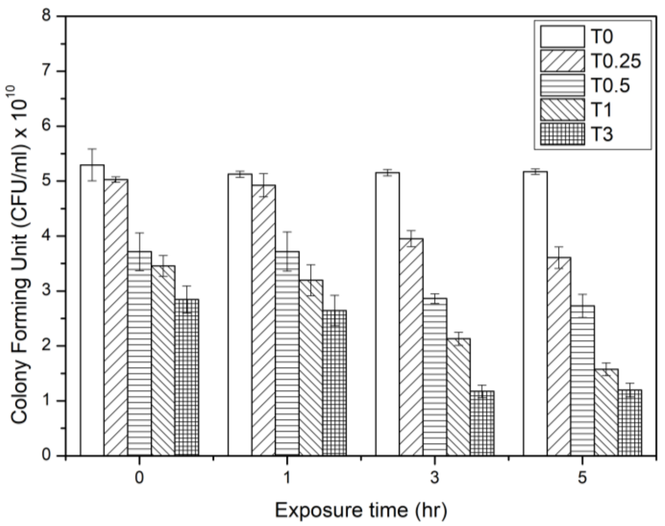
Sample	O_2 Permeability ($cm^3mm/m^2d.bar$)	CO_2 Permeability ($cm^3mm/m^2d.bar$)
Neat PBAT	205.6	772.0
PBAT/T0.25	183.4	763.0
PBAT/T0.5	170.1	699.3
PBAT/T1	147.0	552.3
PBAT/T3	169.4	612.0

เมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณที่ 0.25 – 1.00 % wt ส่งผลให้ฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite มีอัตราการการซึมผ่านของก๊าซที่ลดลง เนื่องจาก TiO_2 จะกระจายตัวอยู่ใน PBAT matrix และทำหน้าที่ขัดขวางการเดินทางหรือการแพร่ผ่านของก๊าซ ทำให้ก๊าซเกิดการแพร่ผ่านฟิล์มได้ยากขึ้น แต่เมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณ 3% w/w จะส่งผลให้ฟิล์มมีอัตราการซึมผ่านที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจาก TiO_2 เกิดการเกาะกลุ่มกันเอง ส่งผลให้มีพื้นที่ว่างเกิดขึ้นมากขึ้นในโครงสร้างของ PBAT matrix จึงทำให้ก๊าซสามารถเกิดการแพร่ผ่านฟิล์มได้มากขึ้นเล็กน้อย และอาจเป็นผลมาจากการที่ฟิล์มมีผลึกที่ลดลง จึงทำให้ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแพร่ผ่านฟิล์มได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาทางความร้อนด้วยทคนิค DSC ดังตารางที่ 4.2 ที่พบว่า เมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณที่ 0.25 – 1.00 % wt ส่งผลให้ฟิล์มมีปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณ 3.00 % wt จะส่งผลให้ฟิล์มมีความเป็นผลึกที่ลดลง และเมื่อพิจารณาอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเทียบกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 พบว่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงกว่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน เนื่องจากขนาดโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.3 อังสตรอม แต่ก๊าซออกซิเจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.46 อังสตรอม [49] ดังนั้น ด้วยขนาดของโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กกว่าก๊าซออกซิเจนจึงทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแพร่ผ่านฟิล์มได้ง่ายกว่าก๊าซออกซิเจน โดยผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kamonchanok Wongsuton และคณะ [48] ที่มีการเติม Zeolite ซึ่งจัดเป็นสารอนินทรีย์เช่นเดียวกับ TiO_2 ลงใน PBAT โดยทำการเติม Zeolite ชนิด 5A และ 13X ในปริมาณ 1, 3 และ 5 % wt ลงในฟิล์ม PBAT จากผลการทดลองพบว่า การเติม Zeolite ในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีแนวโน้มของอัตรา

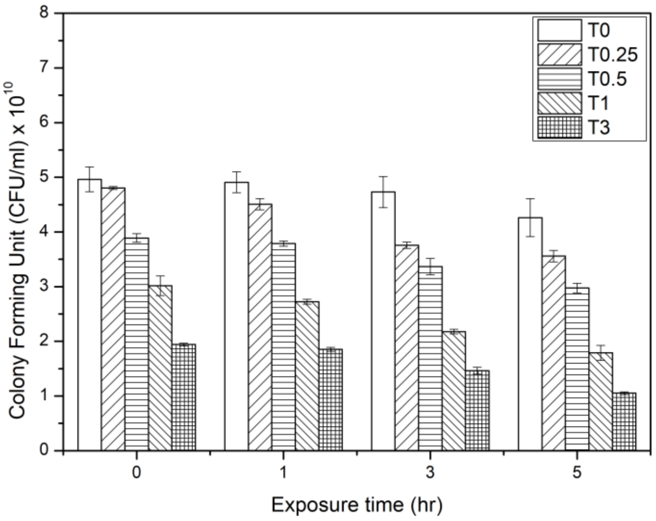
การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง เนื่องจากอนุภาคของ Zeolite จะเกิดการขัดขวางเส้นทางการแพร่ผ่านของก๊าซ รวมถึง Zeolite จะมีลักษณะที่เป็นรูพรุน ทำให้สามารถดูดซับก๊าซที่มีขนาดเล็กกว่ารุพรุนของซีโอไลต์ได้ ส่งผลให้ก๊าซเกิดการเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มได้ช้าลงจึงทำให้ฟิล์มมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซที่ลดลง แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการเติม TiO_2 และ Zeolite ในปริมาณที่เท่ากันคือ 1 และ 3 % wt ลงใน PBAT จะพบว่าฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้อยกว่าการเติม Zeolite ซึ่งอาจเป็นผลมาจากขนาดอนุภาคของ TiO_2 และ Zeolite โดยเมื่อพิจารณาผลจากการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่า TiO_2 มีขนาดอนุภาคอยู่ที่ 0.1-0.4 ไมครอน แต่ Zeolite มีขนาดอนุภาคประมาณ 3.4-3.7 ไมครอน เมื่อก๊าซเกิดการซึมผ่านฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม Zeolite ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะทำให้เส้นทางการซึมผ่านของก๊าซสั้นกว่าเมื่อเทียบกับการเติม TiO_2 ที่มีขนาดเล็ก ก๊าซจึงเกิดการซึมผ่านฟิล์มได้ง่าย ดังนั้นจะเห็นได้ว่าฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 จะมีความสามารถในการต้านการซึมผ่านของก๊าซได้ดีกว่าฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม Zeolite

4.1.9 ศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Antimicrobial activity)

ความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *Staphylococus Aureus* (*S.aureus)* และ *Escherichia Coli (E.coli)* ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณที่ต่างกันคือ 0.00, 0.25, 0.50, 1.00 และ 3.00 % wt และมีการฉายแสง UV ฟิล์มที่เวลาต่างกันคือ 1, 3 และ 5 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 แสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.Aureus* ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่มีการฉายแสง UV ฟิล์มที่เวลาต่างกัน



รูปที่ 4.12 แสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E.Coli* ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่มีการฉายแสง UV ฟิล์มที่เวลาต่างกัน

ตารางที่ 4.8 แสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.Aureus* และ *E.Coli* ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่ไม่มีการฉายแสง UV

Sample	*S.Aureus* *(Colony Forming Unit (CFU/ml) x 10^{10})*	% Reduction	*E.Coli* *(Colony Forming Unit (CFU/ml) x 10^{10})*	% Reduction
Neat PBAT	5.30 ± 0.29^{a}	0.00	4.96 ± 0.23^{a}	0.00
PBAT/T0.25	5.03 ± 0.05^{a}	5.05	4.80 ± 0.03^{a}	3.21
PBAT/T0.5	3.72 ± 0.35^{b}	29.80	3.89 ± 0.08^{b}	21.60
PBAT/T1	$3.45 \pm 0.19^{b,c}$	34.80	3.02 ± 0.18^{c}	39.2
PBAT/T3	2.85 ± 0.25^{c}	46.20	1.94 ± 0.02^{d}	60.90

หมายเหตุ % Reduction คำนวณโดยใช้ฟิล์มสูตร Neat PBAT เป็นตัว Control

ตารางที่ 4.9 แสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.Aureus* และ *E.Coli* ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่มีการฉายแสง UV เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Sample	*S.aureus (Colony Forming Unit (CFU/ml) x 10^{10})*	% Reduction	*E.coli (Colony Forming Unit (CFU/ml) x 10^{10})*	% Reduction
Neat PBAT	5.13±0.06[a]	0.00	4.91±0.19[a]	0.00
PBAT/T0.25	4.93±0.21[a]	3.90	4.51±0.10[b]	8.16
PBAT/T0.5	3.72±0.36[b]	27.40	3.79±0.05[c]	22.80
PBAT/T1	3.20±0.28[b,c]	37.60	2.73±0.05[d]	44.50
PBAT/T3	2.64±0.28[c]	48.40	1.85±0.04[e]	62.30

หมายเหตุ % Reduction คำนวณโดยใช้ฟิล์มสูตร Neat PBAT เป็นตัว Control

ตารางที่ 4.10 แสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย S.Aureus และ E.Coli ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่มีการฉายแสง UV เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

Sample	*S.Aureus (Colony Forming Unit (CFU/ml) x 10^{10})*	% Reduction	*E.Coli (Colony Forming Unit (CFU/ml) x 10^{10})*	% Reduction
Neat PBAT	5.16±0.06[a]	0.00	4.73±0.29[a]	0.00
PBAT/T0.25	3.95±0.15[b]	23.30	3.76±0.06[b]	20.60
PBAT/T0.5	2.86±0.09[c]	44.50	3.37±0.15[c]	28.90
PBAT/T1	2.13±0.12[d]	58.70	2.18±0.04[d]	54.00
PBAT/T3	1.17±0.11[e]	66.30	1.46±0.06[e]	69.10

หมายเหตุ % Reduction คำนวณโดยใช้ฟิล์มสูตร Neat PBAT เป็นตัว Control

ตารางที่ 4.11 แสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.Aureus* และ *E.Coli* ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่มีการฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

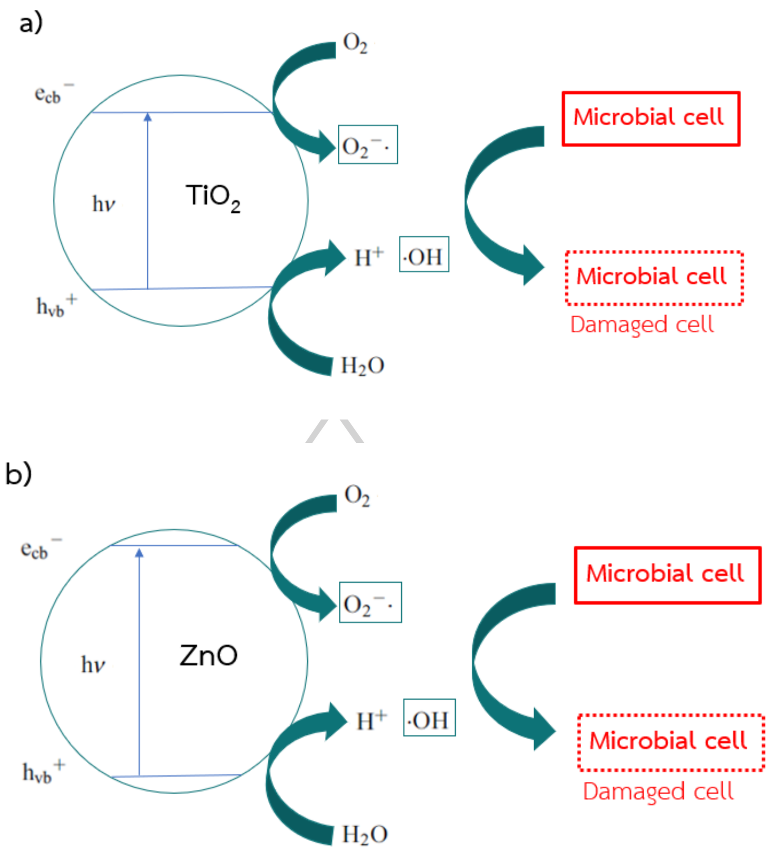
Sample	*S.Aureus (Colony Forming Unit (CFU/ml) x 10^{10})*	% Reduction	*E.Coli (Colony Forming Unit (CFU/ml) x 10^{10})*	% Reduction
Neat PBAT	$5.17±0.05^a$	0.00	$4.26±0.35^a$	0.00
PBAT/T0.25	$3.61±0.19^b$	30.20	$3.56±0.10^b$	19.6
PBAT/T0.5	$2.73±0.21^c$	47.20	$2.98±0.09^c$	32.80
PBAT/T1	$1.57±0.12^d$	69.50	$1.79±0.14^d$	59.60
PBAT/T3	$1.20±0.13^d$	76.80	$1.05±0.02^e$	76.20

หมายเหตุ % Reduction คำนวณโดยใช้ฟิล์มสูตร Neat PBAT เป็นตัว Control

จากผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณที่ต่างกันคือ 0.00, 0.25, 0.50, 1.00 และ 3.00 % wt และมีการฉายแสง UV ฟิล์มที่เวลาต่างกันคือ 1, 3 และ 5 ชั่วโมงพบว่า เมื่อเปรียบเทียบในส่วนของปริมาณการเติม TiO_2 ที่ต่างกันเทียบกับเวลาในการฉายแสง UV ที่เวลาเดียวกัน จะเห็นว่าเมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณที่มากขึ้น ฟิล์มจะมีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียได้มากขึ้นทั้งชนิด *S.Aureus* และ *E.Coli* เมื่อเปรียบเทียบในส่วนของเวลาในการฉายแสง UV ที่ต่างกันเทียบกับปริมาณการเติม TiO_2 ที่เท่ากัน พบว่า เมื่อใช้เวลาในการฉายแสง UV ฟิล์มมากขึ้น จะทำให้ฟิล์มที่ได้มีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียได้มากขึ้นทั้งชนิด *S.Aureus* และ *E.Coli* เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ TiO_2 ได้รับแสง จะทำให้เกิด Photocatalytic reaction และเกิดเป็น ROS ที่เข้าไป Oxidize polyunsaturated phospholipids ของ Microbial cell membranes ในแบคทีเรีย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเซลล์และทำให้เซลล์ตายในที่สุด ดังนั้นจากการเติม TiO_2 ในปริมาณที่ต่างกันคือ 0.00, 0.25, 0.50, 1.00 และ 3.00 % wt และมีการฉายแสง UV ฟิล์มที่เวลาต่างกันคือ 1, 3 และ 5 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มที่มีการเติม TiO_2 3 % wt และมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จะมีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียได้มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ubonrat Siripatrawan และคณะ [5] ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณ 0.00, 0.25, 0.50, 1.00 และ 2.00 % wt ลงใน Chitosan ซึ่งพบว่าเมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณที่มากขึ้น จะทำให้สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้มากขึ้น เนื่องจากเมื่อ TiO_2 ได้รับการ

กระตุ้นด้วยแสง UV จะทำให้เกิดเป็น ROS ซึ่งช่วยในการ Oxidize ส่วนที่เป็น Polyunsaturated phospholipids ของผนังเซลล์ของแบคทีเรีย ทำให้ภายในของเซลล์แบคทีเรียเกิดการเปลี่ยนแปลง และเกิดความเสียหาย จนเป็นเหตุให้แบคทีเรียตายในที่สุด

นอกจากนี้พบว่า นอกจาก TiO_2 ที่มีคุณสมบัติเป็น Semiconductor และสารประเภทอนินทรีย์ที่มีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียแล้ว ยังมีสารอนินทรีย์ชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติเป็น Semiconductor เช่นเดียวกันและยังสามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้เช่นเดียวกันอีกด้วย ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยงานวิจัยของ Wasutorn Bualuang และคณะ [50] มีการพัฒนาโฟมชีวภาพที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพและสามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้ โดยการเติม ZnO ลงใน PLA/PBS ในปริมาณ 0, 1, 3, 5 และ 7 phr จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเติม ZnO ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้โฟมชีวภาพ PLA/PBS มีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียมากขึ้นทั้งชนิด *S.Aureus* และ *E.Coli* ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง (Photocatalytic) โดยเมื่อ ZnO ได้รับแสงจะเกิดเป็น ROS และสามารถแทรกซึมเข้าไปในเยื่อหุ้มเซลล์ได้ง่าย ทำให้เซลล์ของแบคทีเรียตาย นอกจากนี้ ROS ยังมีการปล่อยซิงค์ออกไซด์ไอออน (Zn^{2+}) ซึ่งจะไปจับกับผนังเซลล์ของแบคทีเรียที่เป็นประจุลบ ส่งผลให้เกิดความเสียหายกับดีเอ็นเอและไขมันของแบคทีเรีย ทำให้เซลล์แตกและตายในที่สุด และเมื่อพิจารณาการเติม TiO_2 และ ZnO ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน คือ TiO_2 1 % wt และ ZnO 1 phr พบว่าการเติม TiO_2 1 % มีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียทั้งชนิด *S.Aureus* และ *E.Coli* ที่มากกว่าการเติม ZnO 1 phr ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ TiO_2 มีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.2 eV [15] แต่ ZnO มีแถบช่องว่างพลังงานประมาณ 3.37 eV [51] แสดงดังรูปที่ 4.13 ดังนั้น TiO_2 ที่มีแถบช่องว่างพลังงานน้อยกว่า ZnO จึงถูกกระตุ้นด้วยแสงยูวีและเกิดการเร่งปฏิกิริยาของแสงได้ง่ายกว่า ส่งผลให้สามารถผลิตเป็น ROS ออกมาได้ปริมาณมากกว่าและส่งผลให้มีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียได้มากกว่า



รูปที่ 4.13 แสดงการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการต้านเชื้อแบคทีเรียของ a) TiO_2 และ b) ZnO

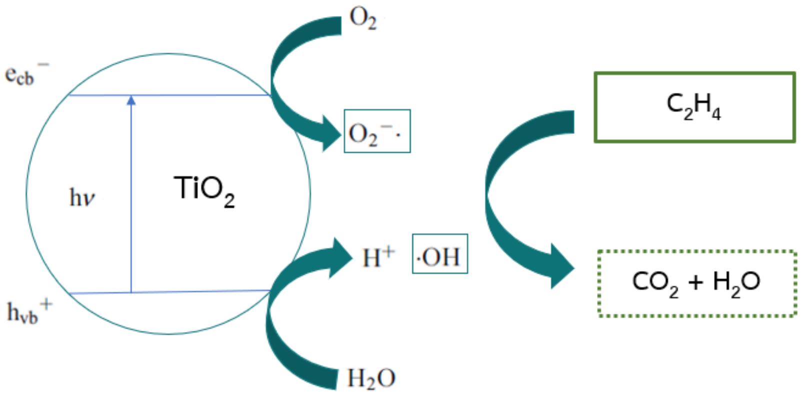
4.1.10 ศึกษาการยืดอายุ (Storage-life) ของผลไม้

จากผลการทดสอบการยืดอายุของผลไม้เมื่อนำกล้วยมาบรรจุในฟิล์มที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณที่ต่างกันคือ 0.00, 0.25, 0.50, 1.00 และ 3.00 % wt และมีการฉายแสง UV ฟิล์มที่เวลาต่างกันคือ 1, 3 และ 5 ชั่วโมงก่อนที่จะนำไปบรรจุกล้วย พบว่ากล้วยที่ไม่ได้บรรจุในถุงฟิล์ม (Blank) จะเห็นลักษณะที่เป็นเส้นเหลี่ยมของกล้วย มีสีเขียว และมีความแข็งในวันที่ 1 จากนั้นเมื่อเข้าสู่วันที่ 2 และ 3 พบว่ามีสีที่เหลืองขึ้นเล็กน้อยและเส้นเหลี่ยมของกล้วยเริ่มจางลง และเมื่อผ่านไปเป็นเวลา 7 วันจะพบว่ากล้วยมีสีเหลืองเข้มขึ้น เส้นเหลี่ยมบนผิวกล้วยหายไปทำให้กล้วยมีลักษณะมนทั่วทั้งลูก รวมถึงกล้วยจะมีความนิ่มขึ้น เนื่องจากกล้วยจะผลิตก๊าซเอทิลีนที่เป็นฮอร์โมนที่ช่วยทำให้ผลไม้เกิดการสุก รวมถึงสีเหลืองที่เกิดมาจาก Phenol ที่อยู่ในเซลล์เนื้อเยื่อของเปลือกกล้วย จึงทำให้เมื่อเวลาผ่านไปกล้วยจึงเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลือง เมื่อเปรียบเทียบในส่วนของปริมาณการเติม TiO_2 ที่ต่างกันเทียบกับเวลาในการฉายแสง UV ที่เวลาเดียวกัน พบว่ากล้วยที่บรรจุในฟิล์มที่เติม TiO_2 มากที่สุดคือ 3.00 % wt จะชะลอการสุกของกล้วยและยืดอายุของกล้วยได้ดีที่สุด โดยกล้วยจะยังเป็นสี

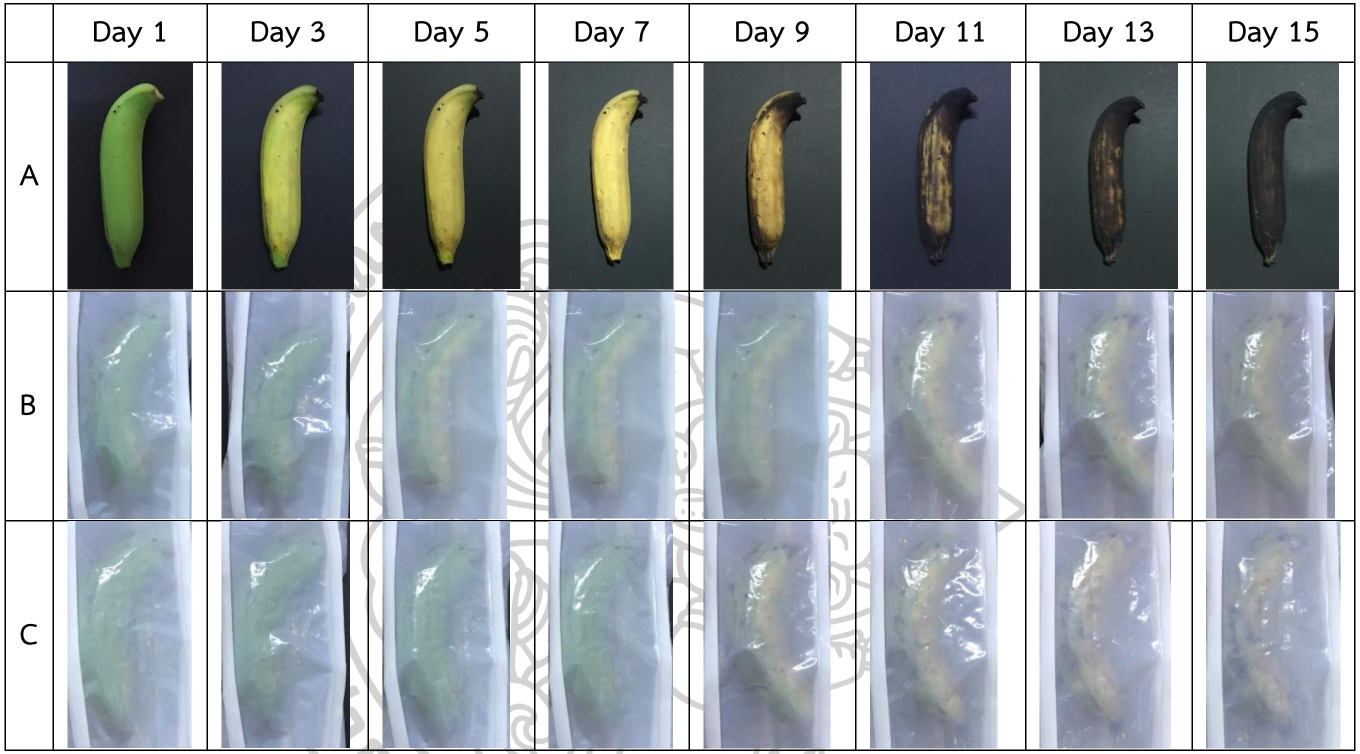
เขียวและมีลักษณะที่ยังจับแล้วมีความแข็ง แต่เมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณที่น้อยกว่า 3.00 % wt จะเห็นว่ากล้วยเริ่มสุกและมีสีเหลืองเร็วกว่าเมื่อเทียบที่เวลาเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบในส่วนของเวลาในการฉายแสง UV ที่ต่างกันเทียบกับปริมาณการเติม TiO_2 ที่เท่ากัน พบว่ากล้วยที่บรรจุในฟิล์มที่มีการฉายแสง UV ในเวลามากที่สุดคือ 5 ชั่วโมง จะทำให้กล้วยที่อยู่ในฟิล์มเกิดการสุกช้าลงและยืดอายุของกล้วยได้ดีที่สุด โดยสาเหตุที่กล้วยสุกช้าลงอาจเป็นผลมาจากการสลายตัวของก๊าซเอทิลีน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.14 กล่าวคือ เมื่อ TiO_2 ได้รับการกระตุ้นด้วยแสง UV จะเกิด Electrons บนผิวของ TiO_2 แล้วจะเกิดการย้ายจาก Valence band ไปสู่ Conduction band ซึ่งจะทำให้เกิดเป็น Electron-hole pairs ใน Valence band จากนั้นตัว Positive hole (h^+) จะทำปฏิกิริยากับน้ำหรือ Hydroxide ions (OH^-) ที่ดูดซับอยู่บนผิวของ TiO_2 ทำให้เกิดเป็น Highly reactive hydroxyl radicals (OH•) นอกจากนี้ electron (e-) จะเข้าไป Reduce oxygen ทำให้ได้เป็น Superoxide ions (O_2^-) ซึ่ง O_2^- และ OH• จะเป็น Strong reactive oxygen species (ROS) ที่สามารถ Oxidize ethylene ให้กลายเป็น Carbon dioxide และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย ดังนั้นการสลายตัวของ Ethylene ที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นผลมาจากการเติม TiO_2 ในปริมาณที่มากขึ้น จึงทำให้มีประสิทธิภาพของการดูดซับรวมถึงมี ROS มากขึ้นนั่นเอง [5] ดังนั้นการเติม TiO_2 ในปริมาณที่ต่างกันคือ 0.00, 0.25, 0.50, 1.00 และ 3.00 % wt และมีการฉายแสง UV ฟิล์มที่เวลาต่างกันคือ 1, 3 และ 5 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มที่มีการเติม TiO_2 3 % wt และมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จะช่วยชะลอการสุกของกล้วยได้ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ubonrat Siripatrawan และคณะ [5] ที่มีการเติม TiO_2 ในปริมาณ 0, 0.25, 0.5, 1 และ 2 % w/w ลงใน Chitosan ซึ่งพบว่าเมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ก๊าซ Ethylene เกิดการสลายตัวได้มากขึ้น เนื่องจากเมื่อ TiO_2 ได้รับการกระตุ้นด้วยแสง UV จะทำให้เกิดเป็น ROS ที่ช่วยในการ Oxidize ก๊าซ Ethylene ให้กลายเป็นน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นฟิล์มดังกล่าวจึงมีความสามารถในการสลายก๊าซ Ethylene ได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ TiO_2

นอกจาก TiO_2 ที่เป็นสารประเภทอนินทรีย์ที่มีความสามารถในการยืดอายุของกล้วยหอมทองได้แล้ว ยังพบว่ามีสารประเภทอนินทรีย์ชนิดอื่นที่มีความสามารถในการยืดอายุของกล้วยหอมทองได้เช่นกัน เช่น งานวิจัยของ Raksina Preedanorawut และคณะ [52] ที่พัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์สำหรับชะลอการสุกของผลไม้ โดยการเติม Zeolite ชนิด 5A และ 13X ลงในฟิล์ม PBS/PLA ในปริมาณ 1, 2 และ 3 % wt จากผลการทดลองพบว่าการเติม Zeolite ทั้งชนิด 5A และ 13X มีความสามารถในการยืดอายุกล้วยหอมทองได้ถึงประมาณ 15 วัน เนื่องจาก Zeolite ทั้งสองชนิดมี

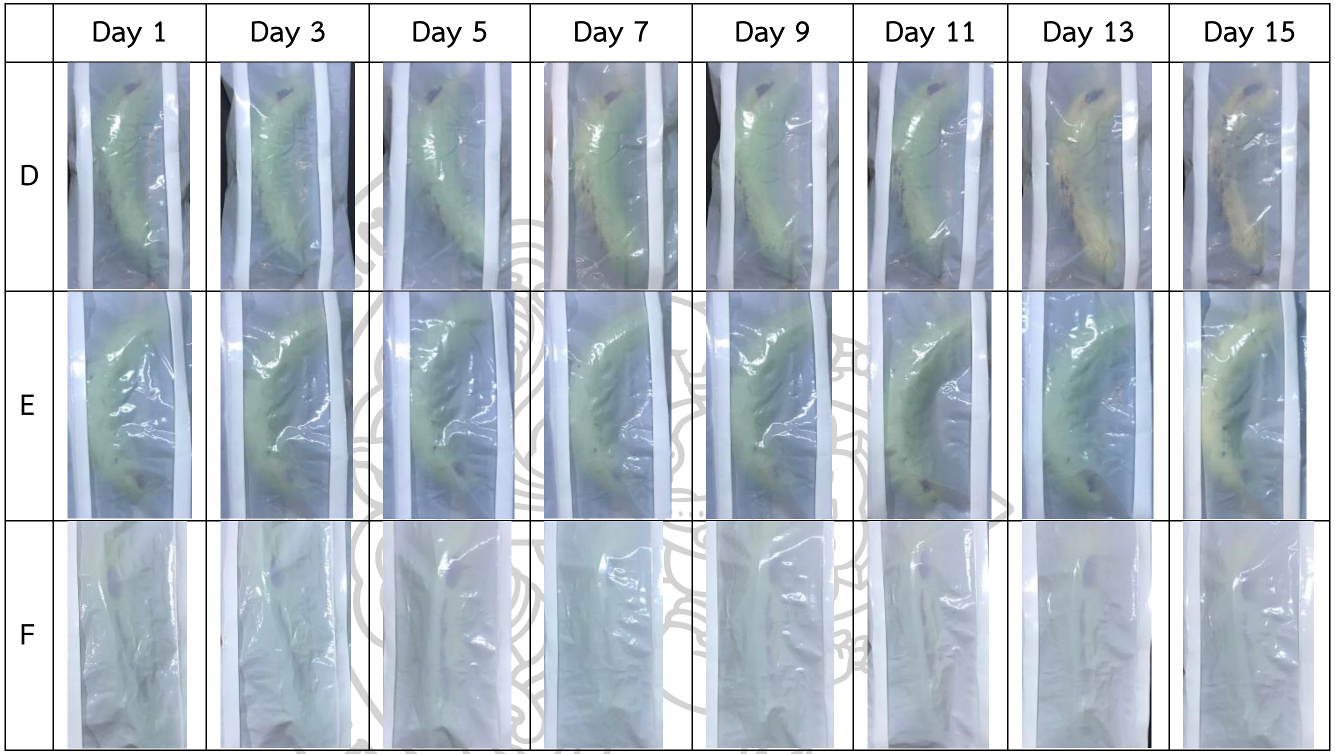
ความสามารถในการดูดซับก๊าซเอทิลีนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าขนาดรูพรุนของ Zeolite คือ 4.2 อังสตรอม ส่งผลให้ภายในบรรจุภัณฑ์มีปริมาณก๊าซเอทิลีนอันเป็นสาเหตุให้กล้วยสุกในปริมาณลดลง จึงทำให้กล้วยเกิดการสุกได้ช้าลงและสามารถชะลอการสุกของกล้วยได้นานขึ้น และนอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลของการเติมสารอนินทรีย์ชนิดอื่นลงใน PBAT เช่น Zeolite ที่ส่งผลต่อการยืดอายุของผลไม้ ดังงานวิจัยของ Kamonchanok Wongsuton และคณะ [48] ที่มีการเติม Zeolite ชนิด 5A และ 13X ในปริมาณ 1, 3 และ 5 % wt ลงใน PBAT พบว่าการเติม Zeolite ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการยืดอายุของผลไม้ได้นานขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ซีโอไลต์สามารถดูดซับก๊าซเอทิลีนที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนได้ ส่งผลให้ภายในฟิล์มบรรจุภัณฑ์มีปริมาณก๊าซเอทิลีนซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลไม้เกิดการสุกในปริมาณลดลง จึงทำให้ฟิล์มสามารถยืดอายุของผลไม้ได้นานขึ้น และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการเติม TiO_2 และ Zeolite ในปริมาณที่เท่ากันคือ 1 และ 3 % wt ลงในฟิล์ม PBAT พบว่าการเติม TiO_2 ในปริมาณ 1 และ 3 % wt สามารถยืดอายุของผลไม้ได้นานกว่าการเติม Zeolite ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่ TiO_2 มีคุณสมบัติที่เป็น Semiconductor ซึ่งเกิดการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงได้ ดังรูปที่ 4.14 ดังนั้นเมื่อ TiO_2 ได้รับแสงยูวีจึงทำให้เกิดเป็น ROS ขึ้น และสามารถเข้าไปสลายก๊าซเอทิลีนที่ปลดปล่อยออกมาจากกล้วยหอมทองได้ ส่งผลให้ภายในบรรจุภัณฑ์มีปริมาณของก๊าซเอทิลีนที่ลดลง จึงทำให้ฟิล์มสามารถยืดอายุของกล้วยหอมทองได้



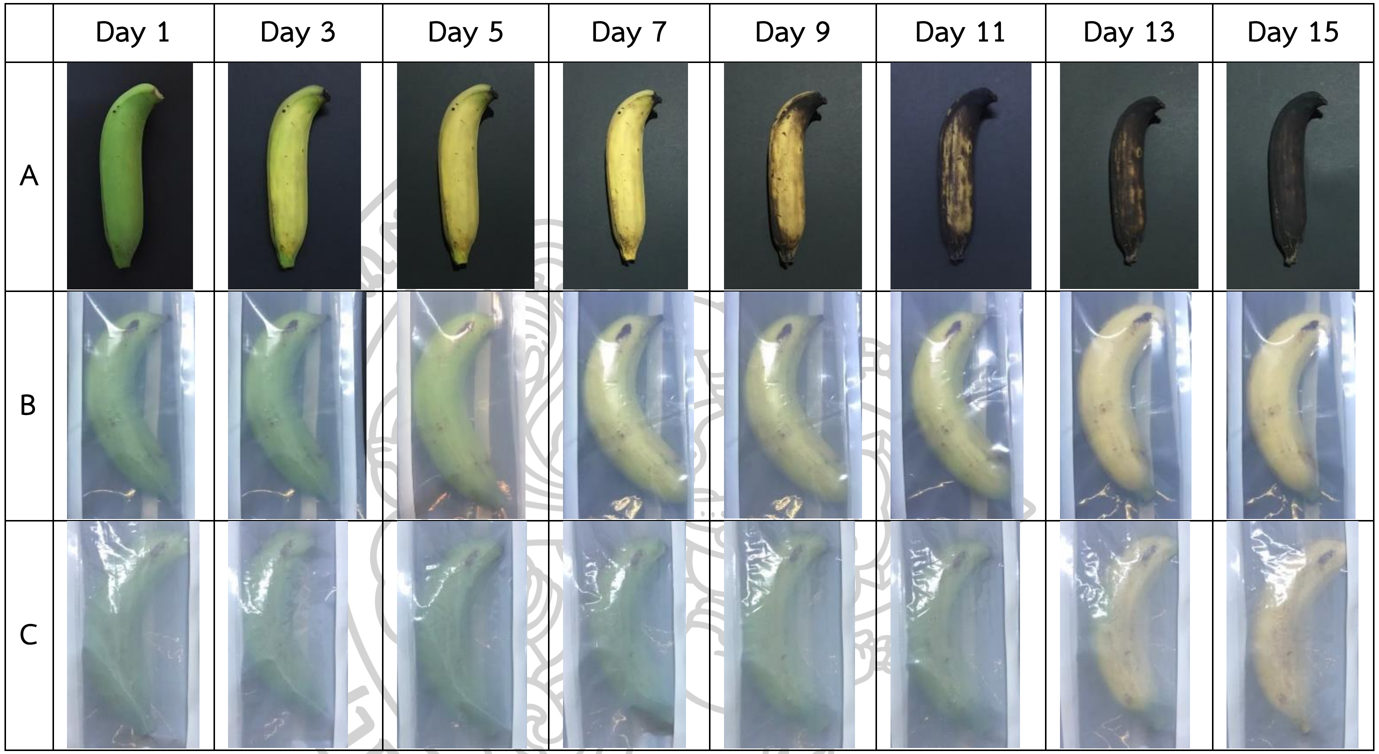
รูปที่ 4.14 แสดงการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสำหรับการสลายก๊าซเอทิลีนของ TiO_2



รูปที่ 4.15 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อไม่มีการฉายแสง UV เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน A) Blank B) Neat PBAT และ C) PBAT/TiO_2 0.25 % w/w

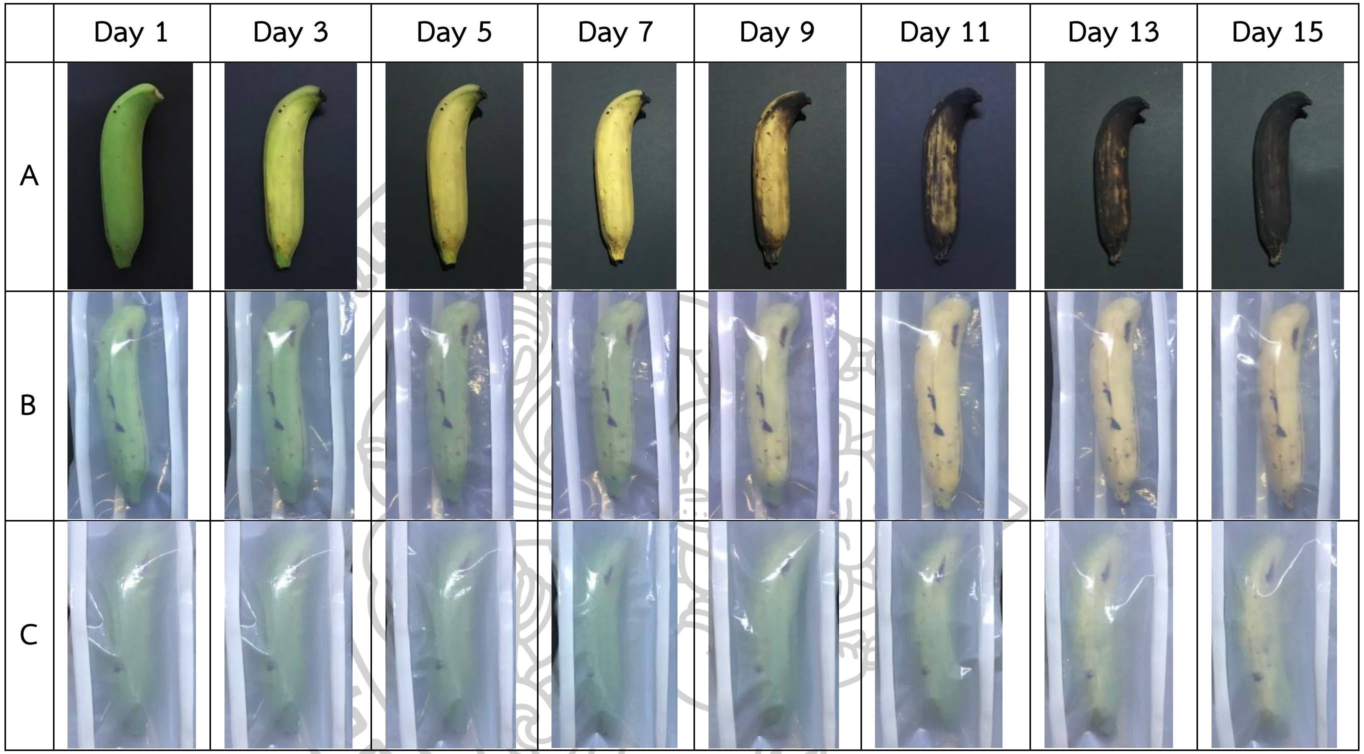


รูปที่ 4.16 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อไม่มีการฉายแสง UV เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน D) PBAT/TiO_2 0.5 %w/w E) PBAT/TiO_2 1 %w/w และ F) PBAT/TiO_2 3 %w/w

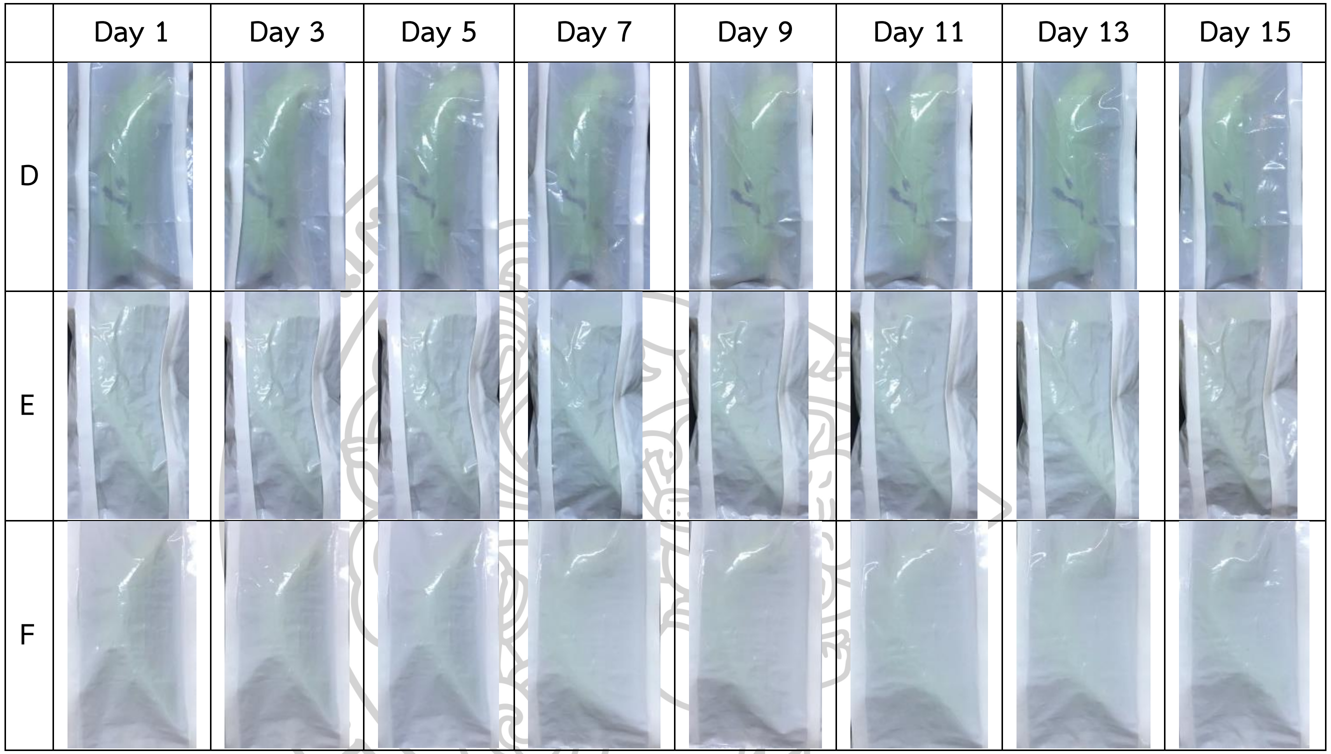


รูปที่ 4.17 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน A) Blank B) Neat PBAT และ C) PBAT/TiO_2 0.25 %w/w

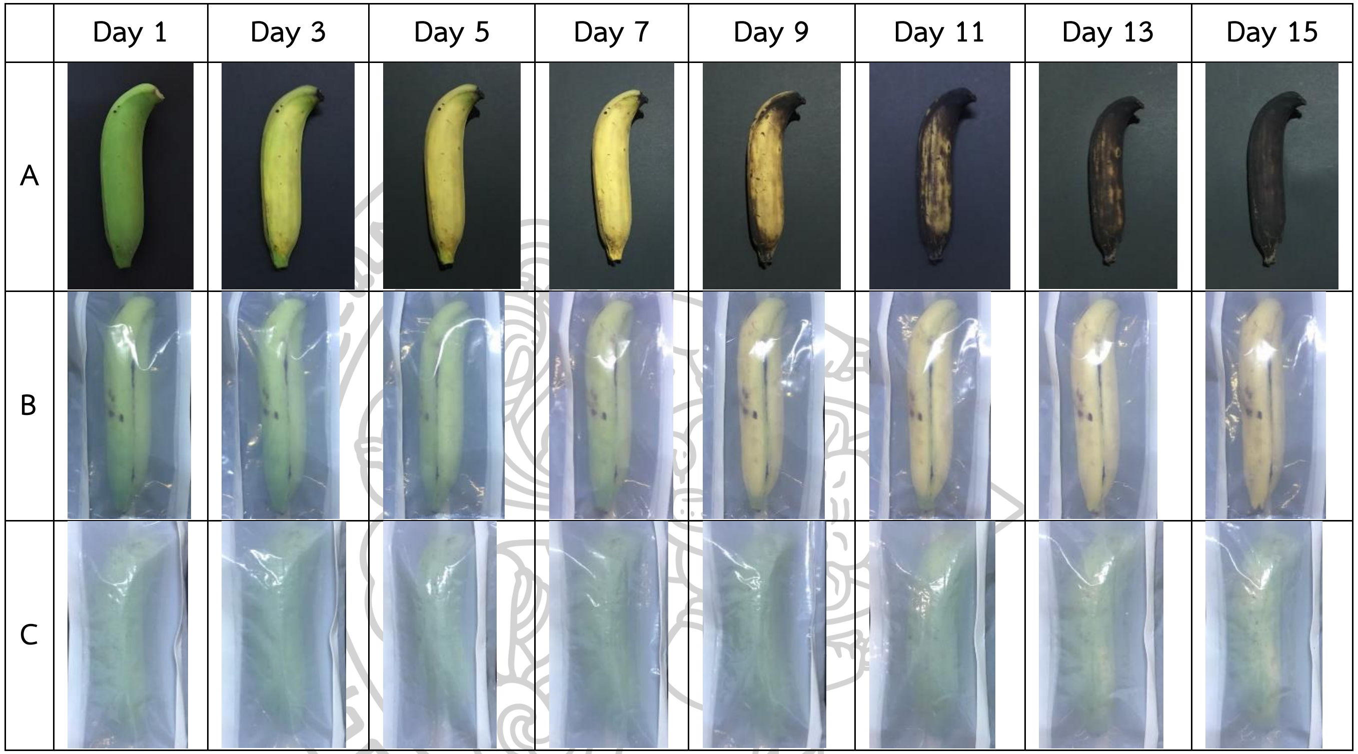
รูปที่ 4.18 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน D) PBAT/TiO_2 0.5 %w/w E) PBAT/TiO_2 1 %w/w และ F) PBAT/TiO_2 3 %w/w



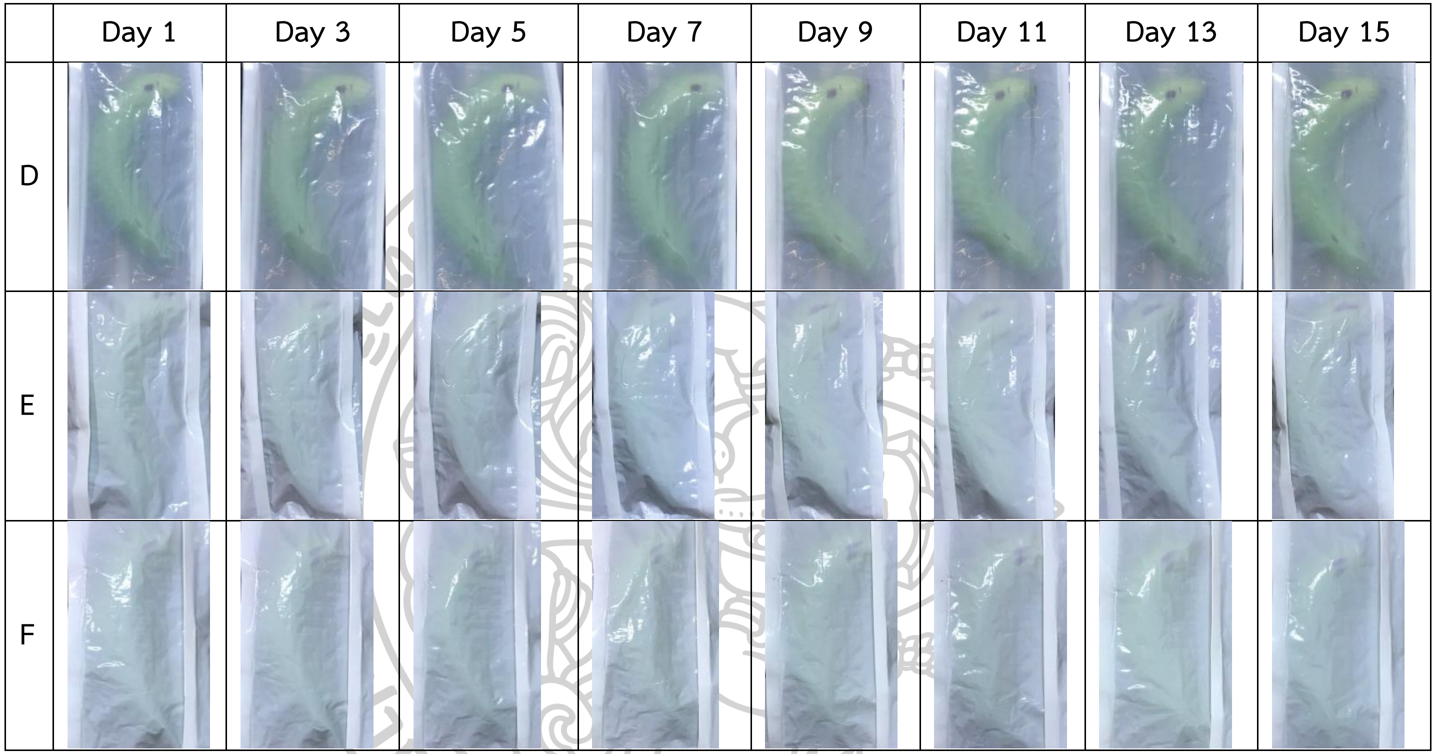
รูปที่ 4.19 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน A) Blank B) Neat PBAT และ C) PBAT/TiO_2 0.25 %w/w



รูปที่ 4.20 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน D) PBAT/TiO_2 0.5 %w/w E) PBAT/TiO_2 1 %w/w และ F) PBAT/TiO_2 3 %w/w



รูปที่ 4.21 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน A) Blank B) Neat PBAT และ C) PBAT/TiO_2 0.25 %w/w



รูปที่ 4.22 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน D) PBAT/TiO_2 0.5 %w/w E) PBAT/TiO_2 1 %w/w และ F) PBAT/TiO_2 3 %w/w

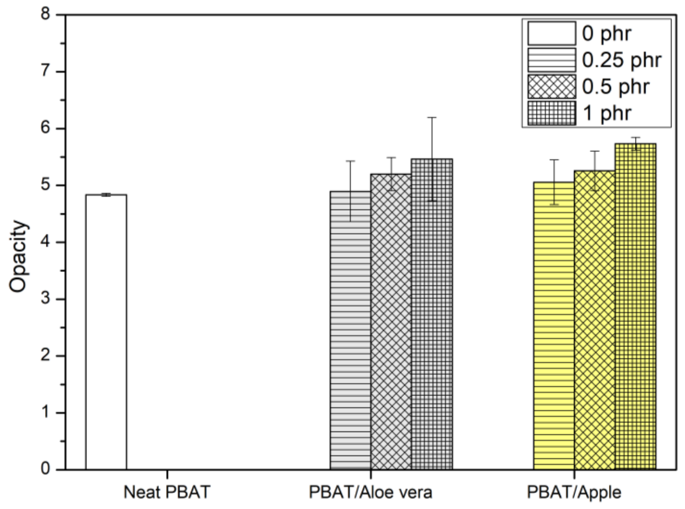
จากการทดลองตอนที่ 1 ที่มีการผสม TiO_2 ลงใน PBAT ในปริมาณ 0.00, 0.25, 0.50, 1.00 และ 3.00 % wt และทำการขึ้นรูปฟิล์ม PBAT/TiO_2 จากนั้นนำไปศึกษาสมบัติต่างๆ พบว่าสูตรที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในการศึกษาต่อในตอนที่สองเพื่อผสมกับสารสกัดว่านหางจระเข้ (Aloe vera Extract: AL) และสารสกัดแอปเปิล (Apple Extract: AP) คือฟิล์มสูตร PBAT/TiO_2 0.5 % wt (PBAT/T0.5) เนื่องจากการเติม TiO_2 ปริมาณ 0.5 % wt มีสมบัติต่างๆที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์ม Neat PBAT ไม่ว่าจะเป็น สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล อัตราการซึมผ่านของไอน้ำรวมถึงก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ การยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย รวมถึงการยืดอายุของผลไม้ และที่สำคัญคือความทึบแสงของฟิล์ม ที่พบว่าการเติมในปริมาณนี้ยังสามารถทำให้เห็นผลไม้หรือผลิตภัณฑ์ภายในถุงได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลดีต่อการนำไปใช้จริงในด้านการค้าอีกด้วย ดังนั้น ฟิล์ม PBAT/T0.5 จะถูกนำมาผสมกับสารสกัดว่านหางจระเข้ (AL) และสารสกัดแอปเปิล (AP) ในปริมาณที่ต่างกันคือ 0.25, 0.50 และ1.00 phr เพื่อทำการศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มซึ่งจะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

4.2 การศึกษาสมบัติของฟิล์มจากวัสดุเสริมองค์ประกอบระหว่าง PBAT, Titanium dioxide และสารสกัดจากพืช (PBAT biocomposite)

ฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดจากพืช ได้แก่ สารสกัดว่านหางจระเข้และสารสกัดแอปเปิล ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr และฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดจากพืชในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ที่ขึ้นรูปจากกระบวนการ Cast film extrusion โดยฟิล์มมีความหนา 90±30 ไมครอน

4.2.1 ศึกษาความทึบแสงของฟิล์ม (Opacity of films) ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

จากการทดสอบความทึบแสงของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิล ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ซึ่งใช้ความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวตลื่น 300-800 นาโนเมตร และทำการพิจารณาค่าความทึบแสงของฟิล์ม (Opacity) โดยใช้การดูดกลืนแสงที่ช่วง 600 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4.23 และตารางที่ 4.12 และ 4.13



รูปที่ 4.23 แสดงค่าความทึบแสงของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความทึบแสงของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน

Sample	Opacity
Neat PBAT	4.83±0.03[a]
PBAT/AL0.25phr	4.90±0.53[a]
PBAT/AL0.5phr	5.20±0.29[a]
PBAT/AL1phr	5.46±0.73[a]

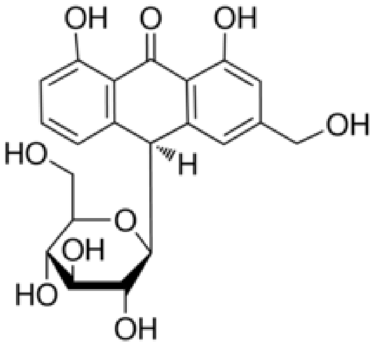
ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความทึบแสงของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

Sample	Opacity
Neat PBAT	4.83±0.03[b]
PBAT/AP0.25phr	5.06±0.39[a,b]
PBAT/AP0.5phr	5.26±0.35[a,b]
PBAT/AP1phr	5.73±0.11[a]

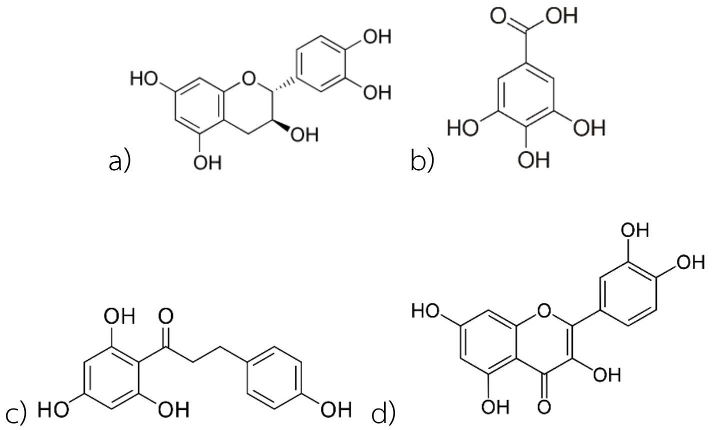
จากรูปที่ 4.23 แสดงค่าความทึบแสงของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ (AL) และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิล (AP) ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr เมื่อพิจารณาค่าความทึบแสงของการเติม AL ลงใน PBAT ดังรูปที่ 4.23 และตารางที่

4.12 พบว่าฟิล์ม Neat PBAT มีค่าความทึบแสงเท่ากับ 4.83±0.03 แต่เมื่อเติม AL ในปริมาณมากขึ้น คือ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr พบว่าค่าความทึบแสงของฟิล์มนั้นมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นการเติม AL ลงใน PBAT จึงไม่ได้ส่งผลต่อค่าความทึบแสงของฟิล์ม แต่เมื่อพิจารณาค่าความทึบแสงของการเติม AP ลงใน PBAT ดังรูปที่ 4.23 และตารางที่ 4.13 พบว่าเมื่อเติม AP ในปริมาณมากขึ้นคือ 0.25 และ 0.50 phr พบว่าค่าความทึบแสงของฟิล์มนั้นมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับฟิล์ม Neat PBAT ดังนั้นการเติม AP ลงใน PBAT ถึงปริมาณ 0.50 phr จึงไม่ได้ส่งผลต่อค่าความทึบแสงของฟิล์ม แต่เมื่อเติม AP ในปริมาณ 1.00 phr พบว่าฟิล์มมีค่าความทึบแสงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

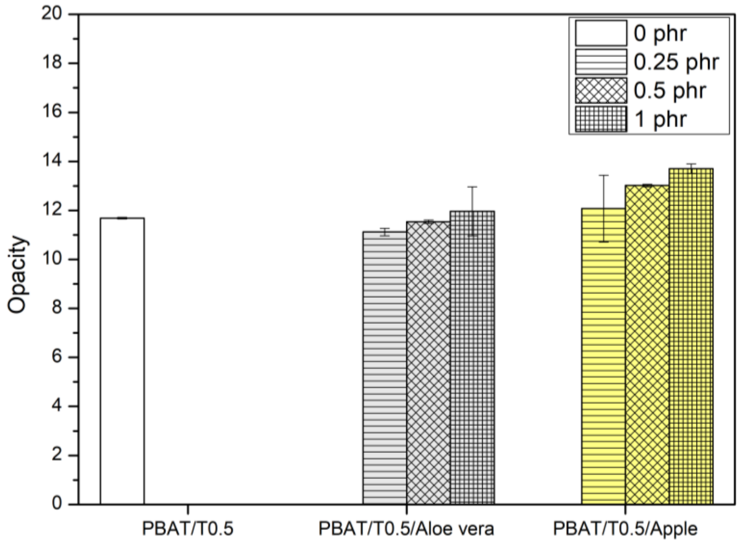
เมื่อเปรียบเทียบผลของการเติม AL และ AP พบว่า การเติม AP ลงใน PBAT จะทำให้ฟิล์มที่ได้มีค่าความทึบแสงมากกว่าการเติม AL ซึ่งอาจเป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพของผงสารสกัด เนื่องจาก AL มีลักษณะเป็นผงสีขาว ส่วน AP มีลักษณะผงเป็นสีเหลือง หรือในอีกกรณีหนึ่งอาจเป็นผลมาจากสารสำคัญที่อยู่ในสารสกัด โดยใน AL จะมีสารสำคัญคือ Aloin ซึ่งจัดเป็นสารประกอบฟีนอลิกที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 4.24 เมื่อเติมลงไปในปริมาณมาก จึงทำให้แสงเดินทางผ่านได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นแสงจึงส่องผ่านฟิล์มได้ลดลง และอาจเป็นผลมาจากการที่ใน AP ประกอบไปด้วยสารสำคัญคือ Polyphenols จำนวนมาก ได้แก่ Catechin, Gallic acid, Phloretin และ Quercetin ซึ่งจัดเป็นสารประกอบฟีนอลิกที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่เช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 4.25 แต่ใน AP มีปริมาณ Polyphenols มากกว่า Aloin ในว่านหางจระเข้ แสดงดังตารางที่ 3.1 จึงส่งผลให้การเติม AP มีค่าความทึบแสงมากกว่าการเติม AL



รูปที่ 4.24 แสดงโครงสร้างของ Aloin ในสารสกัดว่านหางจระเข้ [42]



รูปที่ 4.25 แสดงโครงสร้างของ Polyphenols ในสารสกัดแอปเปิล a) Catechin [36] b) Gallic acid [37] c) Phloretin [38] และ d) Quercetin [39]



รูปที่ 4.26 แสดงค่าความทึบแสงของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าความทึบแสงของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน

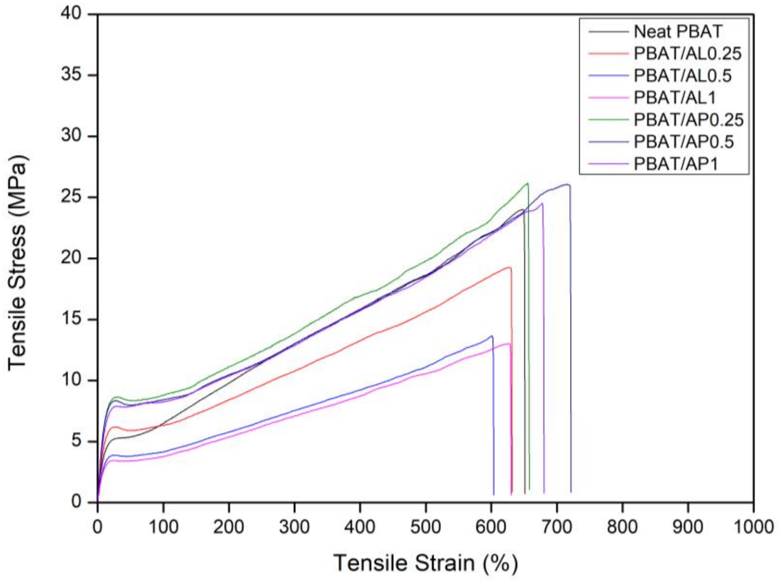
Sample	Opacity
PBAT/T0.5	11.68 ± 0.04^a
PBAT/T0.5/AL0.25phr	11.12 ± 0.15^a
PBAT/T0.5/AL0.5phr	11.54 ± 0.07^a
PBAT/T0.5/AL1phr	11.96 ± 1.00^a

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าความทึบแสงของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

Sample	Opacity
PBAT/T0.5	11.68±0.04[a]
PBAT/T0.5/AP0.25phr	12.07±1.36[a]
PBAT/T0.5/AP0.5phr	13.02±0.05[a]
PBAT/T0.5/AP1phr	13.70±0.19[a]

จากรูปที่ 4.26 และตารางที่ 4.14 แสดงค่าความทึบแสงของฟิล์ม PBAT/T0.5 และฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติม AL ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr พบว่า PBAT/T0.5 มีค่าความทึบแสงเท่ากับ 11.68 ± 0.04 และเมื่อทำการเติม AL ลงไปในปริมาณมากขึ้น พบว่าไม่ส่งผลต่อค่าความทึบแสงของฟิล์ม กล่าวคือ การเติม TiO_2 ในปริมาณ 0.50 % wt ร่วมกับ AL ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ไม่ส่งผลต่อค่าความทึบแสงของฟิล์ม เมื่อพิจารณาการเติม AP ลงใน PBAT/T0.5 ดังรูปที่ 4.26 และตารางที่ 4.15 พบว่าการเติม AP ในปริมาณ 1.00 phr ส่งผลต่อความทึบแสงของฟิล์ม PBAT/T0.5

4.2.2 ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่เติมสารสกัดจากพืช โดยการทดสอบสมบัติการดึงยืดด้วยเครื่อง Universal testing machine

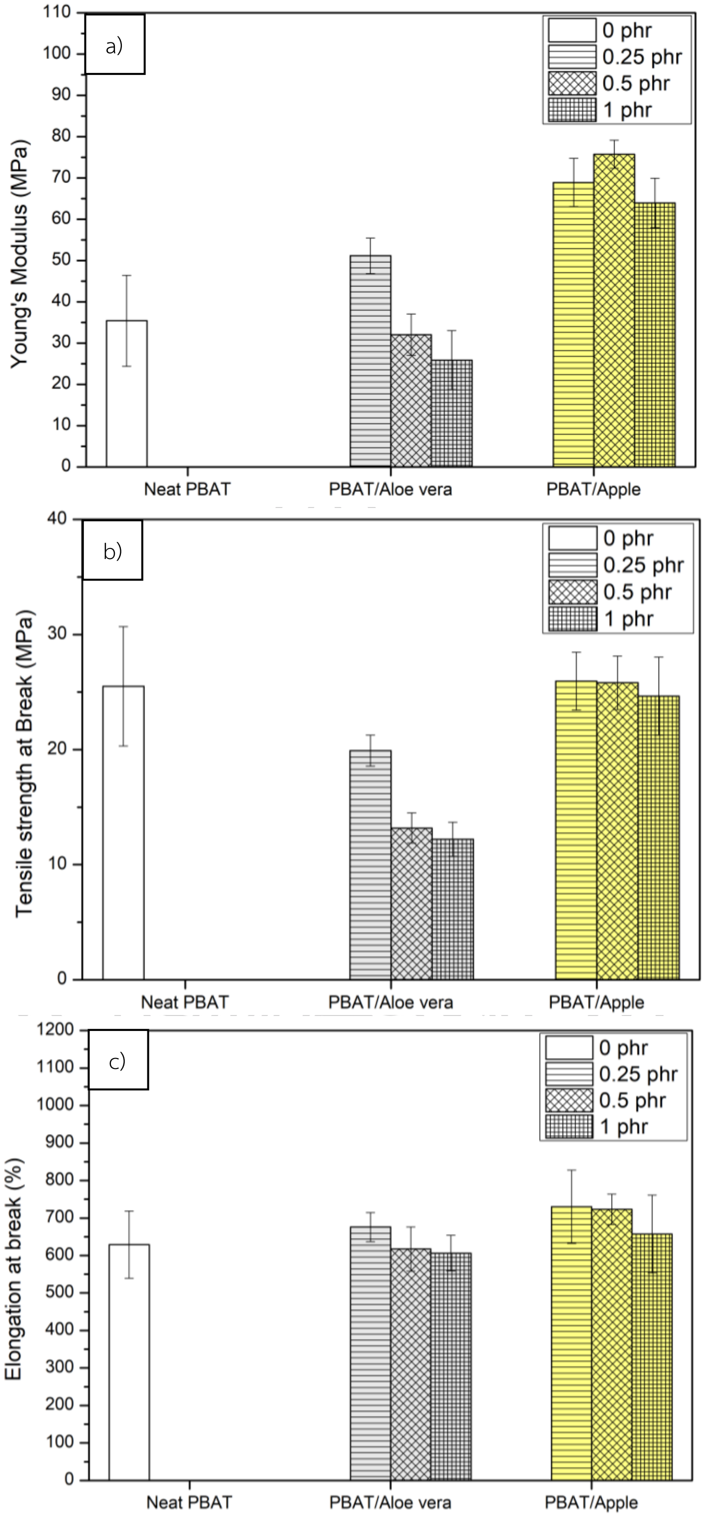


รูปที่ 4.27 แสดง Stress-Strain Curve ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile stress และ Tensile strain ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิล พบว่าฟิล์มมีลักษณะที่เป็น Ductile โดยมีช่วง Elastic deformation ที่ค่อนข้างสั้นและปรากฏจุด Yield point ซึ่งหลังจากจุด Yield point จะเป็นช่วงของ Plastic deformation และมีการเกิด Strain hardening ที่แสดงถึงการจัดเรียงตัวที่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแรง

สมบัติเชิงกลด้านการต้านทานต่อแรงดึงยืด ได้แก่ Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของฟิล์ม Neat PBAT และ PBAT ที่มีการเติม AL ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr แสดงดังรูปที่ 4.28 และตารางที่ 4.16 พบว่าเมื่อเติม AL มากขึ้นทำให้ค่า Young's modulus มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเติม AL ลงไปจะเป็นการรบกวนสายโซ่ของ PBAT ที่เป็นเมทริกซ์หลัก เนื่องจากใน AL มีสารสำคัญคือ Aloin ซึ่งเป็นสารประกอบฟีนอลิกที่มีขนาดโครงสร้างที่ค่อนข้างใหญ่ จึงทำให้เป็นการรบกวน interaction และการจัดเรียงตัวกันของสายโซ่หลัก ส่งผลให้ฟิล์มทนต่อการเสียรูปได้น้อยลงเมื่อได้รับแรง เมื่อพิจารณาค่า Tensile strength พบว่าเมื่อเติม AL ลงใน PBAT ในปริมาณมากขึ้น จะส่งผลให้ค่า Tensile strength ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่ Aloin ที่อยู่ใน AL เกิดการขัดขวางสายโซ่เช่นเดียวกัน ส่งผลให้เมื่อได้รับแรงจึงทำให้เกิดการรับแรงได้ลดลงก่อนเกิดการฉีกขาด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Sui Chin และคณะ [12] ที่มีการเติมเจลว่านหางจระเข้ในปริมาณ 1, 3, 5, 7 และ 9 % w/w ลงใน Fish gelatin พบว่า เมื่อเติมเจลว่านหางจระเข้ในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ค่า Tensile strength ลดลง เนื่องจากการเติมเจลว่านหางจระเข้จะเป็นการรบกวน interaction และการจัดเรียงตัวของสายโซ่เจลาติน และเมื่อพิจารณาค่า Elongation at break พบว่าเมื่อเติม AL ในปริมาณ 0.25 phr จะส่งผลให้ฟิล์มมีค่า Elongation at break มีค่าสูงกว่าฟิล์ม Neat PBAT อย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยทั่วไป AL จะทำหน้าที่เป็น Plasticizer ให้แก่ matrix ส่งผลให้ไปลด intermolecular forces ระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้ช่วยเพิ่มการเคลื่อนไหวให้กับเมทริกซ์ รวมถึงทำให้ฟิล์มสามารถทนการดึงยืดได้มากขึ้นก่อนเกิดการฉีกขาด ซึ่งงานวิจัยของ S. Sui Chin และคณะ [12] ได้ทำการเติมเจลว่านหางจระเข้ลงใน Fish gelatin ในปริมาณ 1, 3, 5, 7 และ 9 % wt ซึ่งพบว่าค่า Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากว่านหางจระเข้จะทำหน้าที่หลักในการเป็น Plasticizer ให้แก่ Fish gelatin ซึ่งช่วยในการปรับปรุงสมบัติการดึงยืดของฟิล์ม และเป็นการช่วยเพิ่มการเคลื่อนไหวให้กับสายโซ่ของเจลาติน แต่เมื่อเติม AL ลงไปในปริมาณ 0.50 และ 1.00 phr พบว่าค่า Elongation at break มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์ม Neat PBAT

เมื่อพิจารณาการเติม AP ลงใน PBAT ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ซึ่งแสดงค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ดังรูปที่ 4.28 และตารางที่ 4.17 พบว่าเมื่อเติม AP ในปริมาณมากขึ้นคือ 0.25 และ 0.50 phr ส่งผลให้ค่า Young's modulus ของฟิล์ม PBAT/AP มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติมในปริมาณ 1.00 phr จะทำให้ค่า Young's modulus มีค่าลดลงแต่ยังคงสูงกว่าค่า Young's modulus ของฟิล์ม Neat PBAT ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่ผง AP มีรูปร่างที่ค่อนข้างเป็นทรงกลม ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวใน matrix ได้ค่อนข้างดี ซึ่งเห็นได้จากการศึกษาทางสัณฐานวิทยาดังรูปที่ 4.33 ดังนั้นเมื่อได้รับแรง AP จะประพฤติตัวเป็น Filler ซึ่งช่วยเสริมแรงให้กับตัว matrix ได้ ดังนั้น AP จึงมีส่วนช่วยในการรับแรงก่อนที่จะถูกถ่ายโอนแรงมายัง matrix จึงส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการต้านทานการเสียรูปได้มากขึ้นเมื่อได้รับแรง หรืออาจเป็นผลมาจากการที่ใน AP มีสารสำคัญในโครงสร้างที่เป็น Polyphenols ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่และมีอยู่จำนวนมาก ดังนั้นเมื่อได้รับแรงจึงส่งผลให้ฟิล์มเกิดการต้านทานการเสียรูปได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาค่า Tensile strength พบว่าเมื่อเติม AP ลงใน PBAT ในปริมาณมากขึ้น จะไม่ส่งผลต่อค่า Tensile strength และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่า Elongation at break ระหว่างฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่เติม AP พบว่าเมื่อเติม AP ในปริมาณ 0.25 และ 0.50 phr ส่งผลให้ค่า Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติม AP 1.00 phr ค่า Elongation at break มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์ม Neat PBAT ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่า Elongation at break เป็นผลมาจากการที่ AP มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเปรียบเสมือนการเติม Plasticizer ให้กับ matrix จึงเป็นการเพิ่มการเคลื่อนไหวให้กับสายโซ่ ทำให้ฟิล์มทนต่อการดึงยืดได้มากขึ้นนั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kirtiraj K. Gaikwad และคณะ [11] ที่มีการเติมกากแอปเปิลลงใน PVA ซึ่งพบว่าการเติมกากแอปเปิลที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบจะทำหน้าที่เป็น Plasticizer ให้แก่ฟิล์ม รวมถึงส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มด้วย นอกจากนี้การเติมสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก เช่น สารประกอบฟีนอลิกที่อยู่ในกากแอปเปิลก็สามารถส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มได้เช่นเดียวกัน



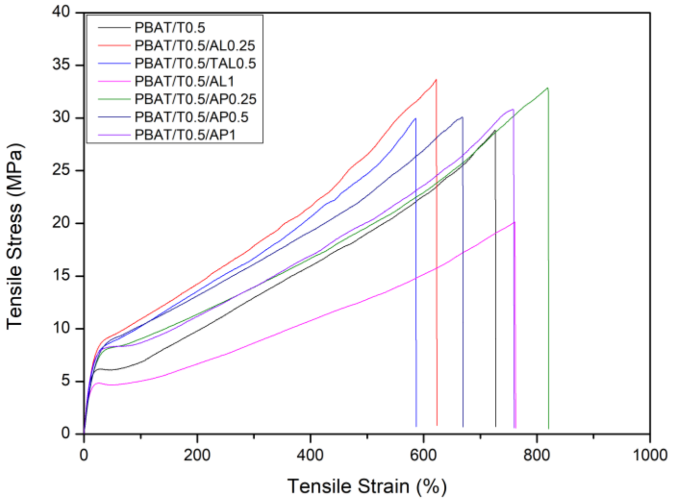
รูปที่ 4.28 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน a) Young’s modulus b) Tensile strength และ c) Elongation at break

ตารางที่ 4.16 แสดงค่า Young’s modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน

Sample	Tensile properties		
	Young’s modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
Neat PBAT	35.41 ± 11.02^{b}	25.50 ± 5.19^{a}	$628.93\pm89.73^{a,b}$
PBAT/AL0.25phr	51.14 ± 4.31^{a}	19.91 ± 1.35^{b}	675.96 ± 38.85^{a}
PBAT/AL0.5phr	32.04 ± 5.00^{b}	13.18 ± 1.32^{c}	617.28 ± 58.95^{b}
PBAT/AL1phr	25.87 ± 7.12^{c}	12.20 ± 1.49^{c}	606.40 ± 47.75^{b}

ตารางที่ 4.17 แสดงค่า Young’s modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

Sample	Tensile properties		
	Young’s modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
Neat PBAT	35.41 ± 11.02^{c}	25.50 ± 5.19^{a}	628.93 ± 89.73^{b}
PBAT/AP0.25phr	$68.92\pm5.82^{a,b}$	25.95 ± 2.51^{a}	730.10 ± 97.66^{a}
PBAT/AP0.5phr	75.72 ± 3.40^{a}	25.81 ± 2.32^{a}	723.14 ± 40.20^{a}
PBAT/AP1phr	63.96 ± 6.01^{b}	24.65 ± 3.39^{a}	$657.33\pm103.94^{a,b}$



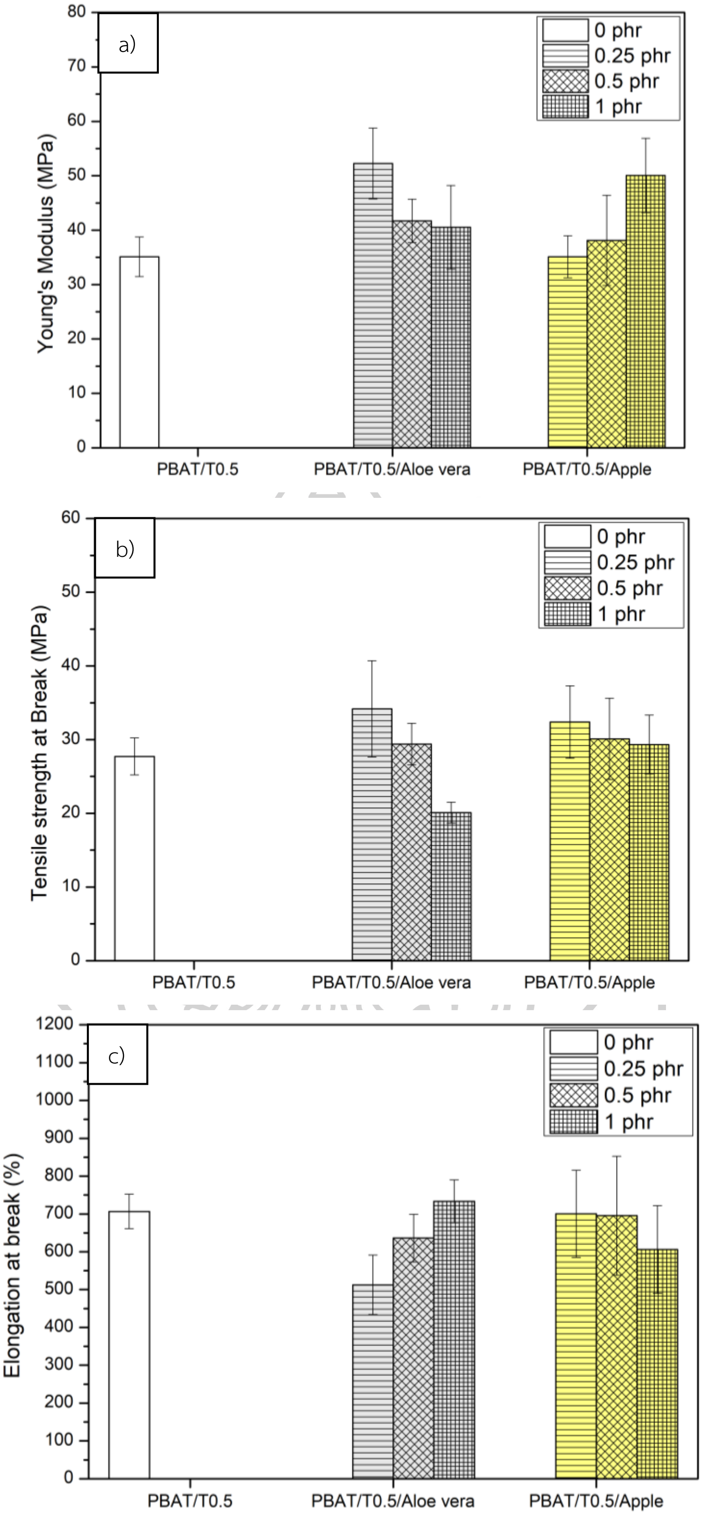
รูปที่ 4.29 แสดง Stress-Strain Curve ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile stress และ Tensile strain ของฟิล์ม PBAT/T0.5 และฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ และฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิล พบว่าฟิล์มมีลักษณะเป็น Ductile โดยมีช่วง Elastic deformation ที่ค่อนข้างสั้นและปรากฏจุด Yield point ซึ่งหลังจากจุด Yield point จะเป็นช่วงของ Plastic deformation และมีการเกิด Strain hardening ที่แสดงถึงการจัดเรียงตัวที่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแรง

จากการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลด้านการต้านทานต่อแรงดึงยืด ได้แก่ Young’s modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของฟิล์ม PBAT/T0.5 และ PBAT/T0.5 ที่มีการเติม AL ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr แสดงดังรูปที่ 4.30 และตารางที่ 4.18 พบว่า Young’s modulus มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับฟิล์ม PBAT/T0.5 ซึ่งเป็นผลมาจากการเติม TiO_2 และ AL ลงไปใน PBAT โดย TiO_2 ที่เติมลงไปสามารถกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอใน matrix โดย TiO_2 จะประพฤติตัวเป็น Filler ซึ่งช่วยเสริมแรงให้กับตัว matrix จึงมีส่วนช่วยในการรับแรงก่อนที่จะถูกถ่ายโอนแรงมายัง matrix ส่งผลให้ช่วยต้านทานการเสียรูปของฟิล์มได้มากขึ้นเมื่อได้รับแรง ประกอบกับการเติม AL ร่วมด้วยเปรียบเสมือนการเติม Filler ลงใน matrix เช่นเดียวกัน AL จึงมีส่วนช่วยในการรับแรงที่มากระทำได้เพิ่มขึ้น และทำให้เกิดการต้านทานการเสียรูปได้มากขึ้นเมื่อทำงานร่วมกับ TiO_2 แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเติม AL ในปริมาณมากขึ้นที่ 0.50 และ 1.00 phr ส่งผลให้ Young’s modulus ของฟิล์มมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาค่า Tensile strength พบว่าเมื่อเติม AL ในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ค่า Tensile strength ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากใน AL มีสารสำคัญคือ Aloin [42] ที่เป็นสารที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ เมื่อเติมลงไปในปริมาณมากขึ้นจะทำให้เกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่หลัก ดังนั้นเมื่อได้รับแรงมากขึ้นจึงทำให้เกิดการฉีกขาดได้ง่ายขึ้น และเมื่อพิจารณาค่า Elongation at break พบว่าเมื่อเติม AL ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ค่า Elongation at break เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเติม AL ทำหน้าที่เสมือนเป็น Plasticizer ให้แก่ matrix ส่งผลให้ไปลด intermolecular forces ระหว่างโมเลกุล ทำให้สายโซ่เกิดการเคลื่อนไหวได้มากขึ้น และเกิดการยืดออกได้มากขึ้นเมื่อได้รับแรง แต่อย่างไรก็ตาม ฟิล์มที่ได้ยังคงมีค่า Young’s modulus เทียบเท่ากับฟิล์ม PBAT/T0.5 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Sui Chin และคณะ [12] ที่มีการเติมเจลว่านหางจระเข้ในปริมาณที่มากขึ้นลงใน Fish gelatin ซึ่งพบว่าค่า Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากในเจลว่านหางจระเข้มีส่วนประกอบที่เป็น hydrophilic จึงทำให้มีความเข้ากันได้กับเจลาติน ทำให้เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงระหว่าง

เจลาตินและว่านหางจระเข้ ส่งผลให้ไปลด interaction ระหว่างเจลาตินด้วยกันเอง จึงเป็นเหตุให้สายโซ่เกิดการเคลื่อนไหวได้มากขึ้น

เมื่อพิจารณาการเติม AP ลงใน PBAT/T0.5 ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ซึ่งแสดงค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ดังรูปที่ 4.30 และตารางที่ 4.19 พบว่าเมื่อเติม AL ในปริมาณ 0.25 และ 0.50 phr ไม่ส่งผลต่อค่า Young's modulus ของฟิล์ม PBAT/T0.5 แต่จะมีผลอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเติมที่ปริมาณ 1.00 phr ซึ่งเป็นผลมาจากการเติม TiO_2 และ AP ลงใน matrix ซึ่งเปรียบเสมือนการเติม Filler ให้แก่ matrix เมื่อได้รับแรงจึงทำให้เกิดการส่งผ่านแรงมายัง TiO_2 และ AP ก่อนที่จะถูกถ่ายโอนไปยัง matrix ทำให้ฟิล์มเกิดการต้านทานการเสียรูปได้มากขึ้นเมื่อได้รับแรงภายนอกมากระทำ หรืออาจเป็นผลมาจากการที่ใน AP มีสารสำคัญในโครงสร้างที่เป็น Polyphenols ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่และมีอยู่จำนวนมาก ดังนั้นเมื่อได้รับแรงจึงส่งผลให้ฟิล์มเกิดการต้านทานการเสียรูปได้มากขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาค่า Tensile strength พบว่าเมื่อเติม AP ลงใน PBAT ในปริมาณมากขึ้น พบว่าค่า Tensile strength มีแนวโน้มลดลงแต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่ AP มี Polyphenols อยู่ในโครงสร้าง จึงอาจทำให้เกิดการขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ เมื่อได้รับแรงกระทำจึงทำให้รับแรงได้ลดลงก่อนเกิดการฉีดขาด และเมื่อพิจารณาค่า Elongation at break พบว่าเมื่อเติม AP ในปริมาณมากขึ้นจะไม่ส่งผลต่อค่า Elongation at break ของฟิล์ม PBAT/T0.5



รูปที่ 4.30 แสดงสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน a) Young's modulus b) Tensile strength และ c) Elongation at break

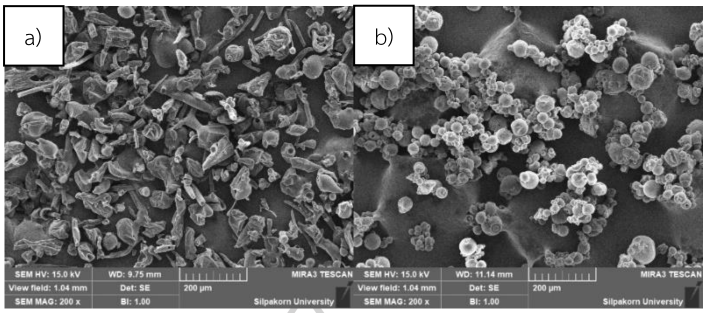
ตารางที่ 4.18 แสดงค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน

Sample	Tensile properties		
	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PBAT/T0.5	35.12 ± 3.64^{c}	27.71 ± 2.51^{b}	706.75 ± 45.24^{a}
PBAT/T0.5/AL0.25phr	52.25 ± 6.53^{a}	34.18 ± 6.53^{a}	512.73 ± 78.76^{c}
PBAT/T0.5/AL0.5phr	41.70 ± 4.01^{b}	29.40 ± 2.84^{b}	636.24 ± 62.90^{b}
PBAT/T0.5/AL1phr	40.53 ± 7.67^{b}	20.10 ± 1.40^{c}	733.48 ± 56.57^{a}

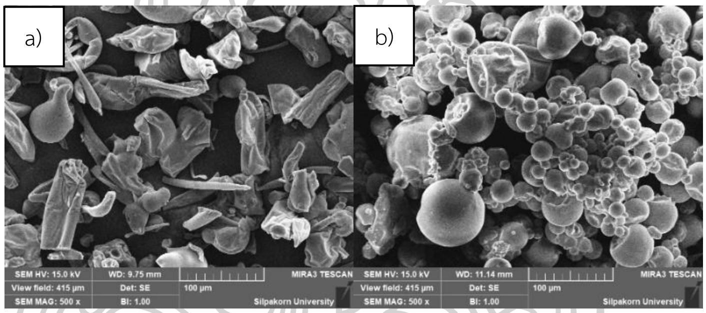
ตารางที่ 4.19 แสดงค่า Young's modulus, Tensile strength และ Elongation at break ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

Sample	Tensile properties		
	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PBAT/T0.5	35.12 ± 3.64^{b}	27.71 ± 2.51^{b}	706.75 ± 45.24^{a}
PBAT/T0.5/AP0.25phr	35.10 ± 3.85^{b}	32.41 ± 4.92^{a}	700.41 ± 115.06^{a}
PBAT/T0.5/AP0.5phr	38.13 ± 8.30^{b}	$30.10 \pm 5.52^{a,b}$	695.41 ± 157.08^{a}
PBAT/T0.5/AP1phr	50.06 ± 6.85^{a}	$29.34 \pm 3.99^{a,b}$	606.33 ± 115.82^{a}

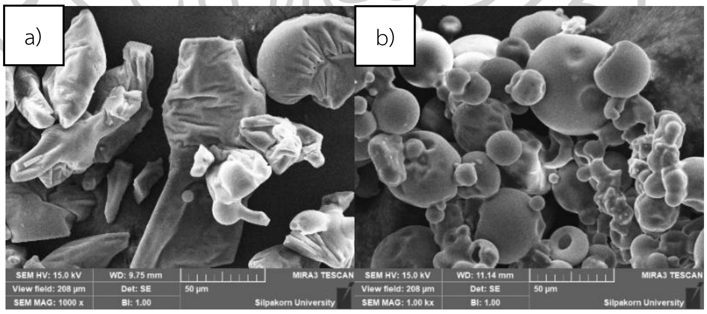
4.2.3 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ที่เติมสารสกัดจากพืช ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)



รูปที่ 4.31 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง a) สารสกัดว่านหางจระเข้ (Aloe vera Extract) b) สารสกัดแอปเปิล (Apple Extract) ที่กำลังขยาย 200 เท่า (200X) โดยใช้โหมด SE



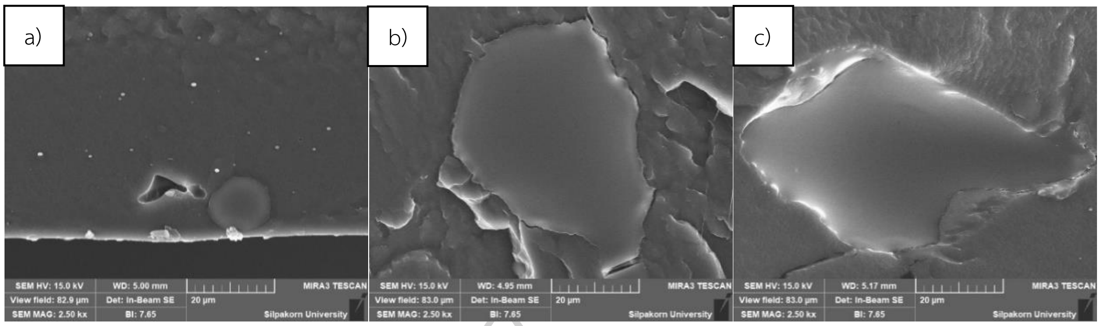
รูปที่ 4.32 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง a) สารสกัดว่านหางจระเข้ (Aloe vera Extract) b) สารสกัดแอปเปิล (Apple Extract) ที่กำลังขยาย 500 เท่า (500X) โดยใช้โหมด SE



รูปที่ 4.33 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผง a) สารสกัดว่านหางจระเข้ (Aloe vera Extract) b) สารสกัดแอปเปิล (Apple Extract) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (1000X) โดยใช้โหมด SE

รูปที่ 4.31 – 4.33 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผงสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลที่กำลังขยายต่างกันคือ 200, 500 และ 1000 เท่า พบว่าผงสารสกัดว่านหางจระเข้มีลักษณะที่เป็นแท่ง มีขนาดรูปร่างที่ไม่แน่นอน ซึ่งมีขนาดความยาวประมาณ 20 - 100 ไมครอน แต่ผงสาร

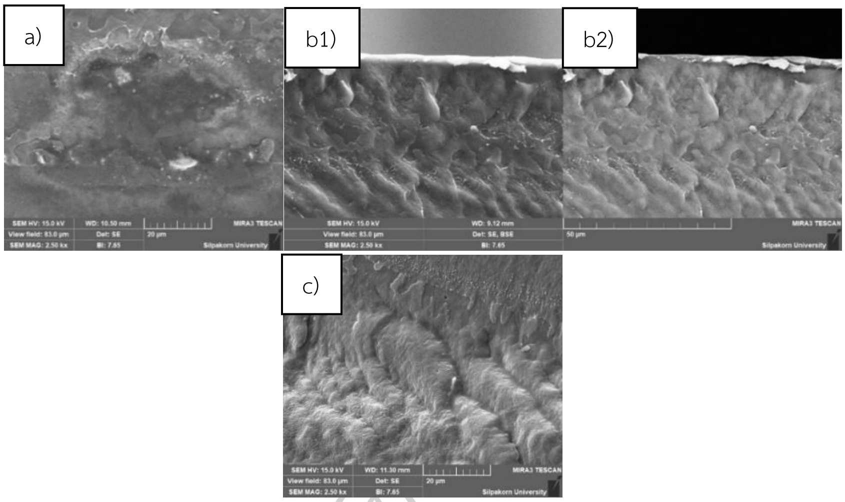
สกัดแอปเปิลจะมีรูปร่างที่ค่อนข้างเป็นทรงกลม มีขนาดประมาณ 5 – 50 ไมครอน ซึ่งถือว่ามีขนาดเล็กกว่าถ้าเปรียบเทียบกับผงสารสกัดว่านหางจระเข้



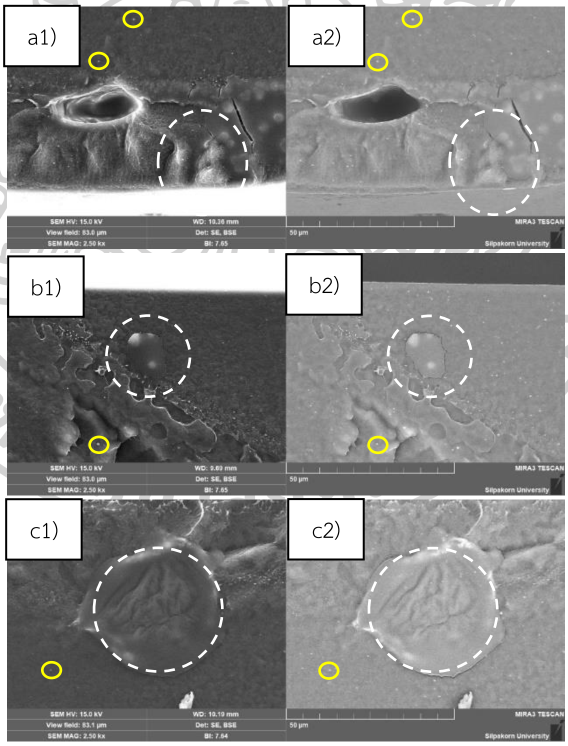
รูปที่ 4.34 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน ที่กำลังขยาย 2500 เท่า (2500X) a) PBAT/AL0.25 b) PBAT/AL0.5 และ c) PBAT/AL1 โดยใช้โหมด SE

จากรูปที่ 4.34 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม AL ในปริมาณต่างกันคือ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ที่กำลังขยาย 2500 เท่า พบว่าเมื่อเติม AL ในปริมาณ 0.25 phr ดังรูป 4.34 a) จะพบอนุภาคของผง AL ที่มีขนาดประมาณ 14 ไมครอน กระจายตัวอยู่ใน PBAT matrix แต่พบว่าอนุภาคเหล่านั้นจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคผง AL (14-20 ไมครอน ดังรูป 4.33 a)) ก่อนทำการเติมลงใน PBAT ซึ่งการลดขนาดของผงอาจเป็นผลมาจากกระบวนการผสมและขึ้นรูปฟิล์มที่มีทั้งความร้อนและแรงเฉือนเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่เมื่อเติม AL ในปริมาณมากขึ้นคือ 0.50 และ 1.00 phr ดังรูปที่ 4.34 b) และ c) จะพบเป็นกลุ่มของผง AL ที่มีขนาดประมาณ 40-60 ไมครอน อยู่บริเวณผิวของ matrix ซึ่งส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความหนามากขึ้นด้วย นอกจากนี้ AL ที่กระจายตัวอยู่ทั่ว matrix ซึ่งเป็นการกระจายตัวของผงที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่และปริมาณมากขึ้นใน matrix นั้น สามารถส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการศึกษาสมบัติเชิงกลดังรูปที่ 4.28

รูปที่ 4.35 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม AP ในปริมาณต่างกันคือ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ที่กำลังขยาย 2500 เท่า พบว่าเมื่อเติม AP ในปริมาณ 0.25 phr ดังรูป 4.35 a) จะพบอนุภาคของผง AP กระจายตัวอยู่ใน PBAT matrix และเมื่อเติม AP ในปริมาณมากขึ้นคือ 0.50 และ 1.00 phr ดังรูปที่ 4.35 b) และ c) จะพบว่ามี AP ในปริมาณมากขึ้นตามลำดับ และกระจายตัวอยู่ทั่วใน matrix รวมถึงมีการพบเป็นกลุ่มของผง AP ด้วย ซึ่งอาจเกิดการรวมกลุ่มกันเองของตัวอนุภาคผง AP ซึ่งการเติม AP ในปริมาณที่มากขึ้นนี้สามารถส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มได้เช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลดังรูปที่ 4.28

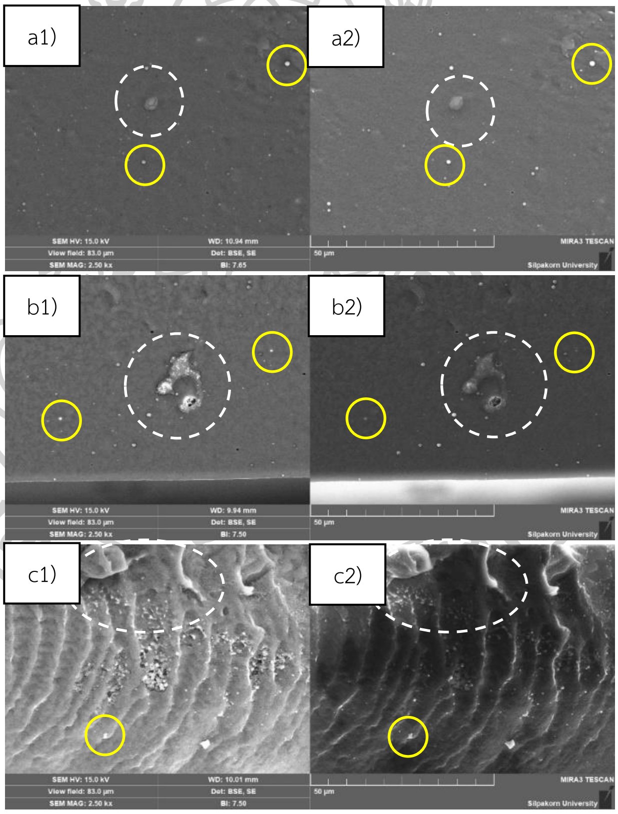


รูปที่ 4.35 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน ที่กำลังขยาย 2500 เท่า (2500X) a) PBAT/AP0.25 (โหมด SE) b1) PBAT/AP0.5 (โหมด BSE) b2) PBAT/AP0.5 (โหมด BSE) และ c) PBAT/AP1 (โหมด SE)



รูปที่ 4.36 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 0.50 % wt และสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน ที่กำลังขยาย 2500 เท่า (2500X) a1) PBAT/T0.5/AL0.25 b1) PBAT/T0.5/AL0.5 และ c1) PBAT/T0.5/AL1 (โหมด SE) และ a2) PBAT/T0.5/AL0.25 b2) PBAT/T0.5/AL0.5 และ c2) PBAT/T0.5/AL1 (โหมด BSE)

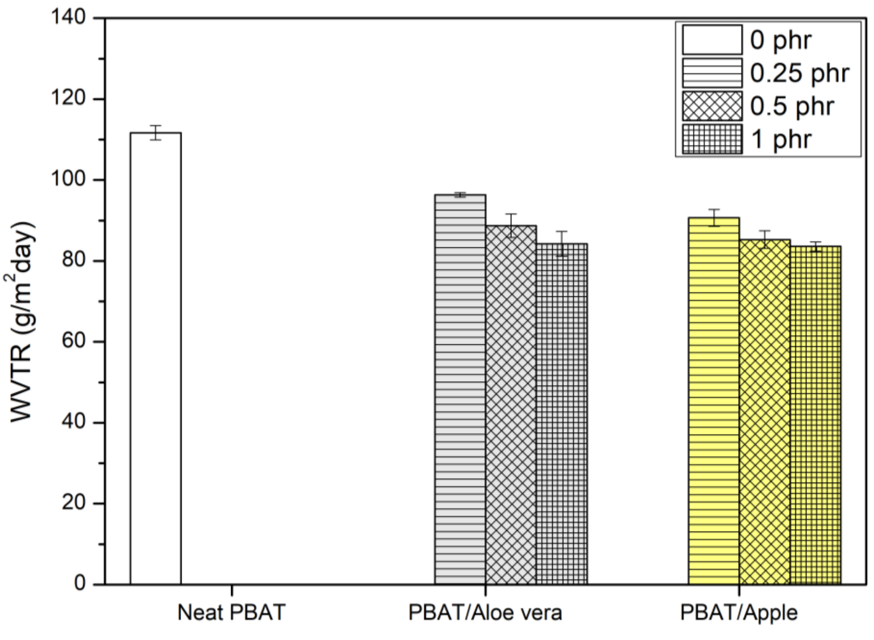
จากรูปที่ 4.36 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติม AL ในปริมาณต่างกันคือ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ที่กำลังขยาย 2500 เท่า พบว่าจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มนั้นปรากฏทั้งอนุภาคของผง TiO_2 และอนุภาคของผง AL กระจายตัวร่วมกันอยู่ใน PBAT matrix โดยพบว่าอนุภาคของ TiO_2 จะมีขนาดอยู่ที่ประมาณ 0.1 – 0.4 ไมครอน (แสดงด้วยวงกลมสีเหลืองทึบในภาพ) โดยผงของ AL นั้นมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของผง TiO_2 โดยมีขนาดอยู่ที่ประมาณ 20 – 100 ไมครอน (แสดงด้วยวงกลมเส้นประสีขาวในภาพ) เมื่อเราเติม AL ในปริมาณมากขึ้นจะพบเป็นการรวมกลุ่มกันของผง AL กระจายตัวอยู่ทั่วทั้ง matrix ซึ่งการที่มี AL ในปริมาณที่มากรวมถึงการรวมตัวกันเป็นกลุ่มนี้สามารถส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลจากาการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.37 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม Neat PBAT ที่มีการเติม TiO_2 0.50 % wt และสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน ที่กำลังขยาย 2500 เท่า (2500X) a1) PBAT/T0.5/AP0.25 b1) PBAT/T0.5/AP0.5 และ c1) PBAT/T0.5/AP1 (โหมด SE) และ a2) PBAT/T0.5/AP0.25 b2) PBAT/T0.5/AP0.5 และ c2) PBAT/T0.5/AP1 (โหมด BSE)

รูปที่ 4.37 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติม AP ในปริมาณที่ต่างกันคือ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ที่กำลังขยาย 2500 เท่า พบว่าจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มนั้นปรากฏทั้งอนุภาคของผง TiO_2 และ AP กระจายตัวอยู่ทั่ว matrix โดยอนุภาคของ TiO_2 จะมีขนาดอยู่ที่ประมาณ 0.1 – 0.4 ไมครอน (แสดงด้วยวงกลมสีเหลืองทึบในภาพ) และมีผงของ AP กระจายตัวร่วมอยู่ด้วยใน matrix แต่ผงของ AP นั้นมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของผง TiO_2 โดยมีขนาดประมาณ 5 – 50 ไมครอน (แสดงด้วยวงกลมเส้นประสีขาวในภาพ) เมื่อเติม AP ในปริมาณมากขึ้นตั้งแต่ 0.25 – 1.00 phr จะพบเป็นการรวมกลุ่มกันของผง AP กระจายตัวอยู่ทั่วทั้ง matrix ซึ่งการที่มี AP ในปริมาณที่มากรวมถึงการรวมตัวกันเป็นกลุ่มนี้สามารถส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์ม ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มดังรูปที่ 4.30

4.2.4 ศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate: WVTR) โดยใช้เทคนิค Cup method แบบ Desiccant



รูปที่ 4.38 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

ตารางที่ 4.20 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน

Sample	WVTR (g/m^{2}day)
Neat PBAT	111.66±1.76[a]
PBAT/AL0.25phr	96.30±0.55[b]
PBAT/AL0.5phr	88.69±2.91[c]
PBAT/AL1phr	84.19±3.07[c]

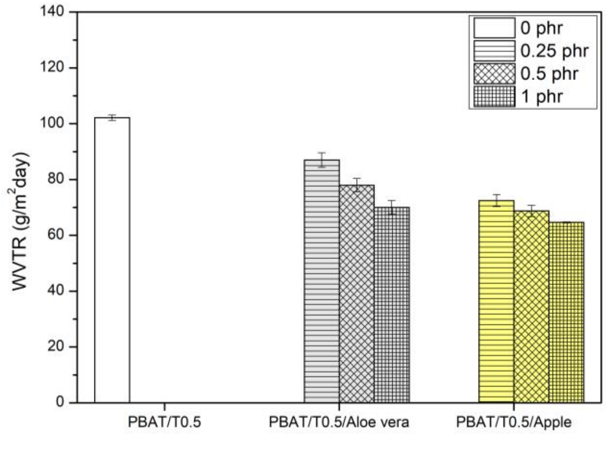
ตารางที่ 4.21 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

Sample	WVTR (g/m^{2}day)
Neat PBAT	111.66±1.76[a]
PBAT/AP0.25phr	90.65±2.09[b]
PBAT/AP0.5phr	85.27±2.14[b,c]
PBAT/AP1phr	83.57±1.16[c]

อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ (Aloe vera Extract: AL) และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิล (Apple Extract: AP) ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ1 phr แสดงดังรูปที่ 4.38 และตารางที่ 4.20 และ 4.21

เมื่อพิจารณาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม AL ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ดังรูปที่ 4.38 และตารางที่ 4.20 พบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำผ่านฟิล์ม PBAT/AL มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม Neat PBAT และเมื่อเติม AL ในปริมาณมากขึ้นพบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำผ่านฟิล์ม PBAT/AL มีค่าลดลง ซึ่งการที่อัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าลดลงเป็นผลมาจากการที่ใน AL จะมีสารสำคัญคือ Aloin ซึ่งเป็นสารประเภทพอลิฟีนอลที่มีโครงสร้างค่อนข้างใหญ่ จึงสามารถขัดขวางอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ รวมถึงช่วยเพิ่มความคดเคี้ยวให้กับเส้นทางการแพร่ผ่านของไอน้ำได้ ทำให้ไอน้ำสามารถแพร่ผ่านได้ช้าลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Sui Chin และคณะ [12] ที่มีการเติมเจลว่านหางจระเข้ลงใน Fish gelatin ซึ่งพบว่าเมื่อเติมเจลว่านหางจระเข้ในปริมาณมากขึ้นจะทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลง เนื่องจากเกิดการ Crosslink ระหว่างเจลาตินและ Polysaccharides ที่อยู่ในว่านหางจระเข้จึงทำให้เป็นการลดพื้นที่ว่างที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของไอน้ำ ทำให้ไอน้ำเกิดการเคลื่อนที่ผ่านได้ยากขึ้น

เมื่อพิจารณาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม AP ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ดังรูปที่ 4.38 และตารางที่ 4.21 พบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำผ่านฟิล์ม PBAT/AP มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และมีอัตราการซึมผ่านที่ต่ำที่สุดเมื่อเติม AP 1.00 phr โดยการที่อัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าลดลงเป็นผลมาจากการที่ใน AP มีสารสำคัญคือ Catechin [36], Gallic acid [37], Phloretin [38] และ Quercetin [39] ซึ่งจัดเป็นสารประเภทพอลิฟีนอลที่มีโครงสร้างค่อนข้างใหญ่ จึงช่วยในการขัดขวางอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ รวมถึงช่วยเพิ่มความคดเคี้ยวให้กับเส้นทางการแพร่ผ่านของไอน้ำได้มากขึ้น ส่งผลให้ไอน้ำสามารถแพร่ผ่านได้ช้าลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Asad Riaz และคณะ [53] ที่มีการศึกษาผลของการเติมเปลือกแอปเปิลลงใน Chitosan พบว่า เมื่อเติมเปลือกแอปเปิลในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการ Crosslink ระหว่างแอปเปิล ไคโตซานและกลีเซอรอล จึงทำให้ Free volume ในเมทริกซ์ลดลง นอกจากนี้การเติมแอปเปิลยังเป็นการเพิ่มความหนาและเพิ่มความหนาแน่นให้แก่ Chitosan matrix ทำให้ไอน้ำต้องใช้เวลานานขึ้นในการซึมผ่านฟิล์ม จึงทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการเติม AL และ AP ที่ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านของไอน้ำพบว่า ฟิล์ม PBAT ที่เติม AP มีค่าอัตราการซึมผ่านที่น้อยกว่าฟิล์ม PBAT ที่เติม AL เนื่องจากใน AP มีสารประเภทพอลิฟีนอลที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ และมีอยู่จำนวนมาก จึงมีส่วนช่วยในการขัดขวางและเพิ่มความคดเคี้ยวของเส้นทางการแพร่ผ่านของไอน้ำได้มากกว่า AL เพราะใน AL มีสารประกอบพอลิฟีนอลที่เป็น Aloin ซึ่งมีโครงสร้างขนาดใหญ่ แต่ใน AL ปริมาณ Aloin ที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับปริมาณ Polyphenols ที่อยู่ใน AP ดังตารางที่ 3.1 ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้ AP สามารถลดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำผ่านฟิล์ม PBAT ได้มากกว่า AL



รูปที่ 4.39 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

ตารางที่ 4.22 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน

Sample	WVTR (g/m^2day)
PBAT/T0.5	102.11 ± 0.94^a
PBAT/T0.5/AL0.25phr	86.97 ± 2.62^b
PBAT/T0.5/AL0.5phr	77.96 ± 2.40^c
PBAT/T0.5/AL1phr	70.00 ± 2.44^d

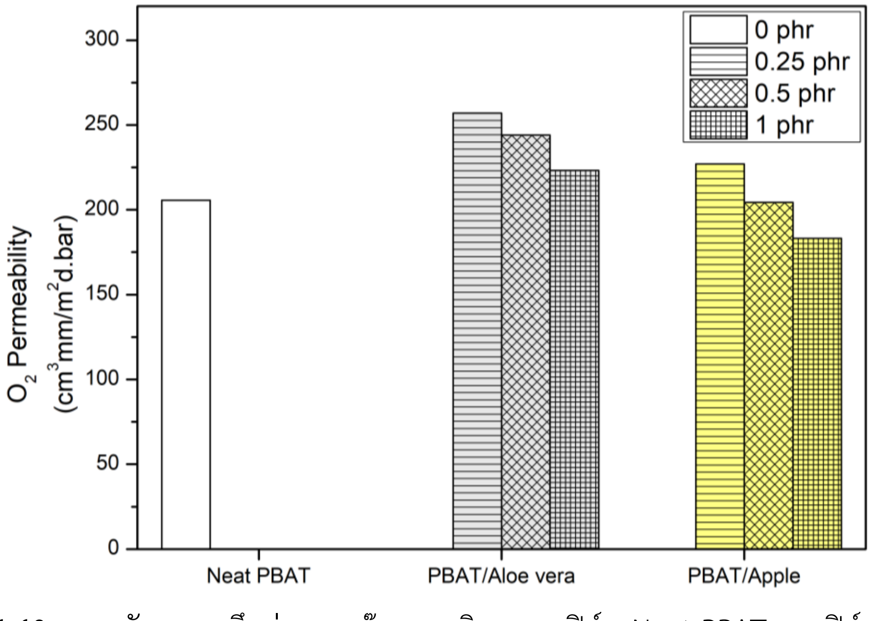
ตารางที่ 4.23 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

Sample	WVTR (g/m^2day)
PBAT/T0.5	102.11 ± 0.94^a
PBAT/T0.5/AP0.25phr	72.47 ± 2.15^b
PBAT/T0.5/AP0.5phr	$68.71 \pm 2.02^{b,c}$
PBAT/T0.5/AP1phr	64.65 ± 0.19^c

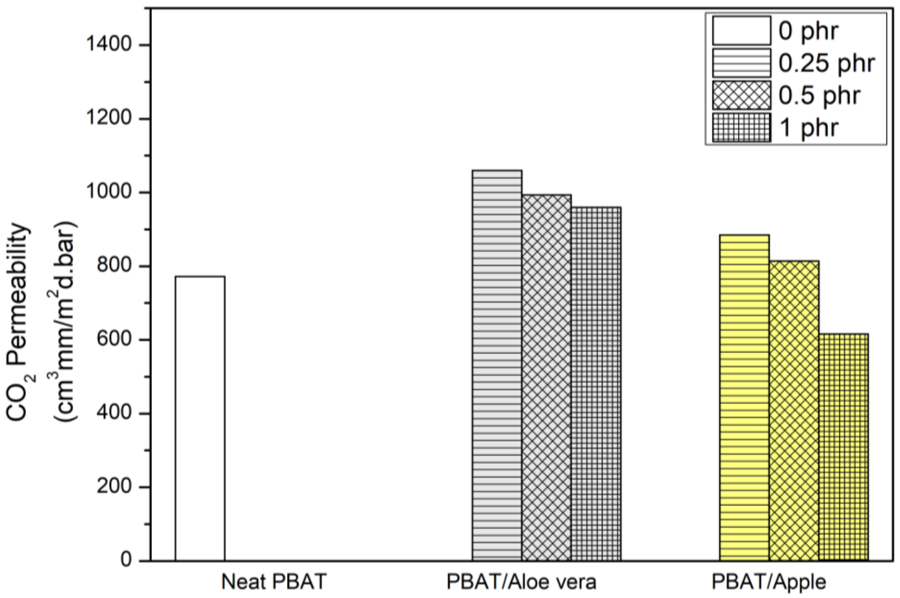
อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม PBAT/T0.5 และฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ (Aloe vera Extract: AL) และฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิล (Apple Extract: AP) ในปริมาณ 0.25, 0.5 และ1 phr แสดงดังรูปที่ 4.39 และตารางที่ 4.22 และ 4.23 เมื่อพิจารณาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติม AL ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ดังรูปที่ 4.39 และตารางที่ 4.22 พบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม PBAT/T0.5 ซึ่งการที่อัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าลดลงเป็นผลมาจากการสาเหตุเดียวกับการเติม AL ลงใน PBAT ดังที่กล่าวไปข้างต้น กล่าวคือ ใน AL มีสารสำคัญคือ Aloin ซึ่งเป็นสารประเภทพอลิฟีนอลที่มีโครงสร้างค่อนข้างใหญ่ ที่ช่วยในการขัดขวางอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และช่วยเพิ่มความคดเคี้ยวให้กับเส้นทางการแพร่ผ่านของไอน้ำได้ ทำให้ไอน้ำสามารถแพร่ผ่านฟิล์มได้ช้าลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Sui Chin และคณะ [12] ที่มีการเติมเจลว่านหางจระเข้ลงใน Fish gelatin ซึ่งพบว่าเมื่อเติมเจลว่านหางจระเข้ในปริมาณมากขึ้นจะทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลง เนื่องจากเกิดการ Crosslink ระหว่างเจลาตินและ Polysaccharides ที่อยู่ในว่านหางจระเข้ จึงทำให้เป็นการลดพื้นที่ว่างที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของไอน้ำ ทำให้ไอน้ำเกิดการเคลื่อนที่ผ่านได้ยากขึ้น

เมื่อพิจารณาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของ PBAT/T0.5 ที่มีการเติม AP ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ดังรูปที่ 4.39 และตารางที่ 4.23 พบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และมีอัตราการซึมผ่านที่ต่ำที่สุดเมื่อเติม AP 1.00 phr โดยการที่อัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าลดลงเป็นผลมาจากการสาเหตุเดียวกับการเติม AP ลงใน Neat PBAT ดังที่กล่าวไปข้างต้น กล่าวคือ เป็นผลมาจากการที่ใน AP มีสารสำคัญคือสารประเภทพอลิฟีนอลที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่อยู่จำนวนมาก จึงช่วยในการขัดขวางอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและช่วยเพิ่มความคดเคี้ยวให้กับเส้นทางการแพร่ผ่านของไอน้ำได้มากขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของการเติม AL และ AP ที่ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านของไอน้ำพบว่า การเติม AP ส่งผลให้ฟิล์มมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่น้อยกว่าฟิล์มที่เติม AL เช่นเดียวกับที่กล่าวไว้ข้างต้น

4.2.5 ศึกษาอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT/TiO_2 biocomposite ด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของก๊าซ (Gas transmission rate)



รูปที่ 4.40 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน



รูปที่ 4.41 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

ตารางที่ 4.24 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน

Sample	O_2 Permeability ($cm^3mm/m^2d.bar$)	CO_2 Permeability ($cm^3mm/m^2d.bar$)
Neat PBAT	205.6	772.0
PBAT/AL0.25phr	257.0	1060.0
PBAT/AL0.5phr	244.0	993.0
PBAT/AL1phr	223.2.0	960.0

ตารางที่ 4.25 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

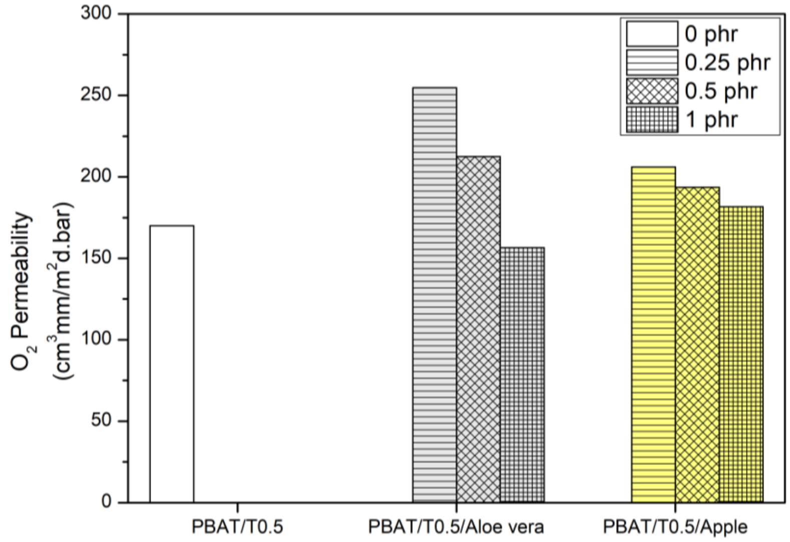
Sample	O_2 Permeability ($cm^3mm/m^2d.bar$)	CO_2 Permeability ($cm^3mm/m^2d.bar$)
Neat PBAT	205.6	772.0
PBAT/AP0.25phr	227.0	885.0
PBAT/AP0.5phr	204.3	813.6
PBAT/AP1phr	183.2	616.5

อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ (Aloe vera Extract: AL) และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิล (Apple Extract: AP) ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ1.00 phr แสดงดังรูปที่ 4.40 และ 4.41 และตารางที่ 4.24 และ 4.25

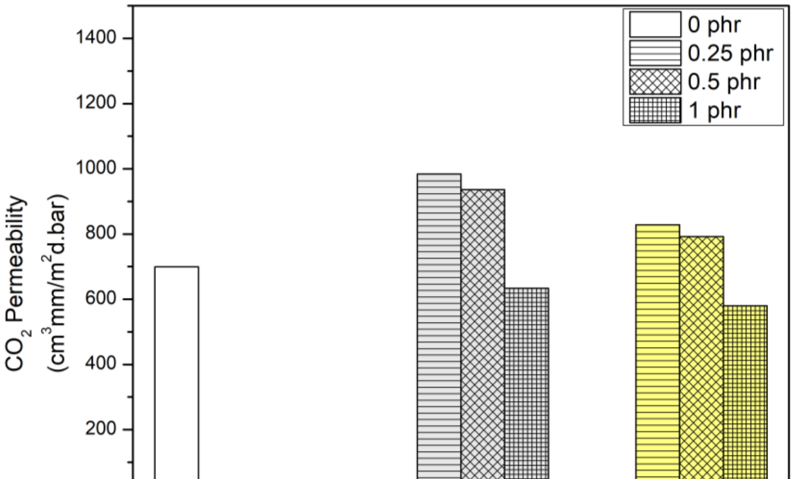
เมื่อพิจารณาอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม AL ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ดังรูปที่ 4.40 และ 4.41 และตารางที่ 4.24 พบว่าฟิล์ม PBAT/AL มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าฟิล์ม Neat PBAT ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่มีอนุภาคของ AL จำนวนมาก แต่อาจเกิดการกระจายตัวในเมทริกซ์ได้ไม่สม่ำเสมอ รวมถึงมีผงบางส่วนที่เกิดการเกาะกลุ่มกันอยู่ทั้งบริเวณกลางฟิล์มและขอบของฟิล์มซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.34 ทำให้ภายในฟิล์มมีช่องว่างเกิดขึ้นจำนวนมาก เมื่อก๊าซเกิดการซึมผ่านฟิล์มจึงสามารถเกิดการแพร่ผ่านได้โดยง่ายส่งผลให้มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม AP ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ดังรูปที่ 4.40 และ 4.41 และตารางที่ 4.25 พบว่าฟิล์ม PBAT/AP ที่เติม AP 0.25 และ 0.50 phr มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่ AP อาจทำหน้าที่เป็น Plasticizer ให้แก่ PBAT ทำให้สายโซ่ของ PBAT เกิดการเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้มีช่องว่างระหว่างสายโซ่โมเลกุลมาก ก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเกิดการแพร่ผ่านฟิล์มได้มากขึ้น รวมถึงมีการรวมกลุ่มกันอยู่บริเวณขอบฟิล์ม ซึ่งแสดงดังรูป 4.35 ส่งผลให้เกิดช่องว่างภายในเมทริกซ์ทำให้ก๊าซเกิดการแพร่ผ่านฟิล์มได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kirtiraj K. Gaikwad และคณะ [11] ที่พบว่าการเติมกากแอปเปิลในปริมาณมากขึ้นลงใน PVA ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมอนุภาคของกากแอปเปิลลงใน PVA จะเป็นการเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดเล็กขึ้นในฟิล์ม จึงทำให้ฟิล์มมีช่องว่างเกิดขึ้น ก๊าซจึงเกิดการแพร่ผ่านฟิล์มได้มากขึ้น แต่ฟิล์ม PBAT/AP ที่เติม AP 1.00 phr มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง โดยอาจเป็นผลมาจากการที่มีอนุภาคของ AP มากขึ้นในเมทริกซ์ และเกิดการกระจายตัวได้มากขึ้น จึงทำให้เกิดการขัดขวางเส้นทางการแพร่ผ่านของก๊าซได้ นอกจากนี้อาจเป็นผลมาจากสารประกอบฟีนอลิกซึ่งเป็นสารที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ที่อยู่ใน AP ด้วย จึงส่งผลให้ช่วยเพิ่มความคดเคี้ยวให้กับเส้นทางการแพร่ผ่านของก๊าซ ทำให้ก๊าซเกิดการแพร่ผ่านได้ลดลง และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการเติม AL และ AP ที่ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและ

คาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มพบว่า การเติม AP มีค่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้อยกว่า AL ซึ่งเป็นเหตุผลในทำนองเดียวกับผลของอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ



รูปที่ 4.42 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน



รูปที่ 4.43 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

ตารางที่ 4.26 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน

Sample	O_2 Permeability ($cm^3mm/m^2d.bar$)	CO_2 Permeability ($cm^3mm/m^2d.bar$)
PBAT/T0.5	170.1	699.3
PBAT/T0.5/AL0.25phr	254.7	984.0
PBAT/T0.5/AL0.5phr	212.4	936.0
PBAT/T0.5/AL1phr	156.6	633.6

ตารางที่ 4.27 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

Sample	O_2 Permeability ($cm^3mm/m^2d.bar$)	CO_2 Permeability ($cm^3mm/m^2d.bar$)
PBAT/T0.5	170.1	699.3
PBAT/T0.5/AP0.25phr	206.1	828.1
PBAT/T0.5/AP0.5phr	193.6	792.0
PBAT/T0.5/AP1phr	181.6	579.6

อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.5 และฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ (Aloe vera Extract: AL) และฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิล (Apple Extract: AP) ในปริมาณ 0.25, 0.05 และ 1.00 phr แสดงดังรูปที่ 4.42 และ 4.43 และตารางที่ 4.26 และ 4.27

เมื่อพิจารณาอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติม AL ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ดังรูปที่ 4.42 และ 4.43 และตารางที่ 4.26 พบว่าเมื่อเติม AL ในปริมาณ 0.25 และ 0.50 phr ลงในฟิล์ม PBAT/T0.5 ส่งผลให้ฟิล์มมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติม AL ในปริมาณ 1.00 phr พบว่าฟิล์มมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง โดยอาจเป็นผลมาจากการมีปริมาณผง AP ที่มากขึ้นและเกิดการกระจายตัวได้มากขึ้นในเมทริกซ์ รวมถึงมีอนุภาคของผง TiO_2 กระจายตัวร่วมอยู่ด้วยในเมทริกซ์ ส่งผลให้เกิดการขัดขวางทางเดินของก๊าซ

รวมถึงช่วยเพิ่มความคดเคี้ยวให้กับเส้นทางการแพร่ผ่านของก๊าซ ทำให้ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเกิดการแพร่ผ่านได้ลดลง

อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติม AP ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ1.00 phr แสดงดังรูปที่ 4.42 และ 4.43 และตารางที่ 4.27 พบว่าฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่เติม AP 0.25, 0.50 phr และ 1.00 phr มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kirtiraj K. Gaikwad และคณะ [11] ที่พบว่าการเติมกากแอปเปิลในปริมาณมากขึ้นลงใน PVA ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมอนุภาคของกากแอปเปิลลงใน PVA จะเป็นการเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดเล็กขึ้นในฟิล์ม ทำให้ฟิล์มมีช่องว่างเกิดขึ้น และทำให้ก๊าซเกิดการแพร่ผ่านฟิล์มได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาอัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่เติม AP 0.25 และ 0.50 phr พบว่าฟิล์มมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเติม AP 1.00 phr พบว่าฟิล์มมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการมีปริมาณผง AP ที่มากขึ้นและเกิดการกระจายตัวได้อย่างทั่วถึงมากขึ้นในเมทริกซ์ รวมถึงมีอนุภาคของผง TiO_2 ที่กระจายตัวร่วมอยู่ในเมทริกซ์จึงมีส่วนช่วยในการขัดขวางและเพิ่มความคดเคี้ยวให้กับเส้นทางการแพร่ผ่านของก๊าซได้ และเมื่อพิจารณาอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเทียบกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT และฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดจากพืช พบว่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงกว่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน เนื่องจากขนาดโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.3 อังสตรอม ซึ่งมีขนาดน้อยกว่าก๊าซออกซิเจนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.46 อังสตรอม [49] ดังนั้น ด้วยขนาดของโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เล็กกว่าก๊าซออกซิเจนจึงทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแพร่ผ่านฟิล์มได้ง่ายกว่าก๊าซออกซิเจน

4.2.6 การศึกษาความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ (Radical scavenging activity) โดยใช้วิธี DPPH• radical scavenging assay

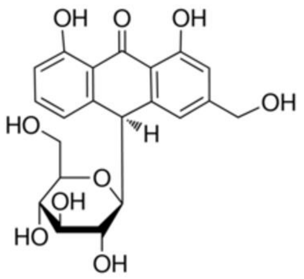
ตารางที่ 4.28 แสดงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของผงสารสกัดว่านหางจระเข้และสารสกัดแอปเปิล

Sample	DPPH (% Inhibition)
Aloe vera Extract	35.04^{a}
Apple Extract	93.48^{b}

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาฟิล์มเพื่อให้เกิดเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถยืดอายุของผลไม้ได้โดยเป็นการป้องกันการเกิดปฏิกิริยา Oxidation ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลไม้เกิดการเน่าเสียและมีอายุที่สั้นลง โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการเติมสารสกัดจากพืชสองชนิด ได้แก่สารสกัดว่านหางจระเข้และสารสกัดแอปเปิลที่มีความสามารถในการต้านการเกิดปฏิกิริยา Oxidation และต้านอนุมูลอิสระได้ โดยทำการทดสอบด้วยวิธี DPPH Assay หรือ DPPH Radical Scavenging ซึ่งสารต้านอนุมูลอิสระหรือ Antioxidant นี้จะสามารถลดการเกิด DPPH Radical ได้ ซึ่งจะเปลี่ยนสารละลาย DPPH หรือ Diphenylpicrylhydrazine จากสีม่วงให้กลายเป็นสีเหลือง

เมื่อพิจารณาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ หรือการยับยั้งการเกิด DPPH Radical (DPPH (% Inhibition)) ของสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลดังตารางที่ 4.28 พบว่าสารสกัดว่านหางจระเข้สามารถต้านอนุมูลอิสระได้ 35.04 % และสารสกัดแอปเปิลสามารถต้านอนุมูลอิสระได้ 93.48 % และเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วแสดงให้เห็นว่าสารสกัดแอปเปิลสามารถต้านอนุมูลอิสระได้มากกว่าว่านหางจระเข้ เนื่องจากในแอปเปิลมีสารสำคัญคือสารประกอบ Phenolic (Phenolic Compounds) ดังรูปที่ 4.45 และมีสารสำคัญอยู่ปริมาณมากในสารสกัด ซึ่งสารประกอบ Phenolic นี้จะสามารถให้ Hydrogen atom แก่อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นได้ แสดงดังรูป 4.46 โดย $R^{\bullet}$ คือ Radical หรืออนุมูลอิสระและ AH คือ Antioxidant หรือสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่ง AH ในส่วนของสารสกัดว่านหางจระเข้คือ Aloin และ AH ในส่วนของสารสกัดแอปเปิลคือ Catechin, Gallic acid, Phloretin และ Quercetin จึงทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่ของสารอนุมูลอิสระสิ้นสุดลง และไม่เกิดเป็นสารอนุมูลอิสระตัวใหม่เนื่องจากโมเลกุลหรือโครงสร้างของสารต้านอนุมูลอิสระจะมีความเสถียรไม่ว่าในโครงสร้างหลังการเกิดปฏิกิริยาจะมีอิเล็กตรอนเดี่ยวหรือคู่ก็ตาม ดังนั้นสารต้านอนุมูลอิสระจะถือเป็นสารที่ช่วยกำจัดหรือยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ที่จะเข้าไปทำลายเซลล์หรือเนื้อเยื่อของผลไม้ได้ [54] แต่เมื่อพิจารณาผงสารสกัดว่านหางจระเข้ พบว่าในสารสกัดว่านหางจระเข้ก็มีสารสำคัญสารประกอบ Phenolic เช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 4.44 แต่จะมีอยู่ในปริมาณที่น้อยกว่าแอปเปิล ดังนั้นจึงส่งผลให้สารสกัดว่านหางจระเข้มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่น้อยกว่าสารสกัดแอปเปิล

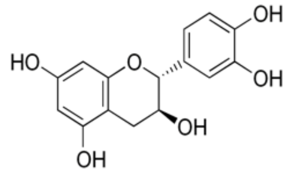
AH =



Aloin

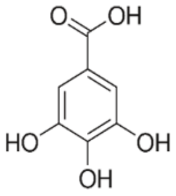
รูปที่ 4.44 แสดงสารประกอบฟีนอลิกที่ทำหน้าที่ในการต้านอนุมูลอิสระในสารสกัดว่านหางจระเข้

AH =



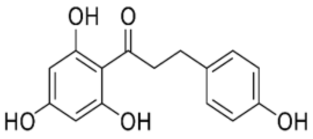
Catechin

AH =



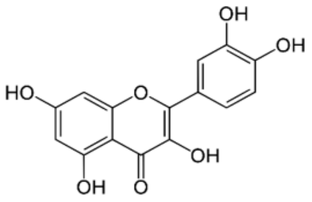
Gallic acid

AH =



Phloretin

AH =



Quercetin

รูปที่ 4.45 แสดงสารประกอบฟีนอลิกที่ทำหน้าที่ในการต้านอนุมูลอิสระในสารสกัดแอปเปิล

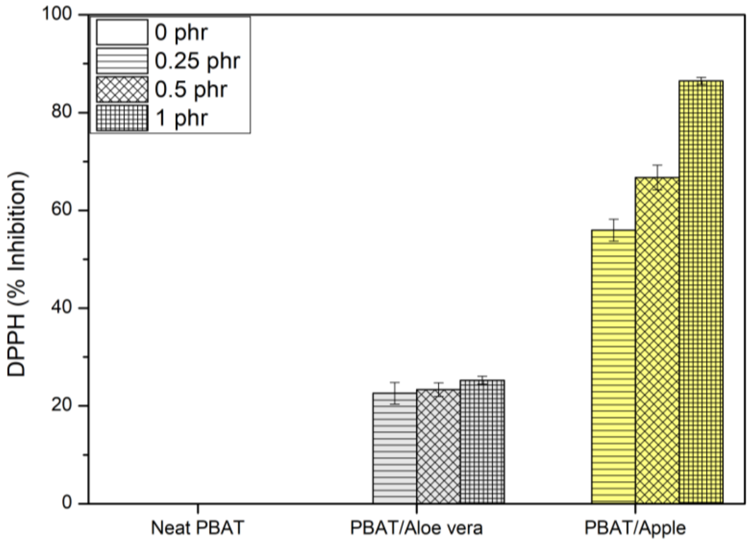
$$R^{\bullet} + AH \longrightarrow RH + A^{\bullet}$$

$$RO^{\bullet} + AH \longrightarrow ROH + A^{\bullet}$$

$$R^{\bullet} + A^{\bullet} \longrightarrow RA$$

$$RO^{\bullet} + A^{\bullet} \longrightarrow ROA$$

รูปที่ 4.46 แสดงปฏิกิริยาในการต้านอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิก



รูปที่ 4.47 แสดงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

ตารางที่ 4.29 แสดงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน

Sample	DPPH (% Inhibition)
Neat PBAT	0.00^{b}
PBAT/AL0.25phr	22.59^{a}
PBAT/AL0.5phr	23.33^{a}
PBAT/AL1phr	25.25^{a}

ตารางที่ 4.30 แสดงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

Sample	DPPH (% Inhibition)
Neat PBAT	0.00^{d}
PBAT/AP0.25phr	55.94^{c}
PBAT/AP0.5phr	66.73^{b}
PBAT/AP1phr	86.48^{a}

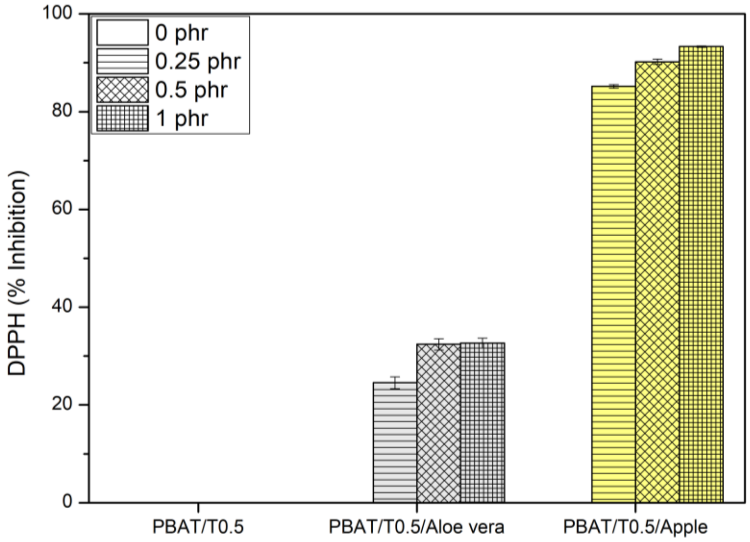
ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr แสดงดังรูปที่ 4.47 และตารางที่ 4.29 และ 4.30

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ดังรูปที่ 4.47 และตารางที่ 4.29 พบว่าฟิล์ม Neat PBAT ไม่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ แต่เมื่อเติม AL ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr พบว่าฟิล์มมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากกว่าฟิล์ม Neat PBAT อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากในสารสกัดว่านหางจระเข้มีสารสำคัญคือ Aloin ซึ่งจัดเป็นสารประกอบ Phenolic ซึ่งสามารถทำหน้าที่ในการให้ Hydrogen atom แก่อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นส่งผลให้ช่วยยับยั้งอนุมูลอิสระได้ ดังรูปที่ 4.46 แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเติม AL ลงไปในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระมากขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ S. Sui Chin และคณะ [12] ที่มีการเติมเจลว่านหางจระเข้ลงใน Fish gelatin เพื่อพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ พบว่าเมื่อเติมว่านหางจะเข้ในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระที่มากขึ้น เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกที่อยู่ในว่านหางจระเข้จะเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ ทำให้อนุมูลอิสระนั้นกลายเป็นกลาง ดังนั้นยิ่งมีปริมาณฟีนอลิกมากขึ้นจะยิ่งเป็นการทำให้เกิดการต้านอนุมูลอิสระได้มากขึ้น ซึ่งเห็นได้จากการทดสอบด้วยวิธี DPPH

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ดังรูปที่ 4.47 และตารางที่ 4.30 พบว่าเมื่อเติม AP ในปริมาณมากขึ้น คือ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr จะมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกับการเติม AL เนื่องจากในสารสกัดแอปเปิลมีสารสำคัญคือ Catechin, Gallic acid, Phloretin และ Quercetin ซึ่งจัดเป็นสารประกอบ Phenolic และมีสารสำคัญนี้อยู่ปริมาณมากในสารสกัด ดังนั้นเมื่อเติม AP ลงไปในปริมาณมากขึ้น จะยิ่งเป็นการเพิ่มปริมาณของสารประกอบ Phenolic ทำให้เกิดการให้ Hydrogen atom แก่อนุมูลอิสระได้มากขึ้น จึงทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้มากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kirtiraj K. Gaikwad และคณะ [11] ที่มีการเติมกากแอปเปิลลงใน PVA เพื่อพัฒนาเป็น Active packaging ที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ พบว่าเมื่อเติมกากแอปเปิลในปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มสามารถต้านอนุมูลอิสระได้มากขึ้น เนื่องจากในแอปเปิลมี

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกจำนวนมากและมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่สูง ดังนั้น ประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์มจึงมีค่าสูงขึ้นเมื่อเติมกากแอปเปิลในปริมาณมากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลของการเติม AL และ AP ลงใน PBAT พบว่าการเติม AP ส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่า AL เนื่องจากใน AP มีปริมาณสารสำคัญที่มากกว่าใน AL ดังตารางที่ 3.1 ดังนั้นเมื่อเติม AP ในปริมาณที่เท่ากันคือ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr จึงทำให้ AP มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้มากกว่า



รูปที่ 4.48 แสดงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

ตารางที่ 4.31 แสดงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน

Sample	DPPH (% Inhibition)
PBAT/T0.5	0.00^{c}
PBAT/T0.5/AL0.25phr	24.55^{b}
PBAT/T0.5/AL0.5phr	32.41^{a}
PBAT/T0.5/AL1phr	32.64^{a}

ตารางที่ 4.32 แสดงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

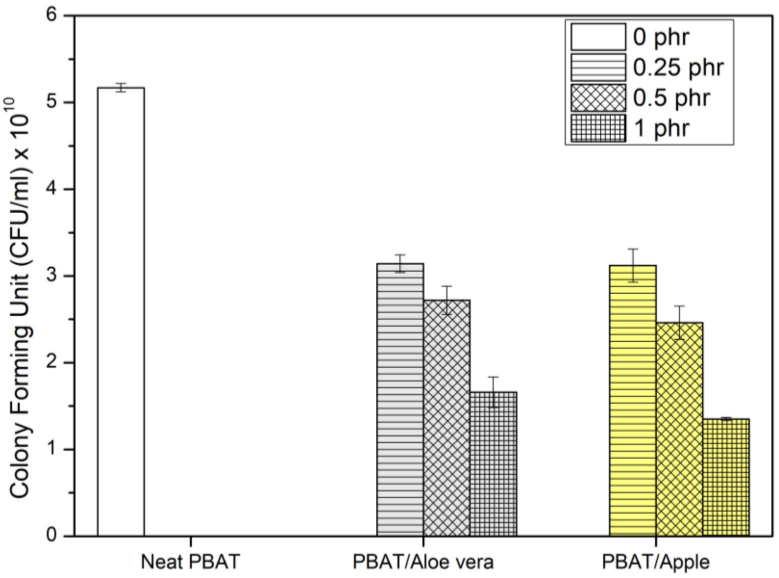
Sample	DPPH (% Inhibition)
PBAT/T0.5	0.00^{d}
PBAT/T0.5/AP0.25phr	85.18^{c}
PBAT/T0.5/AP0.5phr	90.21^{b}
PBAT/T0.5/AP1phr	93.31^{a}

ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม PBAT/T0.5 และฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ และฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณ 0.25, 0.5 และ 1 phr แสดงดังรูปที่ 4.48 และตารางที่ 4.31 และ 4.32

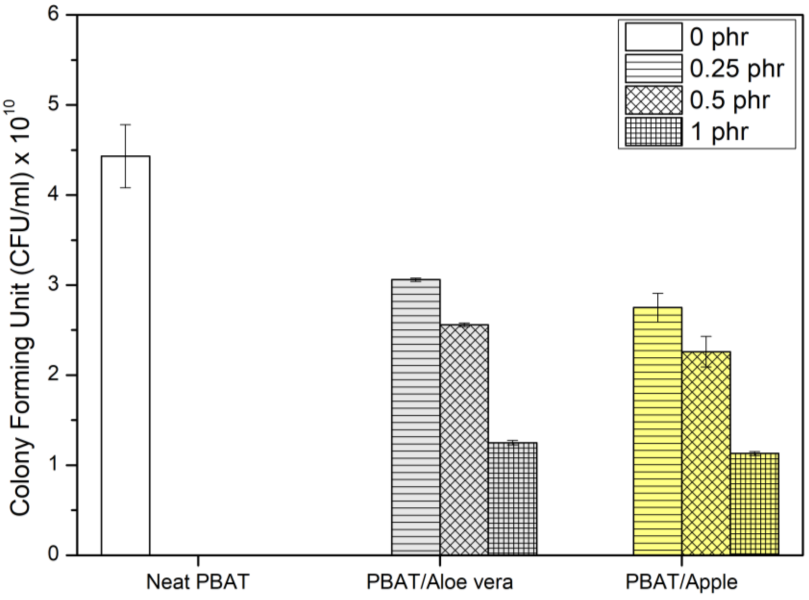
เมื่อพิจารณาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของฟิล์ม PBAT/T0.5 และฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้และสารสกัดแอปเปิลในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr พบว่าผลการทดลองเป็นไปตามแนวโน้มเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อเติม AL และ AP ในปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากสารประกอบฟีนอลิกที่อยู่ในสารสกัดของพืชทั้งสองชนิด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างฟิล์ม PBAT ที่เติมสารสกัดจากพืช และฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่เติมสารสกัดจากพืช พบว่าฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดจากพืชมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่าฟิล์ม PBAT ซึ่งให้ผลในทำนองเดียวกันทั้ง PBAT/T0.5 ที่เติม AL และ PBAT/T0.5 ที่เติม AP ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่มี TiO_2 กระจายตัวร่วมกับสารสกัดจากพืชในเมทริกซ์ของ PBAT โดยการมี TiO_2 อาจทำให้สารสกัดจากพืชเกิดการกระจายตัวได้มากขึ้น และกระจายตัวได้สม่ำเสมอขึ้นใน PBAT และลดการเกิดการกองรวมกันอยู่บริเวณขอบฟิล์ม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.36 และ 4.37 จึงอาจส่งผลให้สารสกัดมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระที่มากขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลของการเติม AL และ AP ลงใน PBAT/T0.5 พบว่าการเติม AP ลงในฟิล์ม PBAT/T0.5 ส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่าฟิล์มที่เติม AL ซึ่งเป็นเหตุผลในทำนองเดียวกับการเติม AL และ AP ลงในฟิล์ม PBAT

4.2.7 ศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (Antimicrobial activity)



รูปที่ 4.49 แสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.Aureus* ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน



รูปที่ 4.50 แสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E.Coli* ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

ตารางที่ 4.33 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.Aureus* และ *E.Coli* ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน

Sample	*S.Aureus (Colony Forming Unit (CFU/ml) x 10^{10})*	% Reduction	*E.Coli (Colony Forming Unit (CFU/ml) x 10^{10})*	% Reduction
Neat PBAT	5.17±0.05[a]	0.00	4.43±0.35[a]	0.00
PBAT/AL0.25phr	3.14±0.10[b]	39.40	3.06±0.02[b]	30.80
PBAT/AL0.5phr	2.72±0.16[c]	47.40	2.56±0.02[c]	42.10
PBAT/AL1phr	1.66±0.18[d]	67.80	1.25±0.02[d]	71.70

หมายเหตุ % Reduction คำนวณโดยใช้ฟิล์มสูตร Neat PBAT เป็นตัว Control

ตารางที่ 4.34 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.Aureus* และ *E.Coli* ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่ผสมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

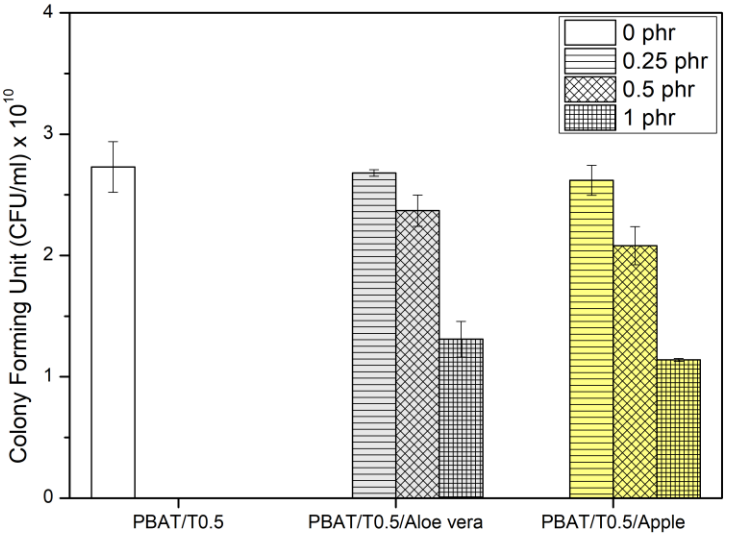
Sample	*S.Aureus (Colony Forming Unit (CFU/ml) x 10^{10})*	% Reduction	*E.Coli (Colony Forming Unit (CFU/ml) x 10^{10})*	% Reduction
Neat PBAT	5.17±0.05[a]	0.00	4.43±0.35[a]	0.00
PBAT/AP0.25phr	3.12±0.19[b]	39.7	2.75±0.16[b]	38.0
PBAT/AP0.5phr	2.46±0.19[c]	52.3	2.26±0.17[b]	49.0
PBAT/AP1phr	1.35±0.02[d]	74.0	1.13±0.02[c]	74.5

หมายเหตุ % Reduction คำนวณโดยใช้ฟิล์มสูตร Neat PBAT เป็นตัว Control

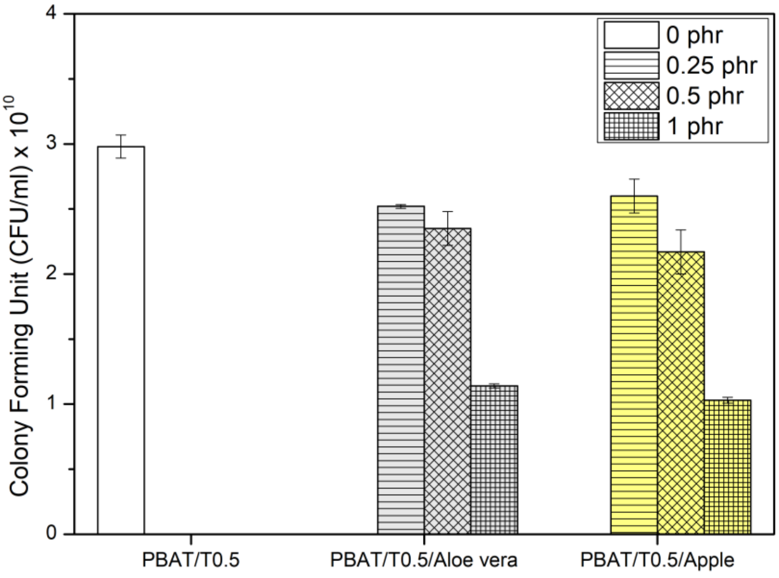
ความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *Staphylococus Aureus* (*S.Aureus)* และ *Escherichia Coli (E.Coli)* ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr แสดงผลดังรูปที่ 4.49 และ 4.50 และตารางที่ 4.33 และ 4.34 โดยก่อนการทดสอบจะนำฟิล์มไปทำการฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *S.Aureus* และ *E.Coli* ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr พบว่าเมื่อเติม AL ในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งชนิด *S.Aureus* และ *E.Coli* ได้มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ AL มีสารสำคัญคือ Aloin ที่จัดเป็นสารประเภท Phenolic compounds โดยมีคุณสมบัติที่ช่วยในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้ เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกสามารถเข้าไปทำลายผนังเซลล์และองค์ประกอบภายในเซลล์ ทำให้เซลล์ของแบคทีเรียเกิดการเสียหายและตายได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ เบญจมาศ หนูแป้น และคณะ [55] ที่มีการศึกษาประสิทธิภาพของสารสกัดจากใบราน้ำ *(Limnophila rugosa)* ต่อการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียก่อโรค 4 ชนิด ได้แก่ *Staphylococcus aureus, Escherichia coli, Bacillus subtilis* และ *Vibrio cholerae* พบว่า สารสกัดจากใบราน้ำประกอบด้วยสารประกอบฟีนอลิกจำนวนมาก จึงมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ เนื่องจากสารประกอบฟีนอลิกสามารถทำลายผนังเซลล์ของแบคทีเรีย ทำลายเยื่อหุ้มไซโตพลาสซึม (Cytoplasmic membrane) และยังทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของโปรตีน (Membrane protein) จึงทำให้เซลล์ของแบคทีเรียเกิดการเสียหายและตายในที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเติม AL ในปริมาณมากขึ้นจึงส่งผลให้มีปริมาณ Phenolic compounds ที่มากขึ้นด้วย จึงเป็นเหตุให้ฟิล์มสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้มากขึ้น

เมื่อพิจารณาความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *S.Aureus* และ *E.Coli* ของฟิล์ม Neat PBAT และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr พบว่า เมื่อเติม AP ในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทั้งชนิด *S.Aureus* และ *E.Coli* ได้มากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ AP มีสารสำคัญคือ Catechin, Gallic acid, Phloretin และ Quercetin ที่จัดเป็นสารประเภท Phenolic compounds และมีอยู่ในสารสกัดแอปเปิลเป็นจำนวนมาก ซึ่ง Phenolic compounds มีคุณสมบัติที่ช่วยในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้ ดังนั้นเมื่อเติม AP ในปริมาณมากขึ้นจึงทำให้มีปริมาณ Phenolic compounds ที่มากขึ้นด้วยส่งผลให้ฟิล์มสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้มากขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 4.51 แสดงความสามารถในการแสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.Aureus* ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน



รูปที่ 4.52 แสดงความสามารถในการแสดงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *E.Coli* ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้และแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

ตารางที่ 4.35 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.Aureus* และ *E.Coli* ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณต่างกัน

Sample	*S.Aureus (Colony Forming Unit (CFU/ml) x 10^{10})*	% Reduction	*E.Coli (Colony Forming Unit (CFU/ml) x 10^{10})*	% Reduction
PBAT/T0.5	2.73 ± 0.21^{a}	0.00	2.98 ± 0.09^{a}	0.00
PBAT/T0.5/AL0.25phr	$2.68 \pm 0.03^{a,b}$	1.79	2.52 ± 0.02^{b}	15.40
PBAT/T0.5/AL0.5phr	2.37 ± 0.13^{b}	13.10	2.35 ± 0.13^{b}	21.10
PBAT/T0.5/AL1phr	1.31 ± 0.15^{c}	52.00	1.14 ± 0.02^{c}	61.60

หมายเหตุ % Reduction คำนวณโดยใช้ฟิล์มสูตร PBAT/T0.5 เป็นตัว Control

ตารางที่ 4.36 แสดงการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย S.Aureus และ E.Coli ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 และสารสกัดแอปเปิลในปริมาณต่างกัน

Sample	*S.Aureus (Colony Forming Unit (CFU/ml) x 10^{10})*	% Reduction	*E.Coli (Colony Forming Unit (CFU/ml) x 10^{10})*	% Reduction
PBAT/T0.5	2.73 ± 0.21^{a}	0.00	2.98 ± 0.09^{a}	0.00
PBAT/T0.5/AP0.25phr	2.62 ± 0.12^{a}	4.01	2.60 ± 0.13^{b}	12.70
PBAT/T0.5/AP0.5phr	2.08 ± 0.16^{b}	23.70	2.17 ± 0.17^{c}	26.90
PBAT/T0.5/AP1phr	1.14 ± 0.01^{c}	58.10	1.03 ± 0.02^{d}	65.30

หมายเหตุ % Reduction คำนวณโดยใช้ฟิล์มสูตร PBAT/T0.5 เป็นตัว Control

ความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *S.Aureus* และ *E.Coli* ของฟิล์ม PBAT/T0.5 และฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ และฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิลในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr แสดงผลดังรูปที่ 4.51 และ 4.52 และตารางที่ 4.35 และ 4.36 โดยก่อนการทดสอบจะนำฟิล์มไปทำการฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

เมื่อทำการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ (AL) และสารสกัดแอปเปิล (AP) ลงในฟิล์ม PBAT/T0.5 พบว่าได้ผลในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อเติม AL และ AP ในปริมาณมากขึ้น คือ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr จะทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรียได้มากขึ้นทั้งชนิด *S.Aureus* และ *E.Coli* ซึ่งเป็นผลจากการที่สารสกัดจากพืชทั้งสองชนิดมีสารประกอบฟีนอลิกเป็นองค์ประกอบ จึงมีความสามารถในการทำลายเซลล์ของแบคทีเรีย ทำให้เซลล์เกิดความเสียหายและตายได้ในที่สุด

นอกจากการเติมสารสกัด AL และ AP ที่มีสารสำคัญเป็น Phenolic compounds ที่ช่วยในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแล้ว ในฟิล์มยังมีสารสำคัญที่ช่วยในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้เช่นกันคือ TiO_2 ดังนั้นจะพบว่าเมื่อทำการเติมสารสกัดจากพืชที่มีสารสำคัญเป็นสารประกอบฟีนอลิกร่วมกับ TiO_2 จะยิ่งส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียได้มากกว่าการเติมสารสกัดจากพืชเพียงอย่างเดียว

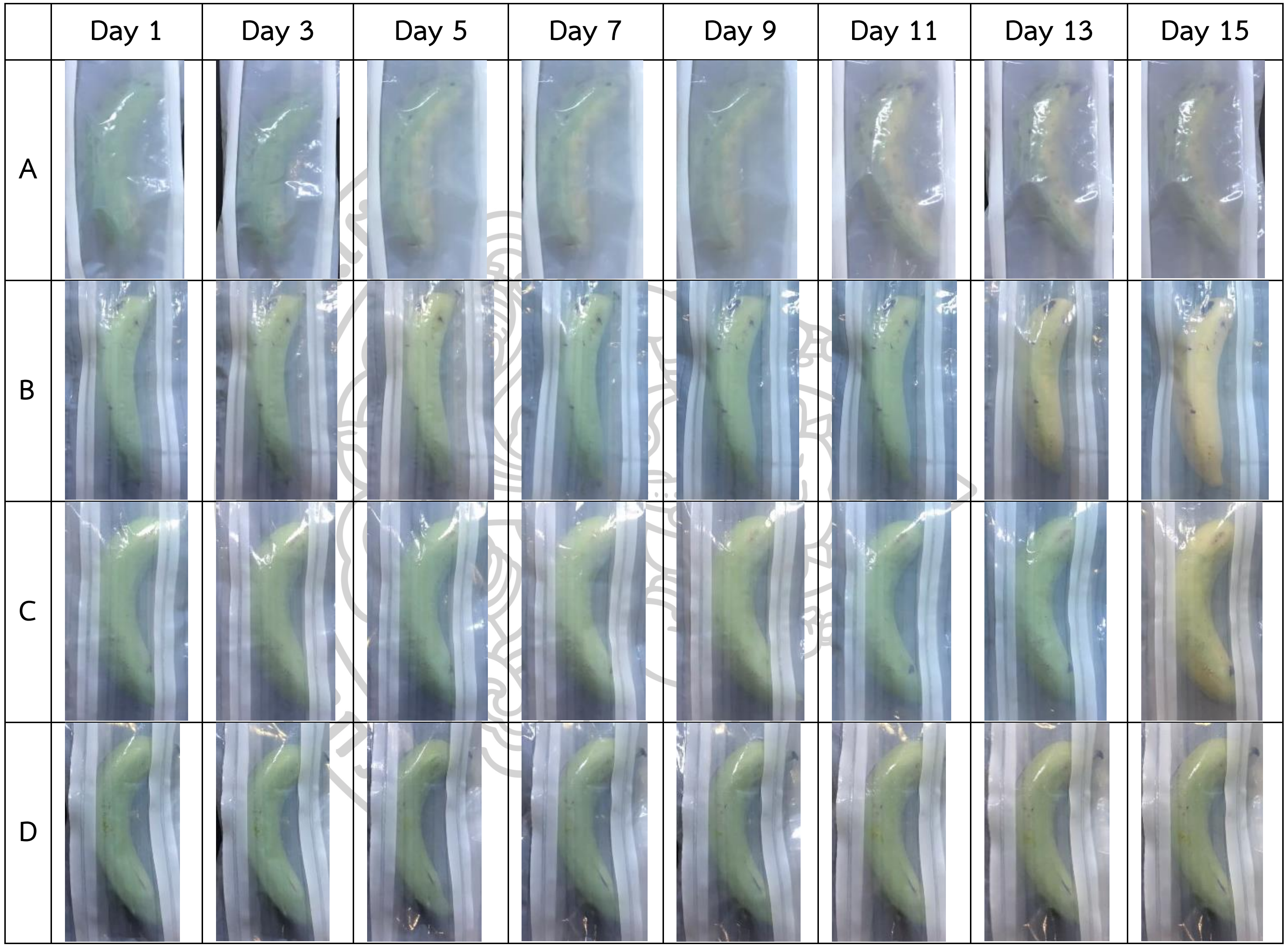
4.2.8 ศึกษาการยืดอายุ (Storage-life) ของผลไม้

การทดสอบการยืดอายุผลไม้ทำได้โดยการเตรียมฟิล์มมาทำให้เป็นบรรจุภัณฑ์ จากนั้นนำฟิล์มไปฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วจึงนำกล้วยหอมบรรจุลงในบรรจุภัณฑ์แล้วซีลปิด จากนั้นนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง และสังเกตลักษณะที่เปลี่ยนแปลงไปของกล้วย

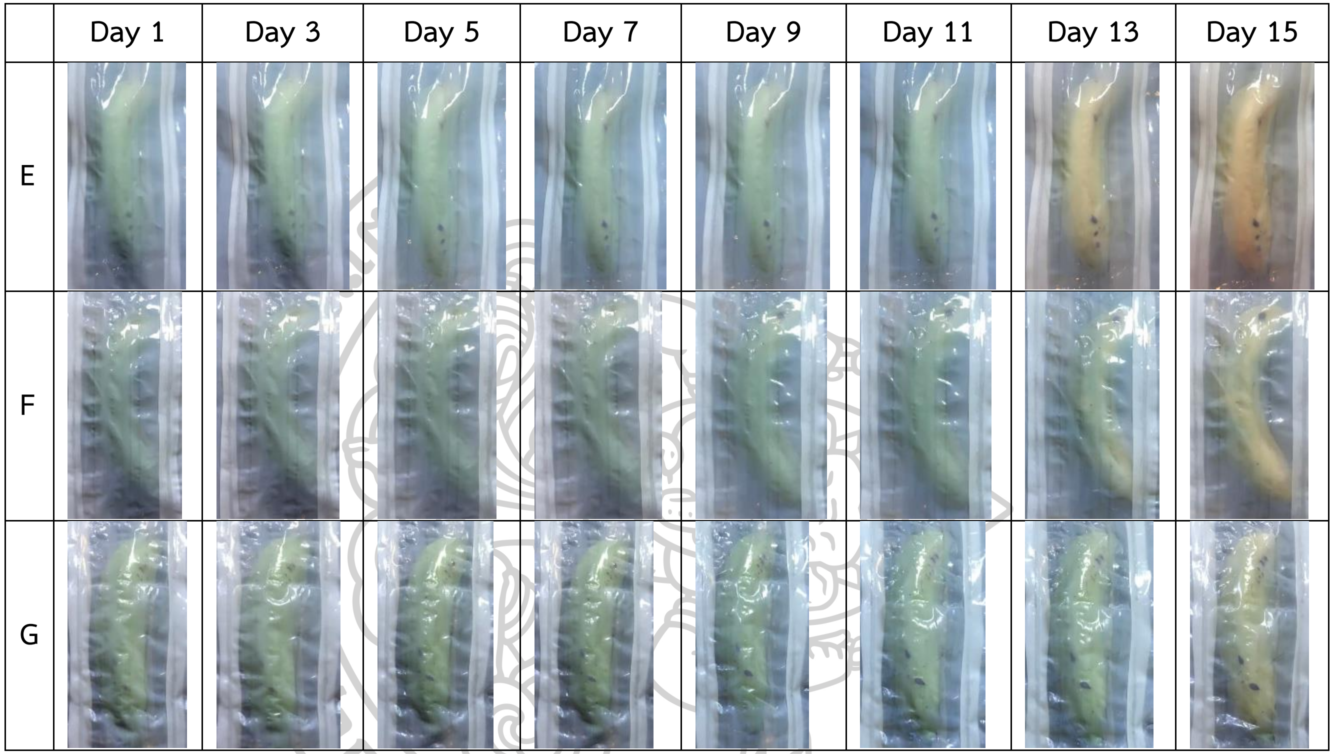
จากผลการทดสอบการยืดอายุผลไม้ดังรูปที่ 4.53 เป็นการเติม AL ลงใน PBAT ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr พบว่ากล้วยที่บรรจุอยู่ในถุง Neat PBAT จะมีความเหลืองขึ้นและนิ่มขึ้นในวันที่ 5 จากนั้นจะเริ่มมีสีเหลืองมากขึ้น เส้นเหลี่ยมของกล้วยหายไปและมีความนิ่ม รวมถึงมีจุดสีดำปรากฏขึ้นบนผิวกล้วย เนื่องจากกล้วยจะผลิตก๊าซเอทิลีนที่เป็นฮอร์โมนที่ช่วยทำให้ผลไม้เกิดการสุก รวมถึงสีเหลืองที่เกิดมาจาก Phenol ที่อยู่ในเซลล์เนื้อเยื่อของเปลือกกล้วย จึงทำให้เมื่อเวลาผ่านไปกล้วยจึงเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลือง แต่เมื่อพิจารณากล้วยที่อยู่ในถุงที่เติม AL 0.25 phr พบว่ากล้วยเริ่มมีสีเหลืองในวันที่ 13 มีความนิ่มเล็กน้อย รวมถึงเส้นเหลี่ยมของกล้วยก็เริ่มลดลงเช่นกัน เมื่อเติม AL ในปริมาณ 0.50 phr พบว่ากล้วยมีสีเหลืองในวันที่ 15 แต่ยังมีสีเขียวเหลืออยู่ และกล้วยยังคงมีความแข็งอยู่ และเมื่อพิจารณาการเติม AL ในปริมาณ 1 phr พบว่าผ่านไป 15 วัน กล้วยยังคงมีความเขียว แข็ง และเส้นเหลี่ยมของกล้วยยังไม่หายไป ซึ่งเป็นผลในทำนองเดียวกับการเติม AP ลงใน PBAT ดังรูปที่ 4.54 พบว่า เมื่อเติม AP ในปริมาณ 0.25 phr จะพบว่ากล้วยมีสีเหลืองเข้มประมาณวันที่ 13 และเหลืองทั้งลูกในวันที่ 15 นอกจากนี้กล้วยยังมีความนิ่มและไม่มีเส้นเหลี่ยมของกล้วยเหลืออยู่ เมื่อเติม AP ในปริมาณ 0.50 phr พบว่ากล้วยเริ่มมีสีเหลืองบริเวณขั้ว แต่ตรงกลาง

ของกล้วยยังเป็นสีเขียว กล้วยยังมีความแข็งและมีเส้นเหลี่ยมของกล้วยเหลืออยู่ และเมื่อเติม AP ในปริมาณ 1.00 phr พบว่ากล้วยเริ่มมีสีเหลืองในวันที่ 15 แต่กล้วยยังมีความแข็งอยู่ และเส้นเหลี่ยมกล้วยยังคงอยู่เหมือนเดิม โดยจากผลการทดสอบการยืดอายุผลไม้โดยการเติม AL ลงใน PBAT และการเติม AP ลงใน PBAT แสดงให้เห็นว่าสามารถยืดอายุของกล้วยได้จริง ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก Polyphenols ที่อยู่ในสารสำคัญของทั้ง AL และ AP ที่มีส่วนช่วยในการต้านอนุมูลอิสระที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสียของผลไม้ได้ ส่งผลให้กล้วยสามารถมีอายุได้นานมากขึ้นก่อนเกิดการสุกหรือเน่าเสีย นอกจากนี้อาจเป็นผลมาจากอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์อันเนื่องมาจากการหายใจของผลไม้ด้วย กล่าวคือเมื่อฟิล์มมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์จากภายนอกเข้ามาสู่ภายในถุงลดลง จะส่งผลให้ผลไม้เกิดการหายใจได้ลดลง เมื่อหายใจได้ลดลงจึงทำให้เกิดการสร้างก๊าซเอทิลีนซึ่งเป็นสาเหตุของการสุกของผลไม้ได้ลดลงด้วย

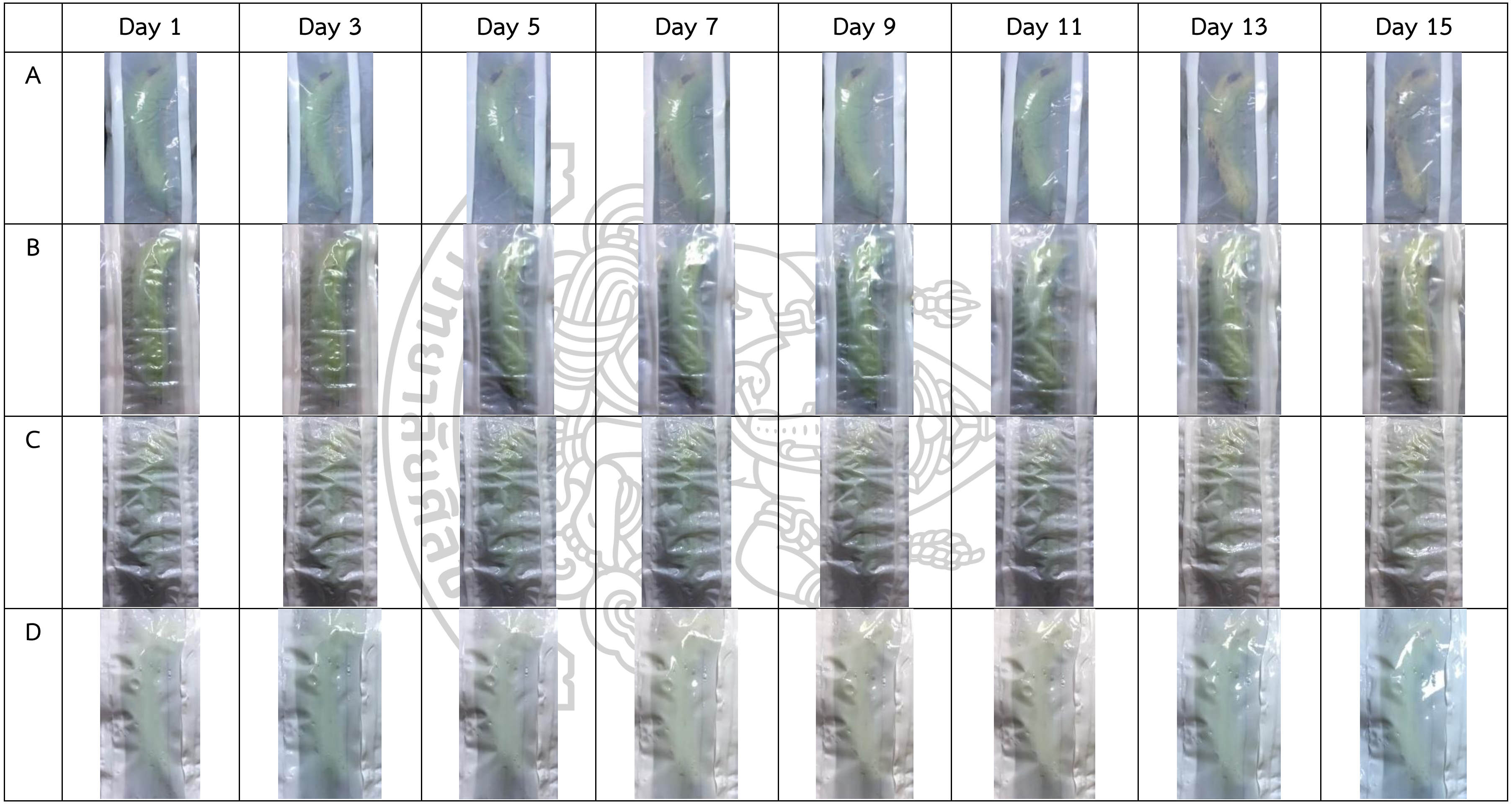
จากผลการทดสอบการยืดอายุผลไม้ดังรูปที่ 4.55 และ 4.56 พบว่าฟิล์มที่มีการเติม TiO_2 ร่วมกับสารสกัดจากพืชจะมีลักษณะที่ย่นและมีผิวที่ไม่เรียบ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลงในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม จึงอาจส่งผลให้บางช่วงของฟิล์มมีความหนืดที่ไม่เท่ากัน จึงส่งผลให้ฟิล์มเกิดการย่นได้ เมื่อพิจารณาในส่วนของการยืดอายุกล้วยหอมทองพบว่าในวันที่ 13 กล้วยที่บรรจุในถุง PBAT/T0.5 จะเริ่มมีสีเหลืองและมีความนิ่มมากขึ้น รวมถึงมีจุดสีดำปรากฏขึ้นบนผิวกล้วย แต่เมื่อทำการเติม AL และ AP ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 15 วัน กล้วยที่บรรจุอยู่ในถุงยังมีสีเขียว มีความแข็ง และยังมีเส้นเหลี่ยมของกล้วยโดยเฉพาะเมื่อเติม AL และ AP ในปริมาณ 1.00 phr พบว่าจะสามารถยืดอายุกล้วยได้ถึงประมาณ 18 – 19 วัน โดยสาเหตุที่ฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดจากพืช สามารถยืดอายุของผลไม้ได้นานขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการทำงานร่วมกันของ TiO_2 ที่มีความสามารถในการยับยั้งการเกิดก๊าซเอทิลีนซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการสุกของกล้วย รวมถึงมีการเติมสารสกัดจากพืชที่มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ จึงทำให้สามารถยืดอายุกล้วยได้ นอกจากนี้อาจเป็นผลมาจากอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีค่าลดลง จึงทำให้ก๊าซจากภายนอกเกิดการซึมผ่านฟิล์มเข้ามายังผลไม้ได้ลดลง ส่งผลให้ผลไม้เกิดการหายใจได้ลดลงและทำให้ผลิตก๊าซเอทิลีนอันเป็นสาเหตุของการสุกของผลไม้ได้ลดลง



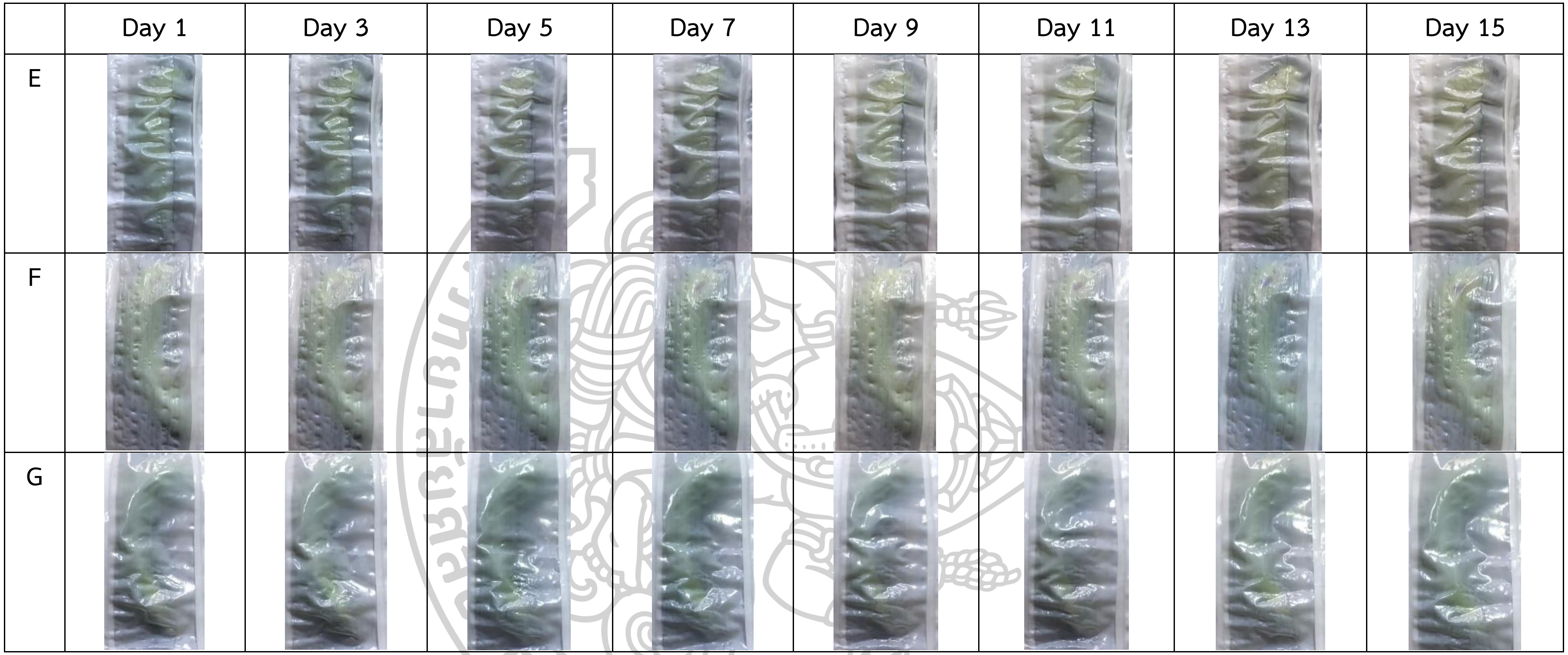
รูปที่ 4.53 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน A) Neat PBAT B) PBAT/AL0.25 C) PBAT/AL0.5 และ D) PBAT/AL1



รูปที่ 4.54 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน E) PBAT/AP0.25 F) PBAT/AP0.5 และ G) PBAT/AP1



รูปที่ 4.55 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน A) PBAT/T0.5 B) PBAT/T0.5/AL0.25 C) PBAT/T0.5/AL0.5 และ D) PBAT/T0.5/AL1



รูปที่ 4.56 แสดงภาพกล้วยที่บรรจุในถุงฟิล์มสูตรต่างๆเมื่อมีการฉายแสง UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพเป็นเวลา 15 วัน

E) PBAT/T0.5/AP0.25 F) PBAT/T0.5/AP0.5 และ G) PBAT/T0.5/AP1

จากผลการทดลองข้างต้นที่กล่าวมาทั้งหมด สามารถจำแนกประเภทการใช้งานของฟิล์มตามสมบัติสำคัญที่ต้องการได้ดังนี้

กรณีที่ต้องการฟิล์มที่มีสมบัติในด้านการต้านเชื้อแบคทีเรีย ยับยั้งก๊าซเอทิลีนรวมถึงยืดอายุผลไม้ได้นานที่สุดโดยไม่คำนึงถึงความทึบแสงและความขุ่นของฟิล์ม ควรใช้เป็นฟิล์มสูตร PBAT/T3 ที่มีการฉาย UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เนื่องจากการเติม TiO_2 ในปริมาณ 3 % wt ร่วมกับการฉาย UV ที่เวลานาน จะยิ่งเป็นการเพิ่มโอกาสให้ TiO_2 เกิดการถูกกระตุ้นด้วยแสงได้มากขึ้นและส่งผลให้สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียได้มากขึ้น เนื่องจากเมื่อ TiO_2 ได้รับการกระตุ้นด้วยแสง UV จะเกิดเป็น Strong reactive oxygen species (ROS) โดย ROS นี้จะเข้าไป Oxidize polyunsaturated phospholipids ของ Microbial cell membranes ในแบคทีเรีย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเซลล์และทำให้เซลล์ตายในที่สุด รวมถึงจะเข้าไป Oxidize ก๊าซเอทิลีนที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการสุกของกล้วย ทำให้ก๊าซเอทิลีนกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม Neat PBAT พบว่าฟิล์มสูตร PBAT/T3 มีค่า Young's modulus มากกว่าฟิล์ม Neat PBAT ซึ่งอาจเป็นผลดีในด้านการนำไปใช้งานเนื่องจากสามารถต้านทานการเสียรูปของบรรจุภัณฑ์ได้มากกว่าเมื่อบรรจุสินค้าไว้ด้านใน และนอกจากนี้ ฟิล์มสูตรนี้ยังมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำ ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่าฟิล์ม Neat PBAT จึงช่วยในการลดการแพร่ผ่านของก๊าซจากด้านนอกเข้าสู่ด้านในบรรจุภัณฑ์ ทำให้ผลไม้เกิดการหายใจได้ลดลงและผลิตก๊าซเอทิลีนได้ลดลงด้วย แต่อย่างที่กล่าวไปตอนต้น PBAT/T3 จะมีข้อเสียคือ ฟิล์มที่ได้จะมีความทึบแสงมากและมีความขุ่น จึงอาจทำให้มองไม่เห็นผลไม้หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการจำหน่ายหากต้องการนำไปทำเป็นบรรจุภัณฑ์ในด้านการค้าที่ต้องการโชว์ให้เห็นสินค้าด้านใน แต่อย่างไรก็ตามหากใช้ฟิล์มสูตรนี้ในการทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุสินค้าเพื่อการขนส่งโดยที่ไม่ต้องเห็นสินค้าด้านในบรรจุภัณฑ์ และยังคงสมบัติด้านความแข็งแรงและความสามารถในการยืดอายุของผลไม้ ค่าความทึบแสงของฟิล์มจึงอาจเป็นสมบัติที่สามารถยอมรับได้ในการใช้ทำเป็นบรรจุภัณฑ์ ในกรณีที่ต้องการคุณสมบัติในด้านการต้านเชื้อแบคทีเรีย ยับยั้งก๊าซเอทิลีนรวมถึงยืดอายุผลไม้ได้โดยที่ฟิล์มมีความขุ่นน้อย และยังสามารถมองเห็นผลไม้หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการจำหน่ายหากต้องการนำไปทำเป็นบรรจุภัณฑ์ในด้านการค้า ควรใช้เป็นฟิล์มสูตร PBAT/T0.5 ที่มีการฉาย UV เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ซึ่งนอกจากสมบัติที่กล่าวมาแล้ว ฟิล์มสูตรนี้ยังมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าฟิล์ม Neat PBAT และมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่าฟิล์ม Neat PBAT อีกด้วย จึงมีความเหมาะสมมากกว่าหากต้องการนำไปใช้งานด้านการค้าที่ต้องการให้เห็นสินค้าภายในบรรจุภัณฑ์

กรณีที่ต้องการฟิล์มที่มีสมบัติในด้านการต้านอนุมูลอิสระ ต้านเชื้อแบคทีเรียรวมถึงยืดอายุผลไม้ ควรใช้ฟิล์มสูตร PBAT/AP1 phr เนื่องจากการเติม AP 1.00 phr จะมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับการเติม AP ในปริมาณ 0.25 และ 0.5 phr และยังสามารถต้านอนุมูลอิสระได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับการเติม AL ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr เนื่องจากมีสารประกอบฟีนอลิกอยู่ปริมาณมาก จึงทำให้มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระรวมถึงต้านเชื้อแบคทีเรียได้ นอกจากนี้ฟิล์มสูตร PBAT/AP1 phr ยังมีความทึบแสงที่ต่ำ มีความโปร่งแสงและค่อนข้างใส ทำให้เมื่อนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ จะส่งผลให้เราสามารถมองเห็นผลไม้หรือผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในบรรจุภัณฑ์ได้ นอกจากนี้ฟิล์มสูตรนี้ยังมีค่าสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าฟิล์ม Neat PBAT รวมถึงมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่น้อยกว่าฟิล์ม Neat PBAT อีกด้วย จึงทำให้ฟิล์มสูตรนี้มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานในกรณีที่ต้องการสมบัติดังที่กล่าวไปข้างต้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 การศึกษาฟิล์มจากวัสดุเสริมองค์ประกอบระหว่าง PBAT และ Titanium dioxide ($PBAT/TiO_2$ biocomposite)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้สำหรับยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้ โดยการนำพลาสติกชีวภาพชนิด PBAT มาผสมกับ TiO_2 โดยขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยวิธี Cast film extrusion เมื่อพิจารณาปริมาณการเติม TiO_2 ที่ 0.25, 0.50, 1.00 และ 3.00 % wt ต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สมบัติทางสัณฐานวิทยา สมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำ ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ สมบัติทางด้านการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และสมบัติด้านการยืดอายุของผลไม้ โดยที่ไม่คำนึงถึงด้านความขุ่นของฟิล์ม พบว่าฟิล์มสูตร $PBAT/TiO_2$ 3.00 % wt มีผลดีที่สุดในสมบัติทุกด้านที่กล่าวมา แต่ในทางกลับกัน การเติม TiO_2 ในปริมาณที่มากที่สุดนั้น จะส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความทึบแสงและมีความขุ่นมาก โดยถ้านำไปประยุกต์ใช้ในการทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับการขนส่งโดยที่ไม่ต้องเห็นสินค้า ค่าความทึบแสงหรือความขุ่นของฟิล์มจึงอาจเป็นสิ่งที่ยอมรับได้ในการนำไปทำเป็นบรรจุภัณฑ์ แต่อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ฟิล์มสูตร $PBAT/TiO_2$ 0.50 % wt เนื่องจากฟิล์มสูตรนี้มีสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นที่ค่อนข้างดี และที่สำคัญคือมีความทึบแสงต่ำและยังคงมีความใสทำให้เมื่อนำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับการยืดอายุผลไม้แล้ว ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีสมบัติที่ดีในด้านต่างๆ และยังสามารถมองเห็นผลไม้หรือสินค้าที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ได้อีกด้วย

5.2 การศึกษาฟิล์มจากวัสดุเสริมองค์ประกอบระหว่าง PBAT, Titanium dioxide และสารสกัดจากพืช (PBAT biocomposite)

ในงานวิจัยส่วนนี้ได้ทำการศึกษาผลของการเติมสารสกัดจากว่านหางจระเข้และแอปเปิลลงใน PBAT โดยแบ่งเป็นการศึกษาการเติมว่านหางจระเข้ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ลงใน PBAT และศึกษาการเติมแอปเปิลในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr ลงใน PBAT ซึ่งขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยวิธี Cast film extrusion โดยทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางสัณฐานวิทยา สมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำ ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ สมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ สมบัติทางด้านการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และสมบัติด้านการยืดอายุของผลไม้พบว่า หากต้องการฟิล์มที่มีสมบัติในด้านการต้านอนุมูลอิสระ ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ยืดอายุผลไม้ให้สุกช้าลงหรือชะลอการสุก รวมถึงมีสมบัติเชิงกลและสมบัติการกั้นผ่านที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์ม Neat PBAT ควรใช้เป็นฟิล์มสูตร PBAT/AP 1 phr เนื่องจากในแอปเปิลจะมีสารสำคัญคือ Polyphenols ได้แก่

Catechin, Gallic acid, Phloretin และ Quercetin ในปริมาณมากกว่า Aloin ซึ่งอยู่ใน AL จึงส่งผลให้มีส่วนช่วยในการต้านอนุมูลอิสระ ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และสามารถยืดอายุของผลไม้ได้มากกว่า นอกจากนี้ ฟิล์มสูตรนี้ยังมีความเรียบ มีความทึบแสงต่ำและค่อนข้างใส ดังนั้นหากนำไปทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับการยืดอายุผลไม้ จะส่งผลให้เราสามารถมองเห็นผลไม้หรือสินค้าที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ได้อีกด้วย

ในส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาเพื่อพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้สำหรับยืดอายุการเก็บรักษาผลไม้ โดยมีคุณสมบัติคือสามารถดักจับก๊าซเอทิลีน ยับยั้งแบคทีเรีย และสามารถต้านปฏิกิริยาออกซิเดชันและต้านอนุมูลอิสระได้ โดยเป็นการนำฟิล์มสูตร PBAT/TiO_2 0.50 % wt ซึ่งเป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุดจากตอนแรกมาทำการผสมกับสารสกัดว่านหางจระเข้ในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr และผสมกับสารสกัดแอปเปิลในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr และขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยวิธี Cast film extrusion โดยทำการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางสัณฐานวิทยา สมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำ ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ สมบัติในการต้านอนุมูลอิสระ สมบัติทางด้านการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และสมบัติด้านการยืดอายุของผลไม้ พบว่า หากต้องการฟิล์มที่มีสมบัติในด้านการต้านอนุมูลอิสระ ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ช่วยชะลอการสุกของผลไม้ รวมถึงมีสมบัติเชิงกลและสมบัติการกั้นผ่านที่ดีกว่าฟิล์ม Neat PBAT ควรใช้เป็นฟิล์มสูตร PBAT/T0.5/AP 1 phr เนื่องจากฟิล์มสูตรนี้เป็นการผสมระหว่าง TiO_2 ที่มีสมบัติในด้านการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย การชะลอการสุกของผลไม้เนื่องจากยับยั้งเอทิลีนที่ถูกปล่อยออกมาจากกระบวนการสุกของผลไม้ได้ และยังมีการเติมสารสกัดจากแอปเปิลร่วมด้วย ซึ่งมีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระดังที่กล่าวไปข้างต้น และสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ นอกจากนี้ฟิล์มสูตรนี้ยังคงมีความทึบแสงที่ค่อนข้างต่ำ หากนำไปทำเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับการยืดอายุผลไม้ จะยังสามารถมองเห็นผลไม้หรือสินค้าที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ได้ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าฟิล์มสูตรนี้จะมีผิวที่ย่นและไม่เรียบ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากกระบวนการขึ้นรูปฟิล์ม

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 สารที่ใช้ในการทำวิจัย ได้แก่ TiO_2 และสารสกัดจากพืชทั้งสองชนิดสามารถดูดความชื้นได้ง่าย ดังนั้นก่อนทำการผสมจึงควรอบเพื่อไล่ความชื้นก่อน

5.3.2 ฟิล์มที่มีการเติมสารสกัดจากพืชทั้งสารสกัดว่านหางจระเข้หรือสารสกัดแอปเปิลในปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 phr มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่มากขึ้นตามปริมาณการ

เติมสารสกัด หากต้องการฟิล์มที่มีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้น ก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มปริมาณสารสกัดลงไปในฟิล์มได้

5.3.3 ฟิล์มสูตรที่มีการผสมระหว่าง TiO_2 และสารสกัดจากพืช ไม่ว่าจะเป็นสารสกัดว่านหางจระเข้หรือสารสกัดแอปเปิล จะเป็นสูตรที่ขึ้นรูปได้ยาก ฟิล์มที่ได้จะไม่เรียบและดึงออกมาเป็นฟิล์มได้ยากขณะขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Cast film extrusion ถ้าต้องการฟิล์มที่มีความเรียบอาจต้องทำการศึกษาสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปเพื่อให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร

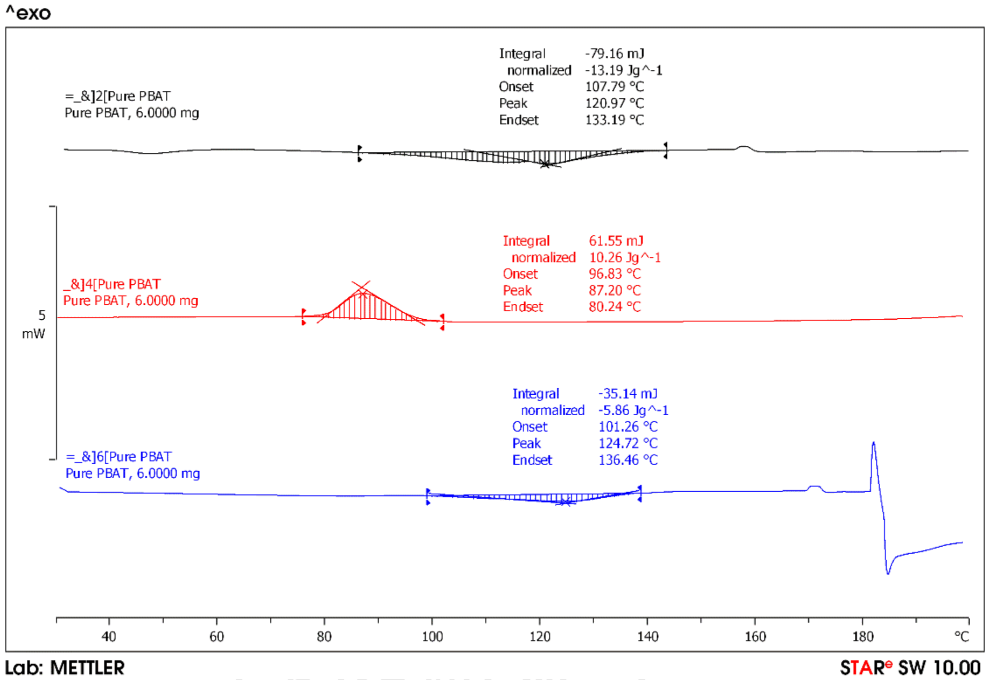
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

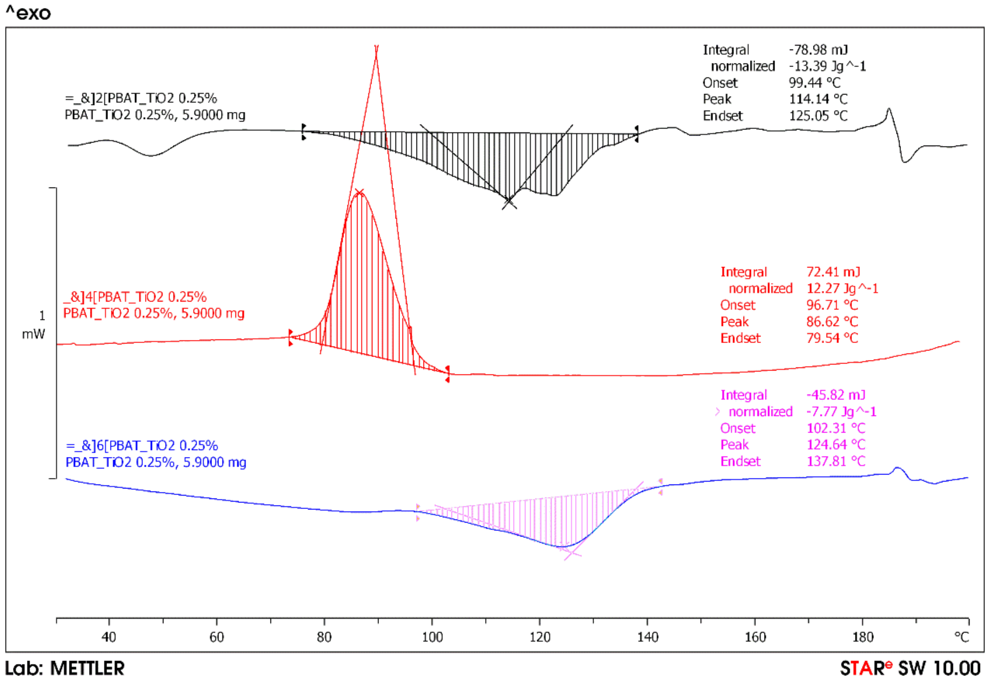
ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่างๆ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

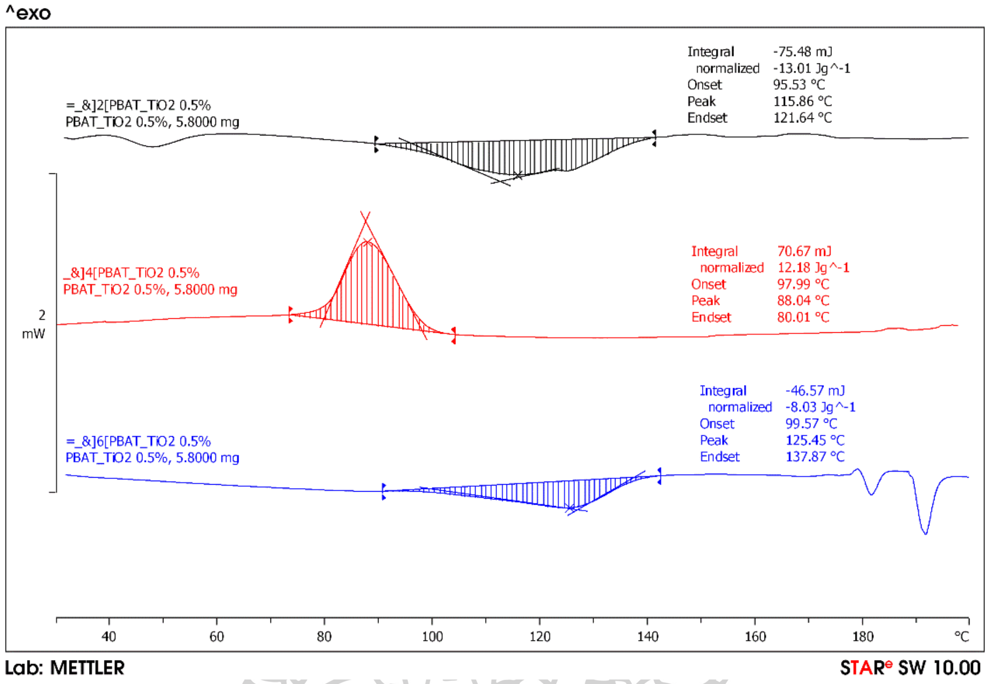
ก-1 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม



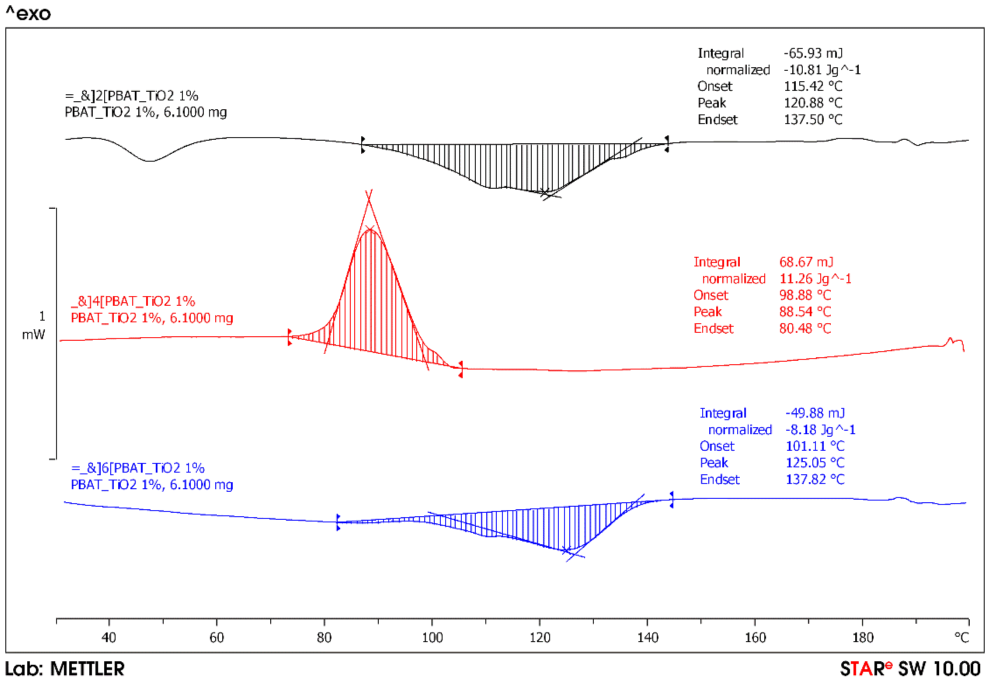
รูปที่ ก.1 DSC thermogram ของ Neat PBAT



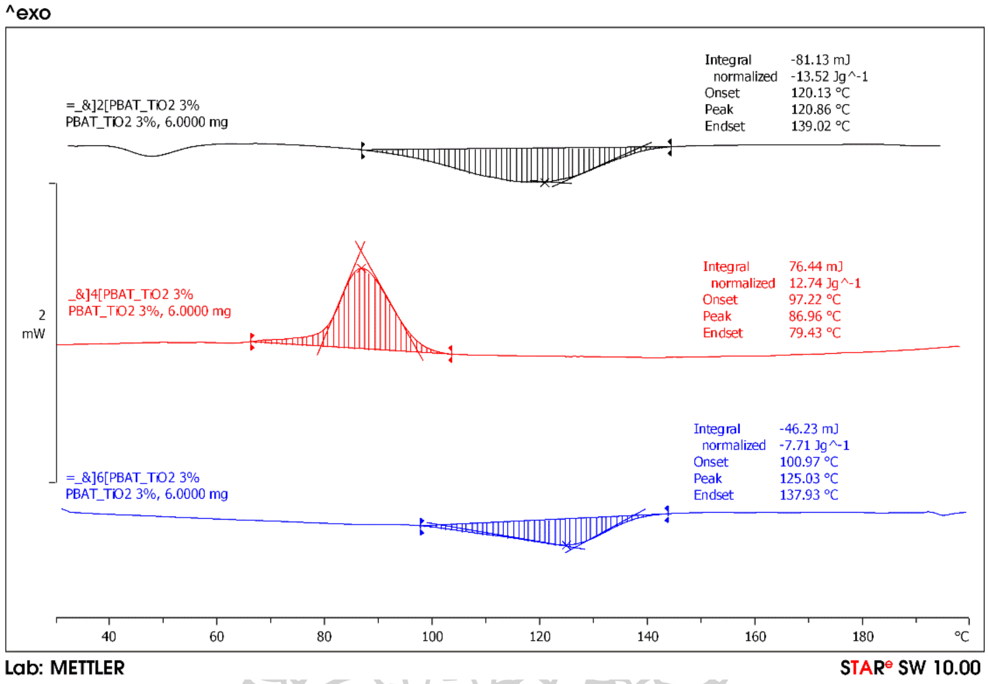
รูปที่ ก.2 DSC thermogram ของ PBAT/T0.25



รูปที่ ก.3 DSC thermogram ของ PBAT/T0.5



รูปที่ ก.4 DSC thermogram ของ PBAT/T1



รูปที่ ก.5 DSC thermogram ของ PBAT/T3

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ก-2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มสูตรต่างๆด้วยเครื่อง Universal testing machine

Sample	No.	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
Neat PBAT	1	4.85	28.81	724.03
	2	4.01	22.45	633.71
	3	52.80	23.42	598.17
	4	33.74	20.15	584.01
	5	28.05	23.07	601.55
	6	40.34	21.69	562.77
	7	45.26	19.71	495.05
	8	19.56	32.55	767.46
	9	7.74	39.59	901.38
	10	28.08	24.02	649.93
	11	8.02	33.19	761.69
	12	9.65	39.55	837.23
	13	34.91	25.87	629.90
	14	42.89	20.56	514.30
	15	33.98	25.10	641.70
	16	7.53	34.44	785.97
	17	51.04	21.55	521.95
	18	42.63	29.27	670.09
	19	36.81	27.37	673.15
	20	31.35	28.64	686.66
	Mean	28.16	27.05	662.03
	S.D.	16.20	6.13	108.68
	1	25.98	24.10	639.08
	2	4.99	26.72	692.86

Sample	No.	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PBAT/T0.25	3	35.14	26.47	633.92
	4	27.79	25.49	666.62
	5	45.39	22.01	595.14
	6	31.50	27.19	682.34
	7	53.60	23.43	540.94
	8	26.02	25.49	647.30
	9	40.05	25.54	602.54
	10	47.77	21.40	532.84
	11	43.49	23.54	610.92
	12	26.57	32.00	758.15
	13	41.96	24.62	629.98
	14	47.54	23.44	585.17
	15	33.84	27.36	670.76
	16	46.72	23.00	596.07
	17	6.40	34.71	762.72
	18	37.24	23.62	603.87
	19	6.99	35.87	802.32
	20	42.42	18.44	504.37
	Mean	33.57	25.72	637.90
	S.D.	14.29	4.27	76.74
	1	35.56	28.85	726.52
	2	37.51	28.34	699.08
	3	43.72	28.77	694.22
	4	43.16	28.47	718.39
	5	32.20	28.24	733.01
	6	36.88	29.45	746.67
	7	57.37	29.78	759.74
	8	35.50	30.97	733.25

Sample	No.	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PBAT/T0.5	9	22.82	26.49	734.83
	10	24.38	26.95	749.77
	11	40.35	26.15	672.45
	12	35.14	24.42	689.89
	13	36.59	29.82	710.50
	14	29.40	28.78	707.83
	15	40.65	30.46	704.20
	16	32.91	27.02	699.97
	17	28.53	26.47	713.80
	18	26.69	27.89	699.52
	19	53.96	25.76	649.89
	20	28.33	31.19	743.71
	Mean	36.08	28.21	714.36
	S.D.	8.92	1.82	27.38
PBAT/T1	1	57.71	27.78	785.17
	2	62.56	30.44	829.31
	3	28.76	30.45	825.03
	4	61.13	29.66	786.77
	5	65.49	31.85	802.64
	6	84.64	41.20	918.36
	7	62.30	25.97	728.18
	8	57.70	30.79	834.52
	9	45.44	26.63	705.94
	10	41.97	27.54	705.80
	11	45.28	29.42	704.84
	12	59.94	20.65	535.26
	13	49.31	23.78	616.59
	14	33.03	28.97	742.12

Sample	No.	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
	15	41.76	26.33	696.49
	16	62.70	32.05	824.58
	17	57.21	29.00	747.91
	18	56.77	29.02	765.60
	19	65.11	30.72	779.07
	20	60.72	27.20	758.84
	Mean	54.98	28.97	754.65
	S.D.	12.80	3.99	83.45
PBAT/T3	1	42.34	25.32	608.76
	2	45.59	26.68	648.35
	3	57.33	24.69	580.84
	4	57.97	24.06	559.03
	5	5.42	31.70	702.52
	6	47.45	23.27	574.96
	7	45.75	26.83	641.54
	8	26.38	26.16	639.29
	9	38.24	18.58	571.46
	10	45.70	24.30	595.73
	11	45.10	24.91	587.35
	12	41.35	28.64	677.06
	13	39.68	27.09	665.46
	14	49.50	26.47	624.92
	15	28.73	28.22	698.50
	16	49.01	21.85	554.64
	17	46.97	23.47	603.03
	18	52.49	19.21	414.07
	19	44.78	14.99	464.90
	20	25.03	34.30	880.45

Sample	No.	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
	Mean	41.74	25.04	614.64
	S.D.	12.32	4.36	94.50
PBAT/AL0.25	1	56.31	23.73	763.50
	2	64.80	24.19	762.56
	3	66.71	17.57	547.87
	4	66.25	23.61	707.57
	5	58.05	18.36	642.60
	6	58.49	19.26	630.10
	7	57.44	21.92	708.35
	8	49.17	19.74	704.92
	9	49.44	19.65	700.58
	10	51.69	19.95	643.27
	11	63.09	18.22	599.20
	12	45.83	20.18	682.23
	13	45.62	18.60	704.94
	14	46.97	20.48	691.47
	15	51.34	19.99	654.84
	16	51.36	19.44	629.23
	17	60.13	16.55	576.59
	18	49.57	19.75	701.66
	19	46.44	19.37	666.62
	20	49.45	18.20	615.14
	Mean	54.41	19.94	666.66
	S.D.	7.06	2.04	56.93
	1	35.25	13.66	602.40
	2	28.95	14.19	628.78
	3	37.99	14.43	583.26
	4	35.81	11.36	473.85

มหาวิทยาลัยศิลปากร

Sample	No.	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PBAT/AL0.5	5	24.97	11.83	568.44
	6	29.53	13.18	648.19
	7	21.66	13.27	691.96
	8	23.20	16.05	716.06
	9	35.42	13.49	606.90
	10	23.61	14.02	687.29
	11	39.22	10.81	505.91
	12	35.09	13.15	620.02
	13	31.84	13.71	629.90
	14	33.70	13.88	643.17
	15	33.61	13.39	606.60
	16	35.68	13.41	645.56
	17	30.71	10.02	551.57
	18	34.58	13.86	688.30
	19	34.34	12.32	632.32
	20	35.71	13.60	615.03
	Mean	32.04	13.18	617.28
	S.D.	5.13	1.35	60.49
PBAT/AL1	1	38.88	11.85	573.15
	2	38.56	11.61	580.13
	3	23.37	13.29	593.80
	4	24.32	14.92	662.46
	5	24.54	15.27	670.74
	6	26.49	11.90	599.52
	7	23.74	13.84	664.06
	8	29.81	13.01	629.68
	9	22.99	18.26	715.40
	10	25.42	16.15	677.30

มหาวิทยาลัยศิลปากร

Sample	No.	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
	11	23.01	14.21	667.75
	12	35.02	16.64	698.80
	13	23.24	12.99	641.09
	14	2.20	10.45	647.94
	15	24.09	10.45	542.02
	16	27.07	15.22	662.87
	17	23.05	13.17	687.78
	18	19.40	8.61	525.72
	19	14.00	13.49	633.41
	20	2.35	13.89	676.91
	Mean	23.58	13.46	637.53
	S.D.	9.38	2.30	52.36
PBAT/AP0.25	1	74.47	26.17	656.74
	2	56.01	27.91	654.87
	3	73.78	30.12	706.69
	4	54.94	31.20	749.54
	5	80.20	37.83	1010.31
	6	70.43	31.38	827.51
	7	73.29	24.55	710.99
	8	73.41	25.34	730.20
	9	70.30	21.64	634.45
	10	64.65	25.22	706.76
	11	45.42	41.33	850.20
	12	73.40	38.51	930.77
	13	62.56	37.02	915.75
	14	84.10	40.43	940.78
	15	75.60	30.85	853.34
	16	63.84	29.19	944.04

Sample	No.	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
	17	70.77	33.88	972.63
	18	71.36	29.90	856.75
	19	72.92	23.66	676.07
	20	62.98	40.68	598.88
	Mean	68.72	31.34	796.36
	S.D.	9.12	6.16	128.09
PBAT/AP0.5	1	75.02	23.66	717.59
	2	71.33	20.26	636.09
	3	71.67	29.00	794.31
	4	75.46	25.79	720.11
	5	74.02	38.41	953.34
	6	78.87	28.70	787.70
	7	73.64	32.95	913.91
	8	72.40	36.51	981.79
	9	87.40	38.86	997.14
	10	50.54	37.04	952.18
	11	53.43	36.68	966.30
	12	73.31	31.68	848.47
	13	77.77	27.14	702.64
	14	72.74	26.76	764.96
	15	40.02	35.67	963.91
	16	80.85	26.78	717.57
	17	73.64	34.04	909.88
	18	70.67	26.66	745.68
	19	78.82	26.51	715.95
	20	74.17	33.35	869.11
	Mean	71.29	30.82	832.93
	S.D.	11.00	5.39	115.01

มหาวิทยาลัยศิลปากร

Sample	No.	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PBAT/AP1	1	39.11	38.09	926.86
	2	55.92	28.65	650.04
	3	41.19	37.86	945.98
	4	62.72	16.68	379.60
	5	29.66	42.35	871.44
	6	63.10	23.03	676.78
	7	52.92	36.80	711.93
	8	71.19	24.94	721.68
	9	57.95	28.64	683.37
	10	45.95	36.37	874.75
	11	41.23	39.87	826.61
	12	45.02	30.25	688.57
	13	71.91	26.77	737.57
	14	62.63	24.53	679.10
	15	58.57	29.42	705.16
	16	72.26	23.75	745.17
	17	49.25	28.78	548.45
	18	58.00	24.83	642.71
	19	56.21	36.03	848.94
	20	57.56	31.85	781.77
	Mean	54.62	30.47	732.32
	S.D.	11.61	6.74	132.34
	1	44.15	33.68	622.42
	2	43.91	31.21	612.41
	3	42.62	29.00	562.69
	4	54.25	43.42	580.02
	5	48.70	36.08	565.05
	6	54.05	28.33	483.41

Sample	No.	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PBAT/T0.5/AL0.25	7	48.90	36.91	595.05
	8	55.58	24.45	347.86
	9	58.45	24.88	430.10
	10	61.31	29.48	380.96
	11	43.83	38.49	562.21
	12	47.87	32.62	616.69
	13	48.67	33.57	542.45
	14	56.24	38.35	521.65
	15	52.04	36.61	485.07
	16	51.56	27.24	424.34
	17	68.50	43.52	447.67
	18	60.10	49.69	494.99
	19	49.29	38.44	539.44
	20	55.08	27.57	440.21
	Mean	52.25	34.18	512.73
	S.D.	6.70	6.70	80.80
PBAT/T0.5/AL0.5	1	38.39	28.20	590.82
	2	46.13	27.21	589.28
	3	40.78	36.38	698.33
	4	56.37	22.99	639.37
	5	55.39	26.28	529.08
	6	44.28	21.69	451.77
	7	41.35	24.10	535.87
	8	41.73	27.17	595.05
	9	35.71	28.10	771.40
	10	46.43	24.79	613.46
	11	45.56	26.49	554.27
	12	48.71	23.91	552.58

มหาวิทยาลัยศิลปากร

Sample	No.	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
	13	51.11	25.56	647.64
	14	43.98	24.55	563.25
	15	47.93	22.98	537.69
	16	45.65	24.03	677.52
	17	38.32	30.13	651.44
	18	44.25	29.97	586.23
	19	48.30	28.05	607.38
	20	46.43	23.02	524.25
	Mean	45.34	26.28	595.83
	S.D.	5.28	3.38	71.91
PBAT/T0.5/AL1	1	14.62	11.91	558.29
	2	2.97	18.11	732.18
	3	25.82	21.11	723.70
	4	40.92	20.20	730.26
	5	52.42	19.82	670.84
	6	49.76	19.58	720.54
	7	47.78	17.76	666.50
	8	29.45	21.97	641.39
	9	46.76	20.14	761.42
	10	37.18	20.34	729.90
	11	43.88	22.48	846.36
	12	34.63	20.99	745.85
	13	43.23	18.28	729.74
	14	46.83	18.40	721.83
	15	46.11	19.93	819.86
	16	32.23	19.63	675.84
	17	34.97	17.50	682.46
	18	34.03	20.33	731.68

Sample	No.	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
	19	49.59	21.35	845.53
	20	33.98	22.01	758.98
	Mean	37.36	19.59	724.66
	S.D.	12.44	2.31	67.56
PBAT/T0.5/AP0.25	1	33.14	36.15	691.96
	2	40.17	20.71	476.27
	3	31.55	32.87	819.14
	4	26.17	35.68	868.87
	5	33.01	33.11	696.17
	6	35.33	33.61	593.84
	7	41.10	22.03	771.59
	8	27.06	40.49	723.48
	9	43.81	26.84	507.12
	10	35.10	24.50	683.99
	11	32.49	25.62	927.93
	12	30.76	38.62	684.49
	13	38.98	38.98	647.36
	14	30.68	39.78	731.29
	15	36.82	25.78	583.54
	16	45.35	19.81	627.50
	17	34.73	33.45	841.53
	18	41.78	33.11	570.59
	19	41.84	19.15	390.77
	20	33.28	31.27	826.76
	Mean	35.66	30.58	683.21
	S.D.	5.42	6.98	138.57
	1	31.25	44.37	791.41
	2	47.06	27.07	562.25

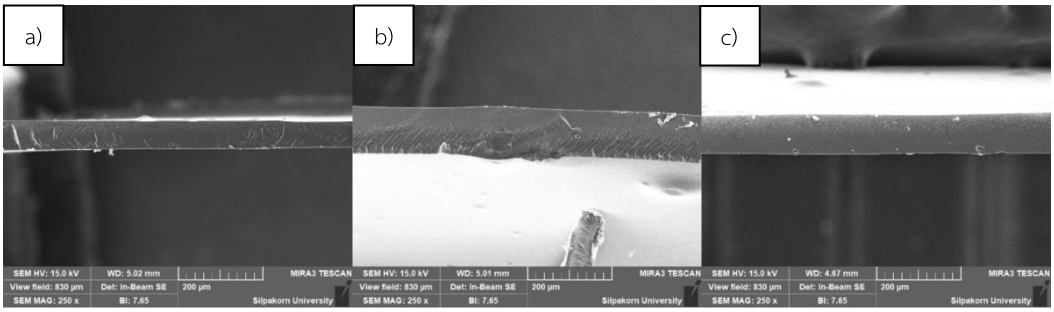
มหาวิทยาลัยศิลปากร

Sample	No.	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PBAT/T0.5/AP0.5	3	36.36	41.87	696.91
	4	45.67	25.85	667.55
	5	37.16	43.31	723.55
	6	32.23	36.24	905.62
	7	29.14	34.06	855.42
	8	38.31	31.93	881.85
	9	47.13	22.55	566.84
	10	50.31	18.79	344.38
	11	26.82	37.49	880.47
	12	25.12	35.41	837.99
	13	30.79	34.89	847.29
	14	25.42	38.74	886.90
	15	41.05	35.06	644.03
	16	29.73	35.38	773.13
	17	34.00	36.19	814.66
	18	29.77	43.74	769.72
	19	44.83	48.41	610.73
	20	35.15	30.09	668.78
	Mean	35.86	35.07	736.47
	S.D.	7.82	7.55	143.22
	1	55.11	29.31	523.18
	2	33.85	37.53	770.68
	3	31.94	35.86	651.07
	4	39.71	39.75	742.11
	5	31.83	35.92	920.27
	6	48.51	26.26	590.35
	7	46.27	43.44	634.81
	8	52.23	25.23	548.52

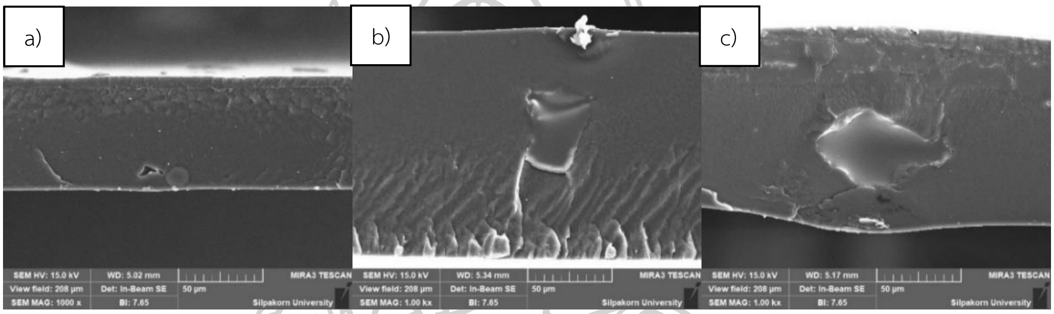
Sample	No.	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
PBAT/T0.5/AP1	9	50.44	34.74	676.64
	10	36.95	44.76	777.40
	11	35.26	45.15	861.22
	12	44.44	30.82	758.82
	13	39.16	41.71	706.63
	14	36.77	46.65	795.08
	15	36.46	40.93	805.55
	16	27.42	38.95	783.98
	17	58.24	34.49	423.39
	18	55.92	22.95	545.96
	19	35.59	30.91	783.80
	20	27.65	37.88	798.57
	Mean	41.19	36.16	704.90
	S.D.	9.55	6.87	127.31

มหาวิทยาลัยศิลปากร

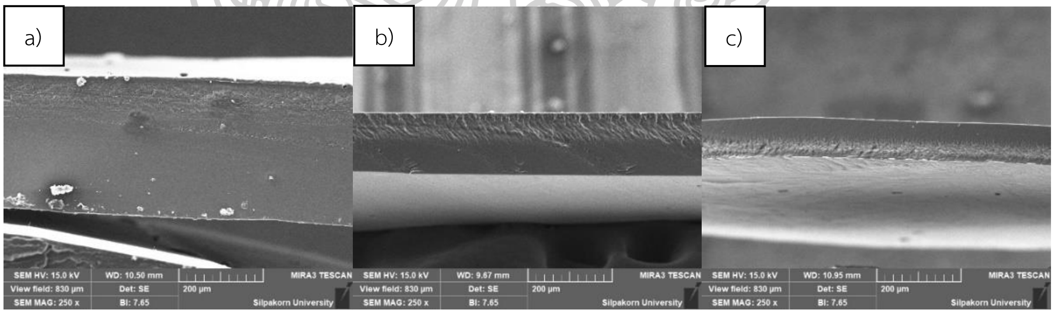
ก-3 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานฟิล์ม



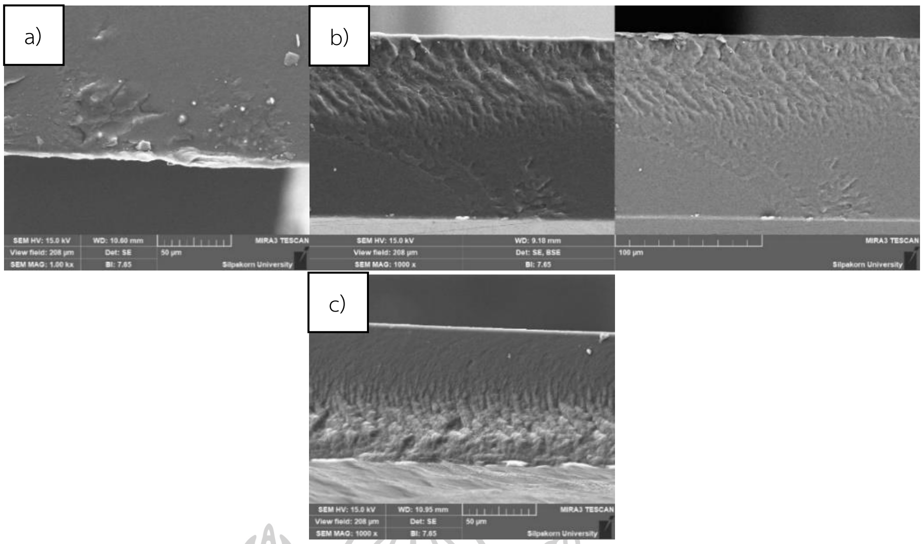
รูปที่ ก.6 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ที่กำลังขยาย 250 เท่า (250X) a) PBAT/AL0.25 b) PBAT/AL0.5 และ c) PBAT/AL1



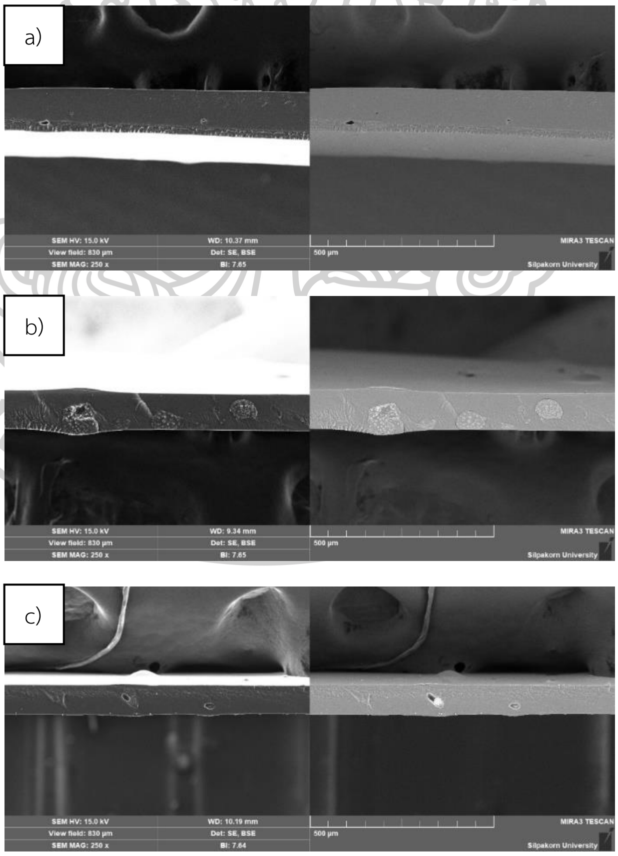
รูปที่ ก.7 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (1000X) a) PBAT/AL0.25 b) PBAT/AL0.5 และ c) PBAT/AL1



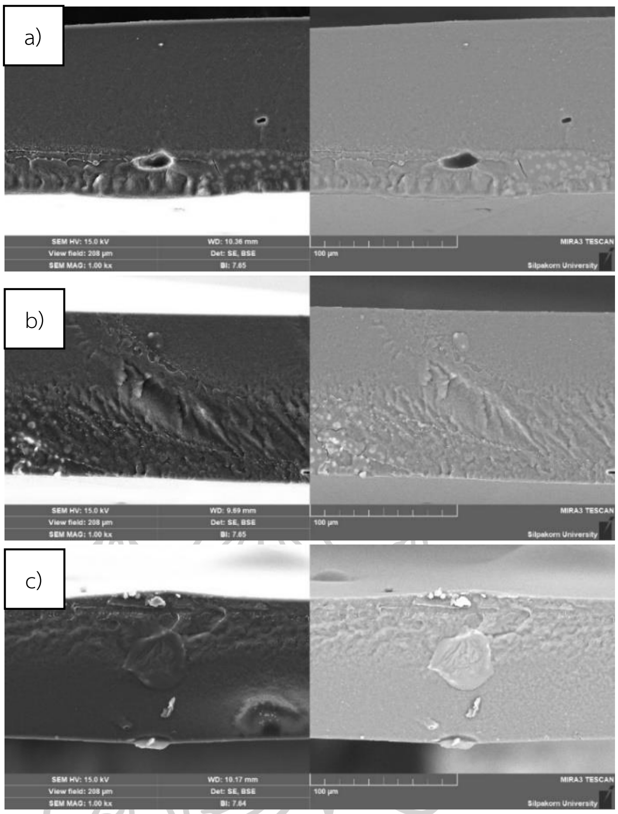
รูปที่ ก.8 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิลที่กำลังขยาย 250 เท่า (250X) a) PBAT/AP0.25 b) PBAT/AP0.5 และ c) PBAT/AP1



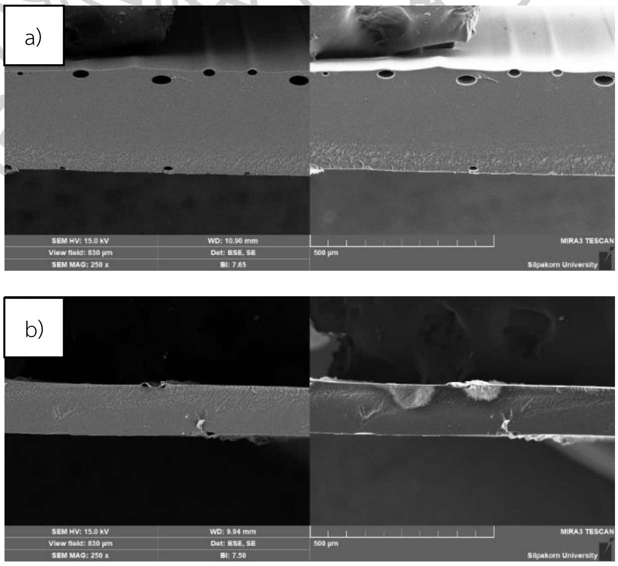
รูปที่ ก.9 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิลที่กำลังขยาย 1000 เท่า (1000X) a) PBAT/AP0.25 b) PBAT/AP0.5 และ c) PBAT/AP1



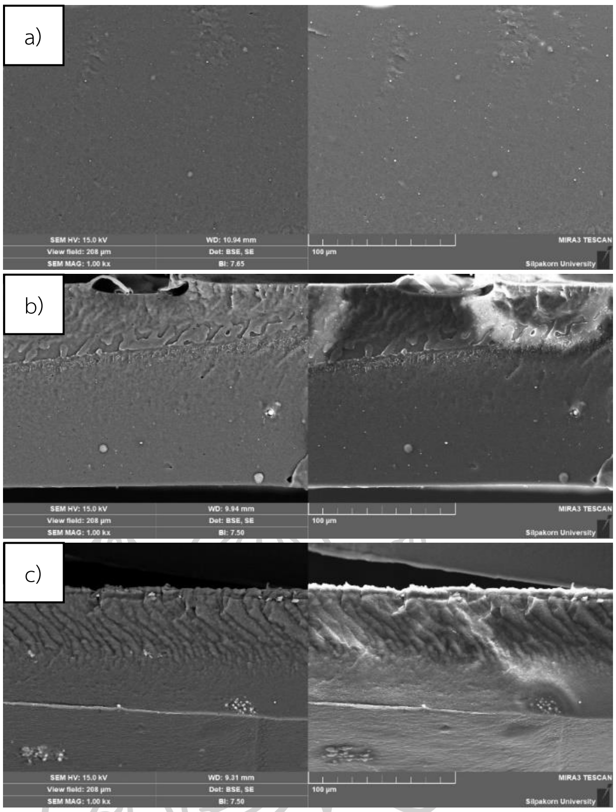
รูปที่ ก.10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดว่านหางจระเข้ที่กำลังขยาย 250 เท่า (250X) a) PBAT/ T0.5/AL0.25 b) PBAT/T0.5/AL0.5 และ c) PBAT/T0.5/AL1



รูปที่ ก.11 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 0.50 % wt และสารสกัดว่านหางจระเข้ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (1000X) โดยใช้โหมด SE (ซ้าย) และ BSE (ขวา) a) PBAT/T0.5/AL0.25 b) PBAT/T0.5/AL0.5 และ c) PBAT/T0.5/AL1



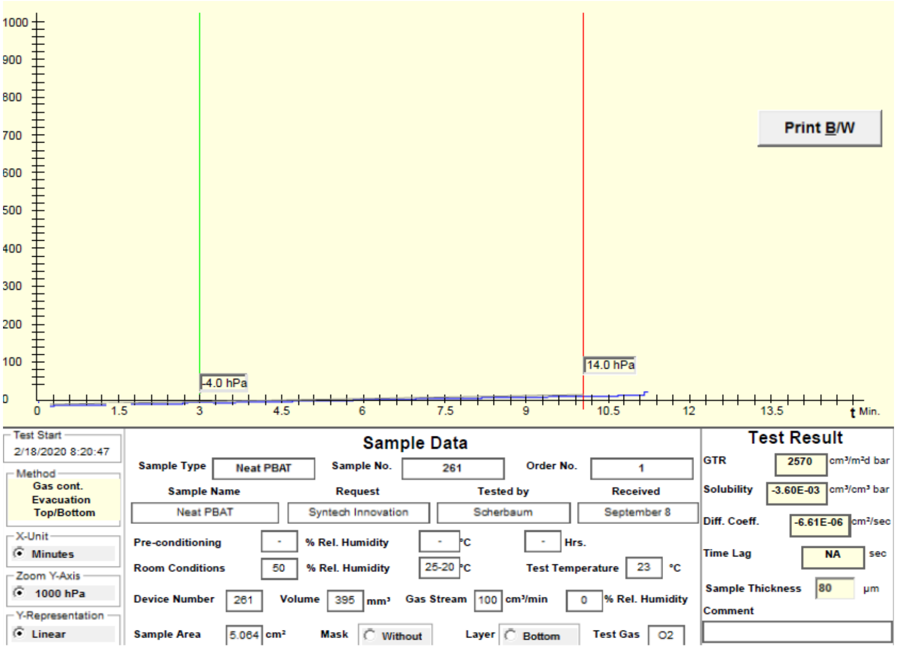
รูปที่ ก.12 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติมสารสกัดแอปเปิลที่กำลังขยาย 250 เท่า (250X) a) PBAT/T0.5/AP0.25 และ b) PBAT/T0.5/APL0.5



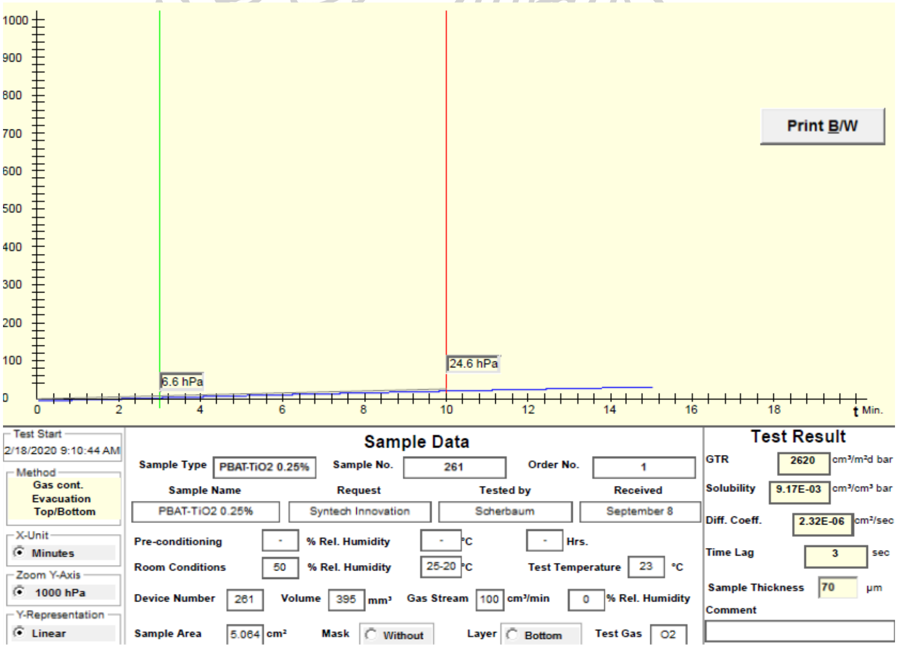
รูปที่ ก.13 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม TiO_2 0.50 % wt และสารสกัดแอปเปิลที่กำลังขยาย 1000 เท่า (1000X) a) PBAT/T0.5/AP0.25
b) PBAT/T0.5/AP0.5 และ c) PBAT/T0.5/AP1

มหาวิทยาลัยศิลปากร

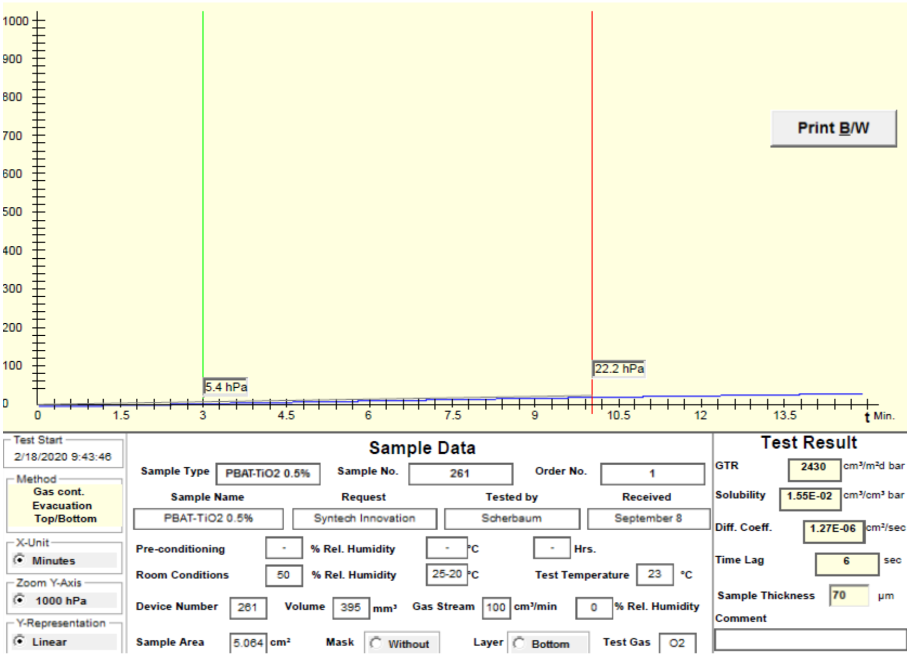
ก-4 ผลการศึกษาอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม



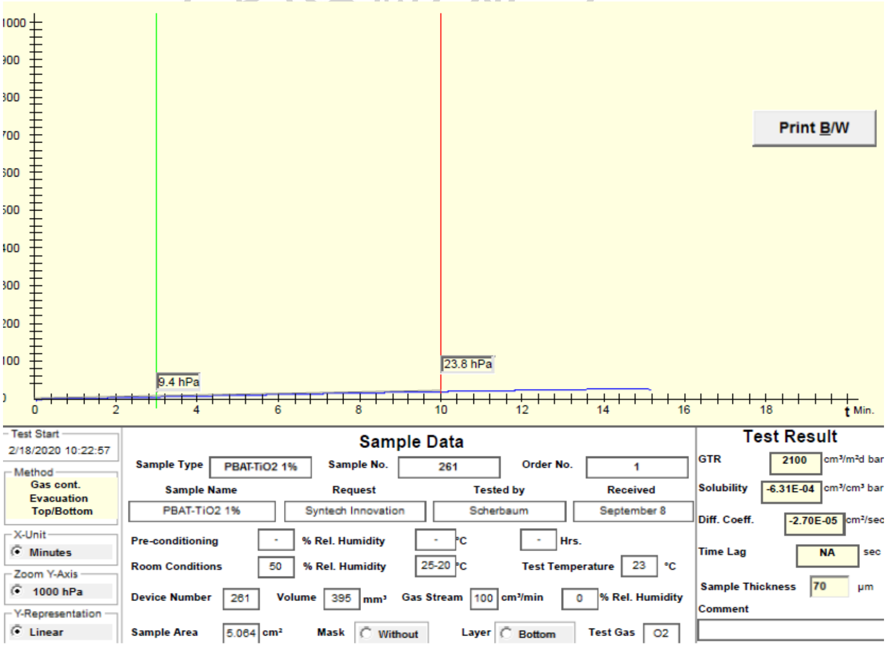
รูปที่ ก.14 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม Neat PBAT



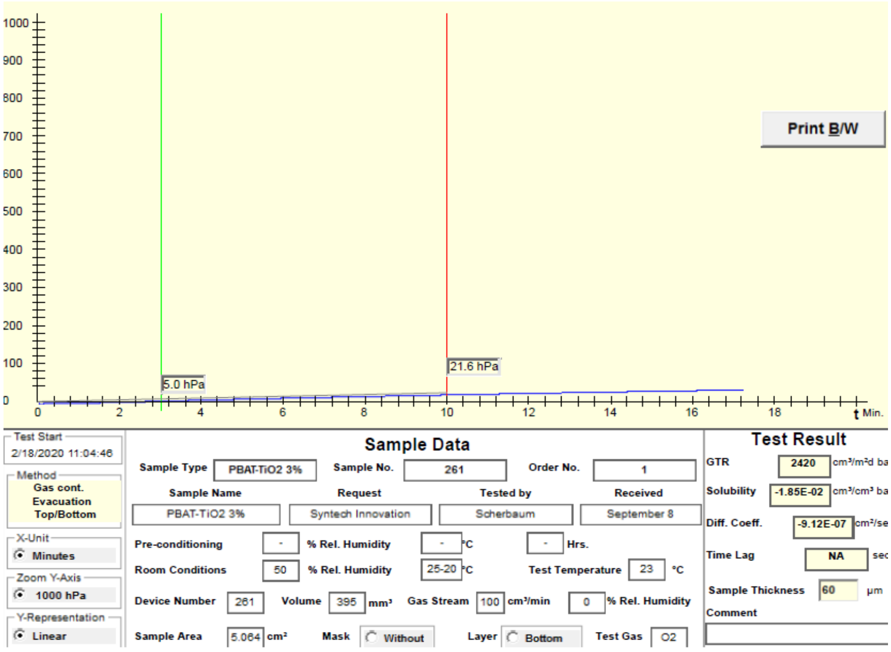
รูปที่ ก.15 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T0.25



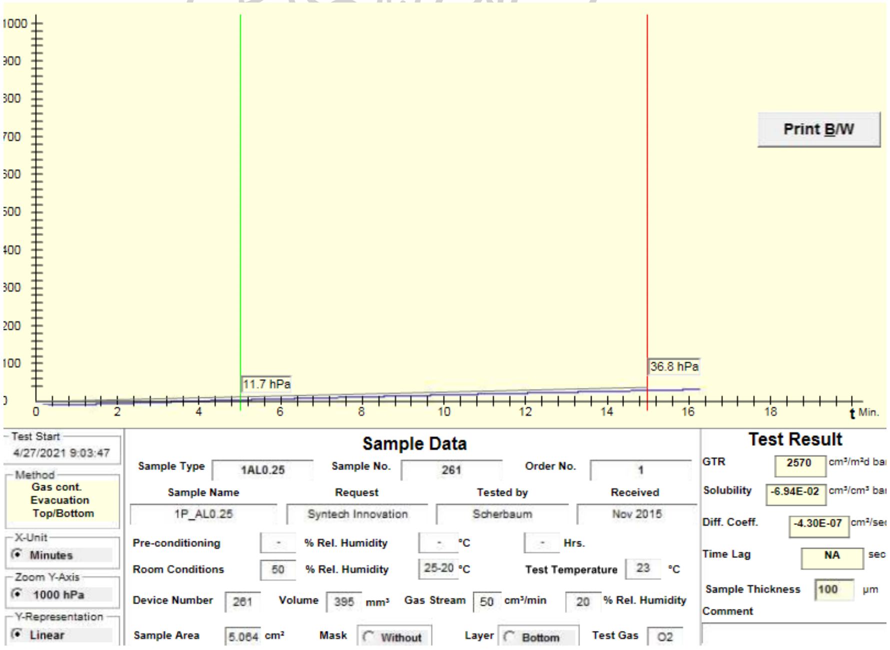
รูปที่ ก.16 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T0.5



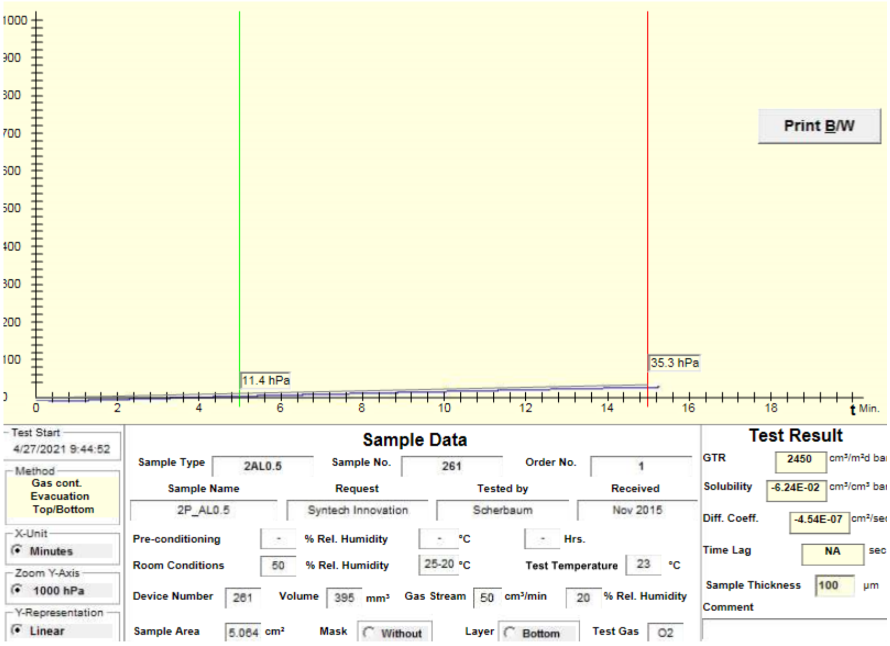
รูปที่ ก.17 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T1



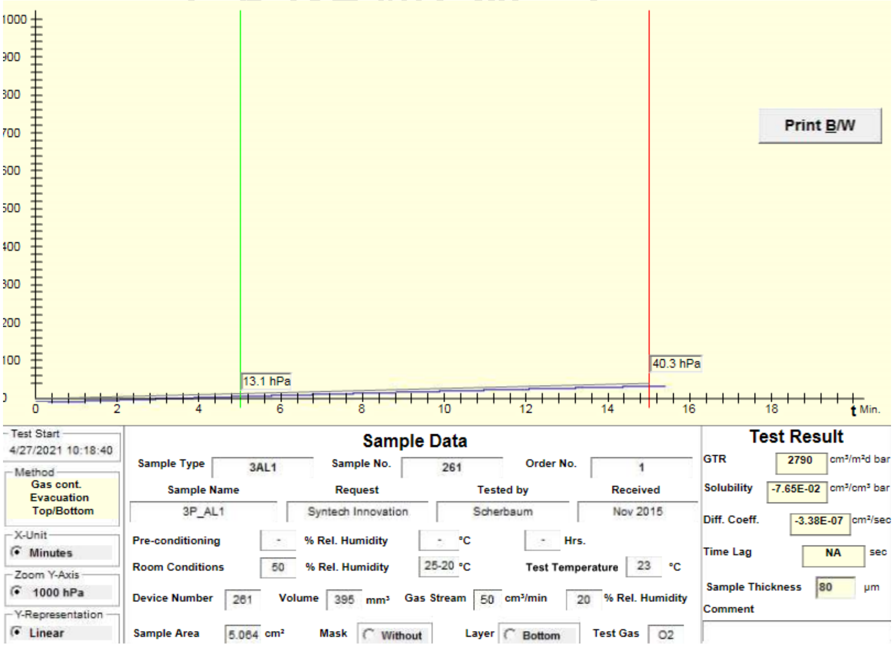
รูปที่ ก.18 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T3



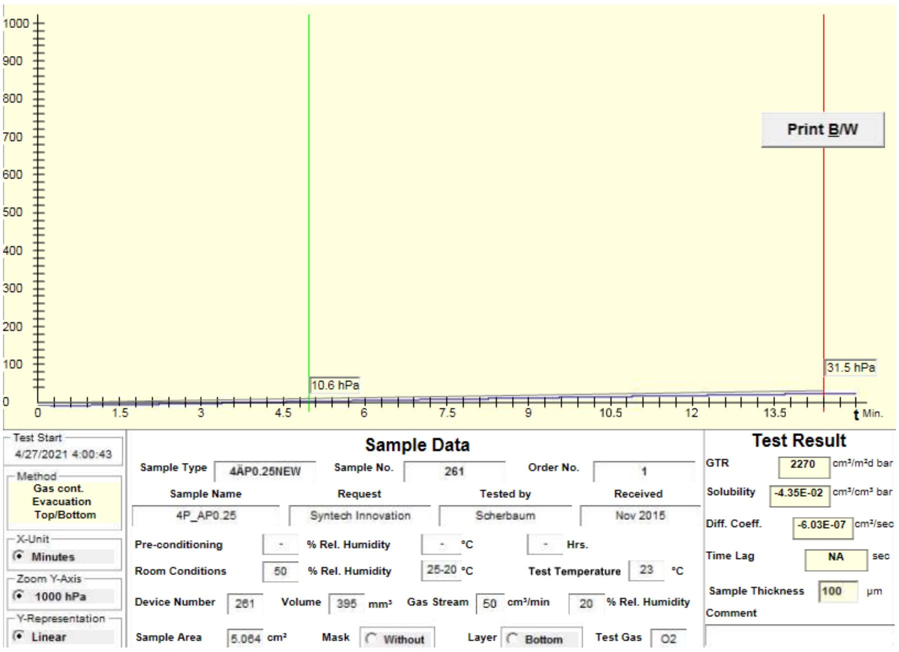
รูปที่ ก.19 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/AL0.25



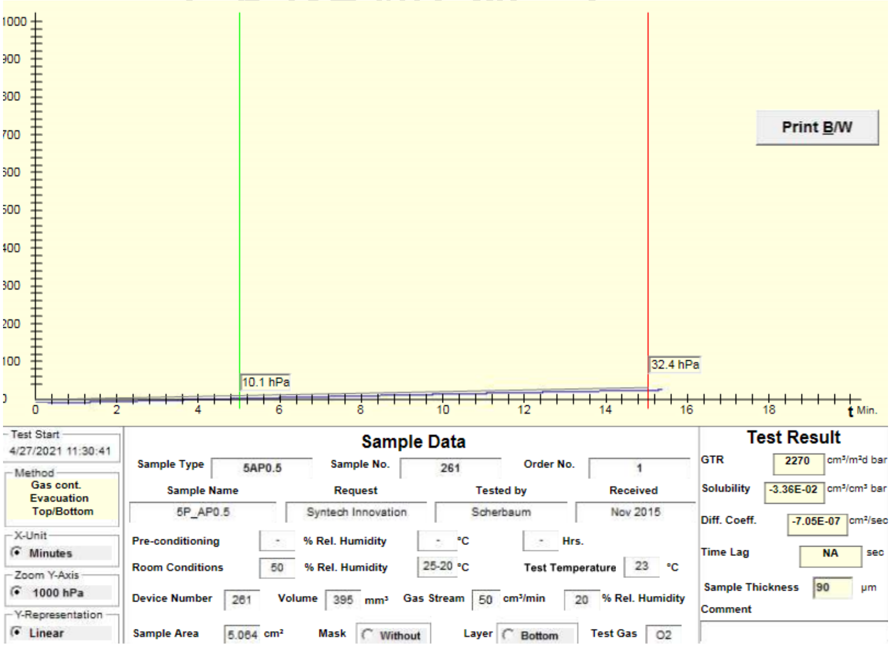
รูปที่ ก.20 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/AL0.5



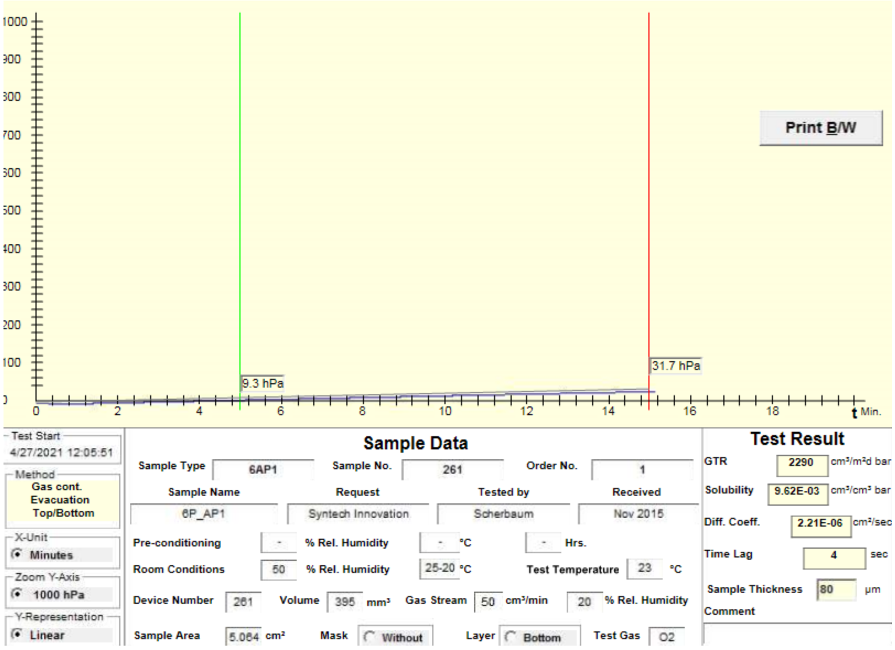
รูปที่ ก.21 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/AL1



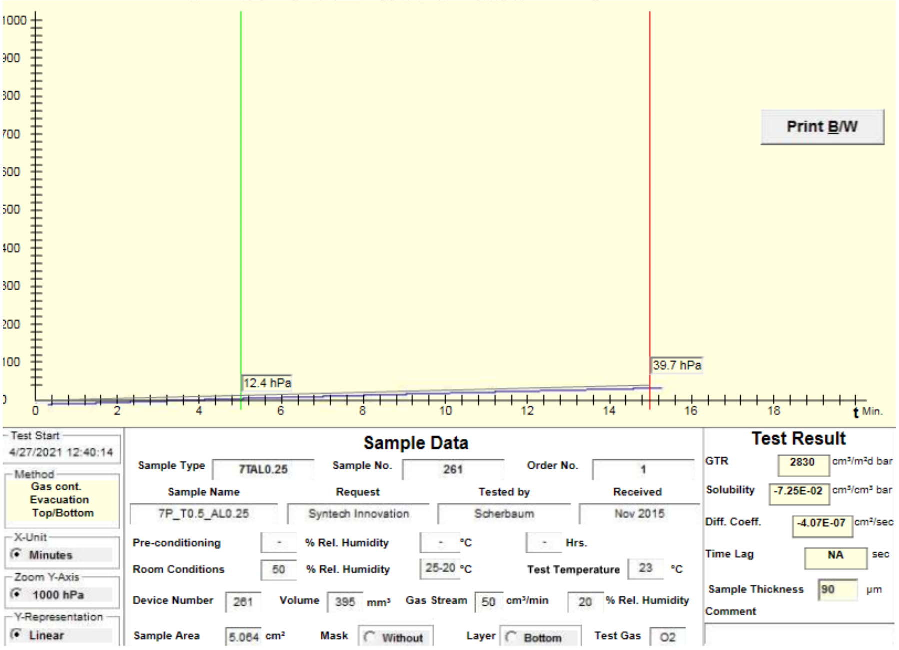
รูปที่ ก.22 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/AP0.25



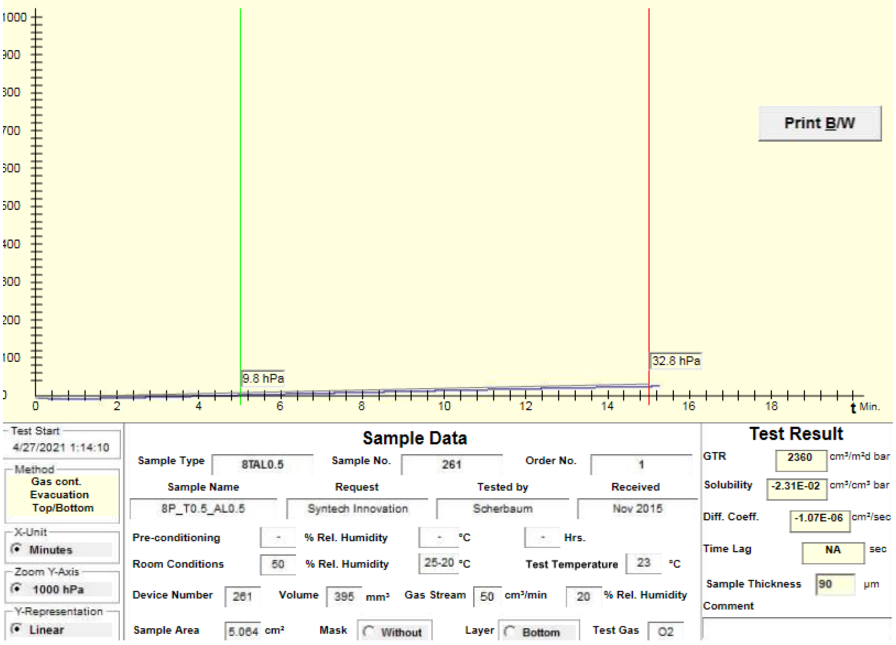
รูปที่ ก.23 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/AP0.5



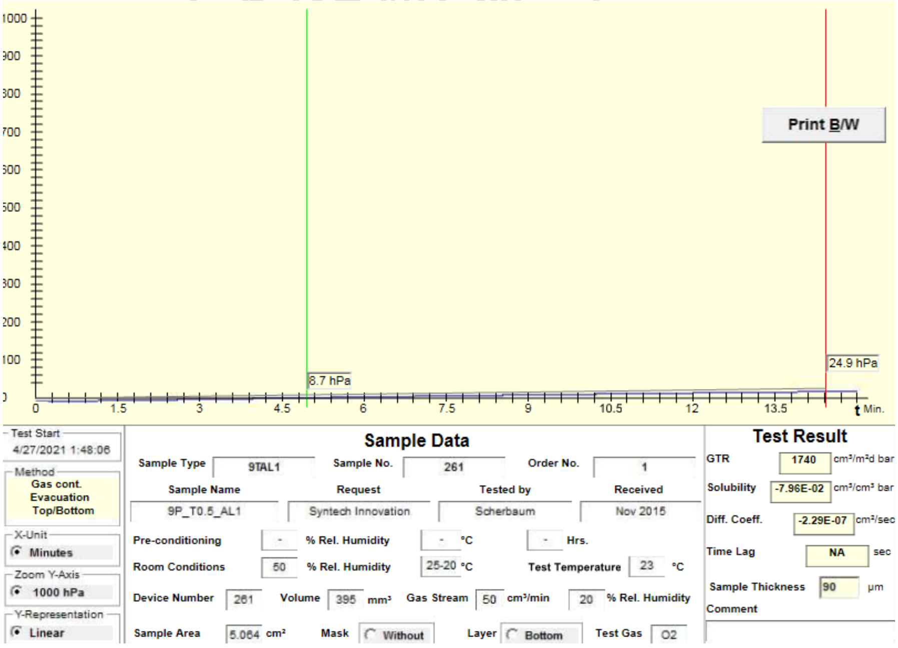
รูปที่ ก.24 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/AP1



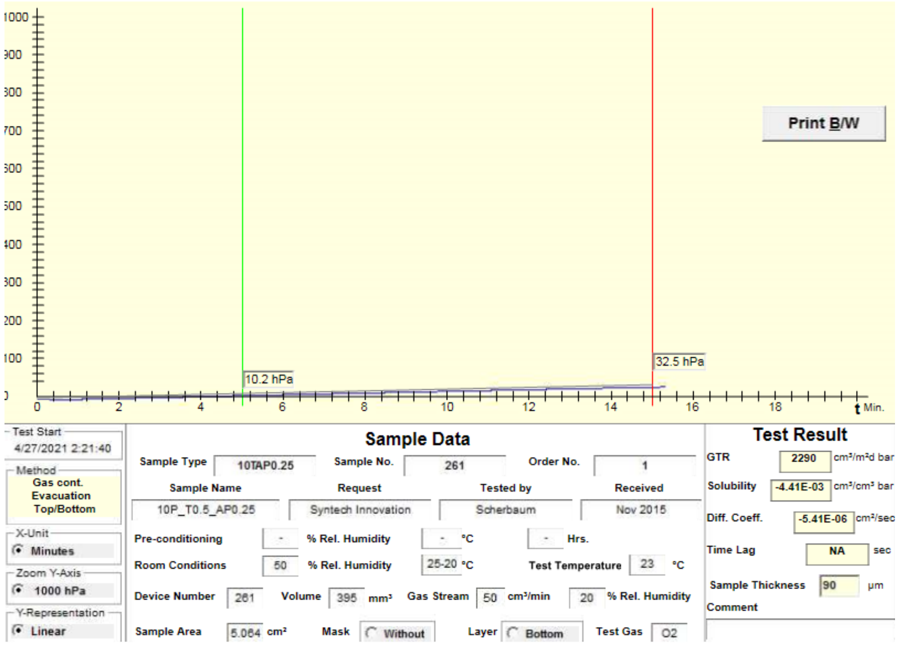
รูปที่ ก.25 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T0.5/AL0.25



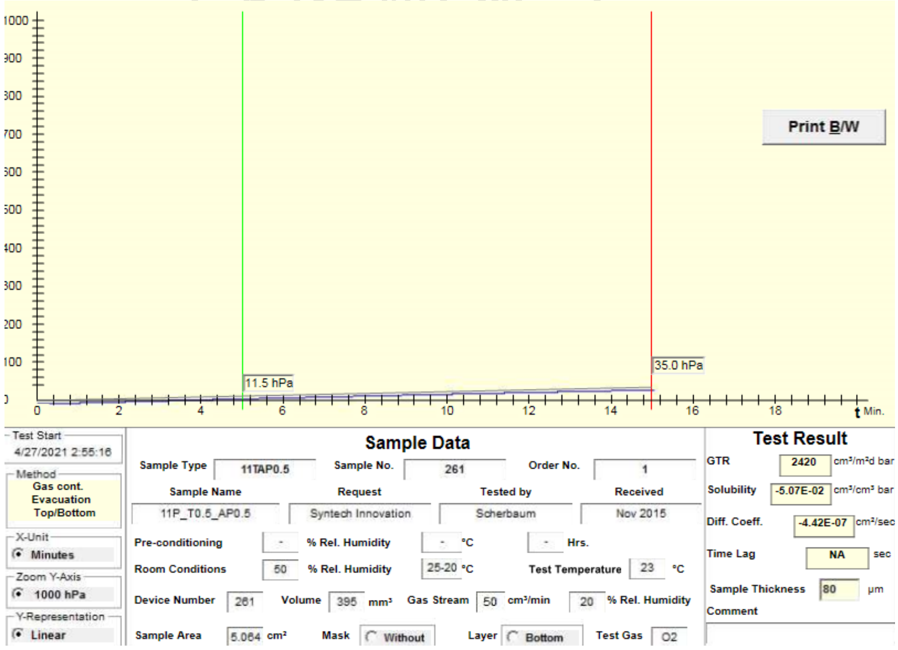
รูปที่ ก.26 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T0.5/AL0.5



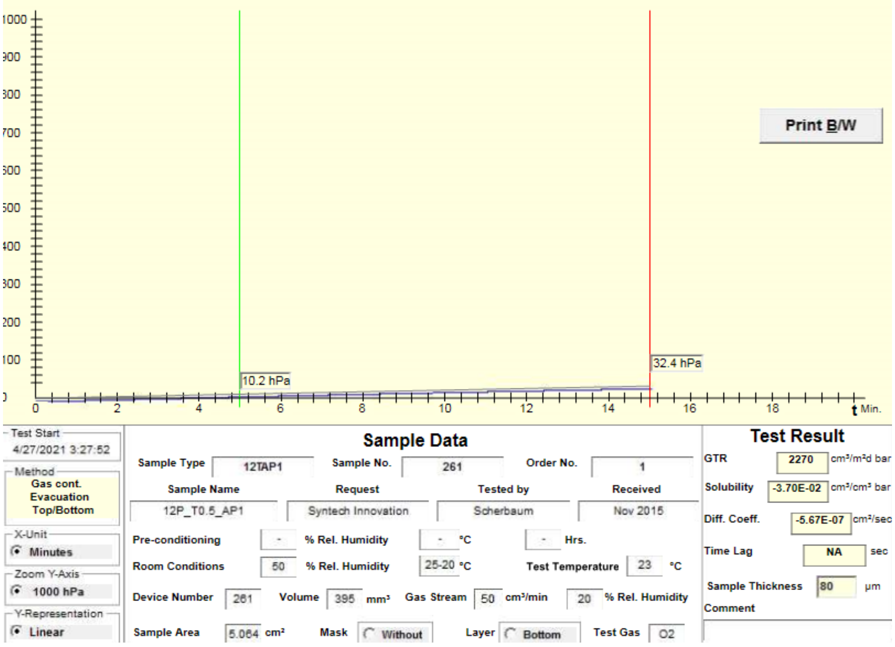
รูปที่ ก.27 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T0.5/AL1



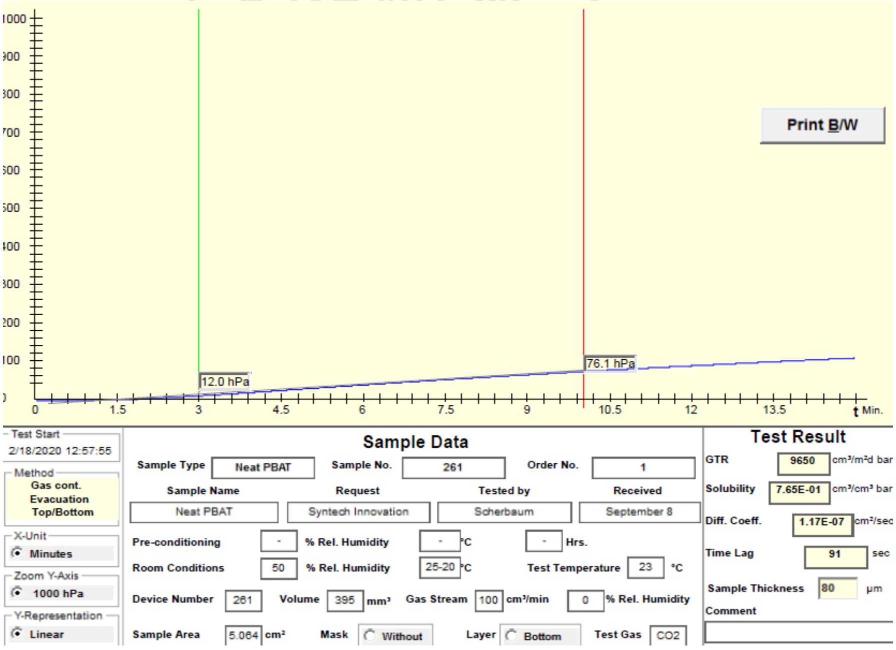
รูปที่ ก.28 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T0.5/AP0.25



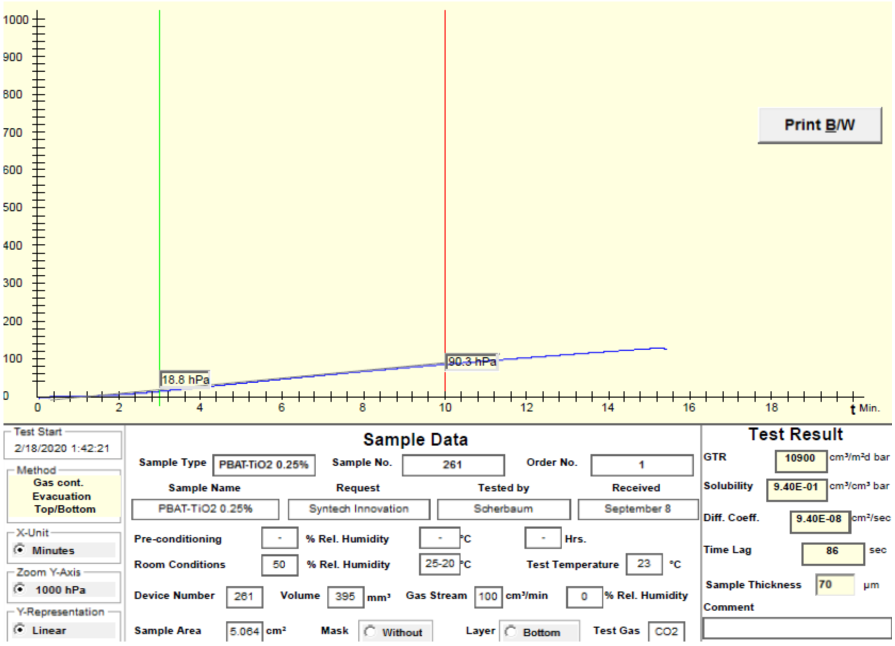
รูปที่ ก.29 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T0.5/AP0.5



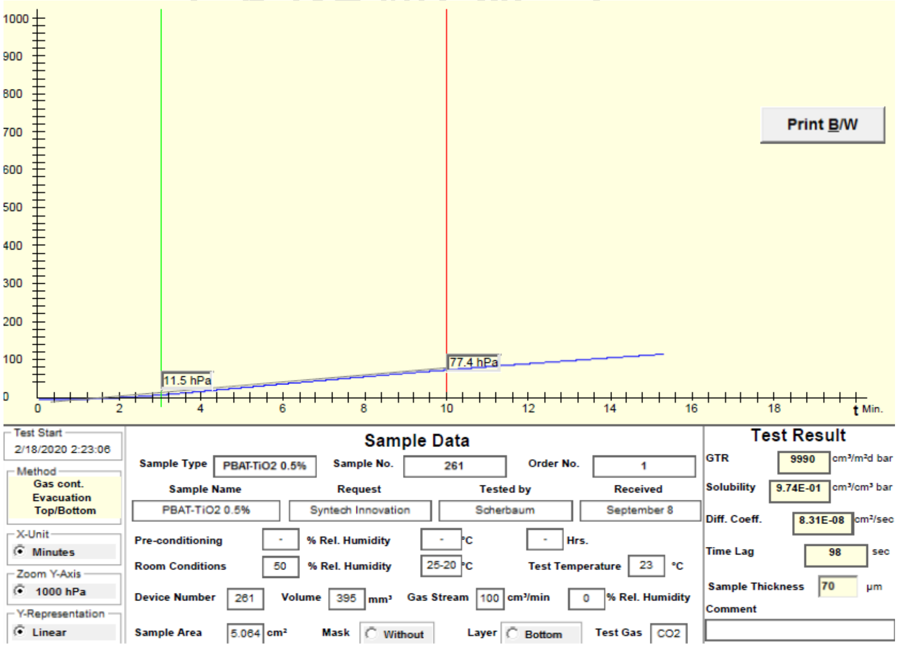
รูปที่ ก.30 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PBAT/T0.5/AP1



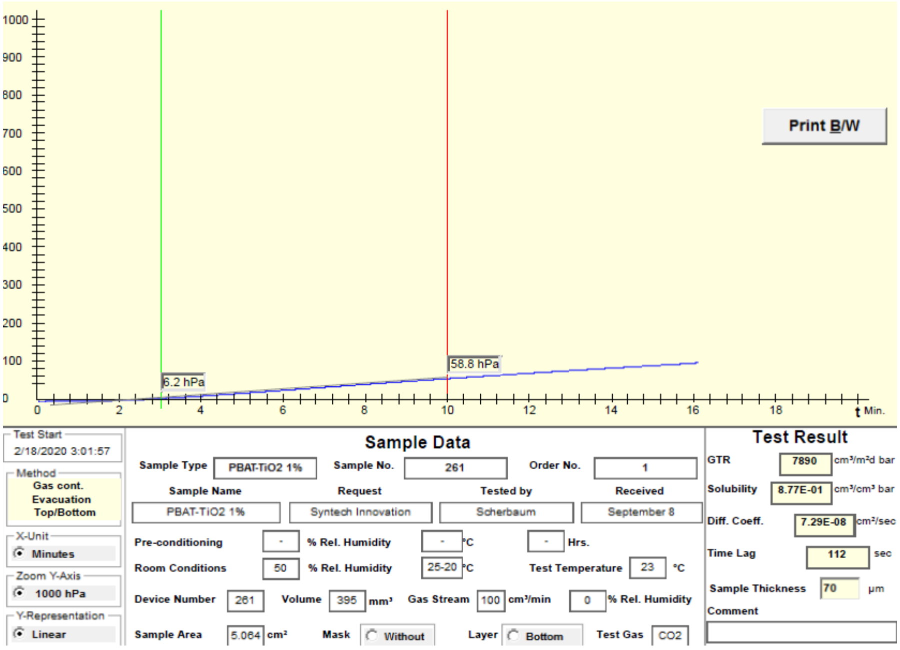
รูปที่ ก.31 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม Neat PBAT



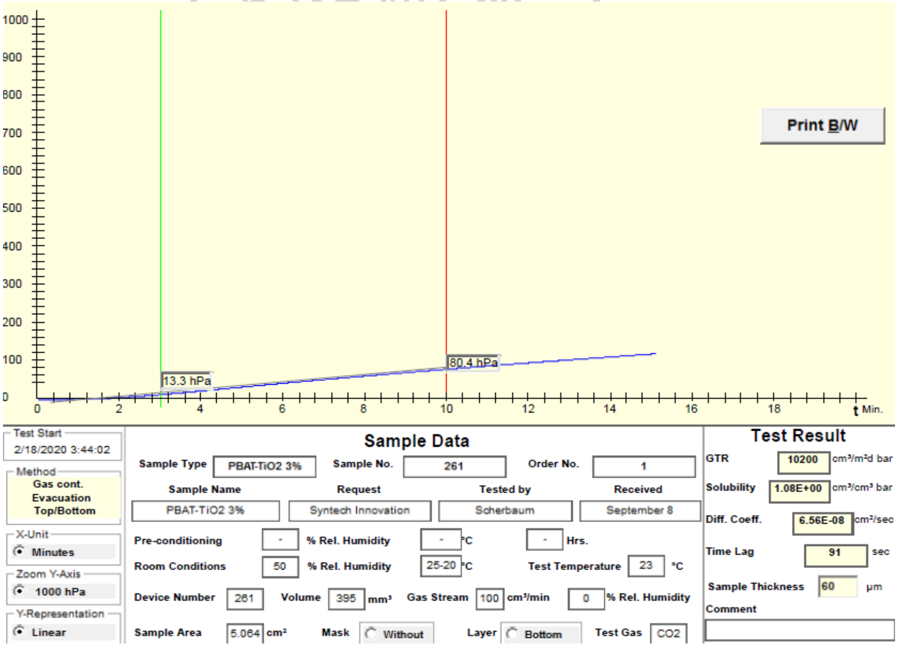
รูปที่ ก.32 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.25



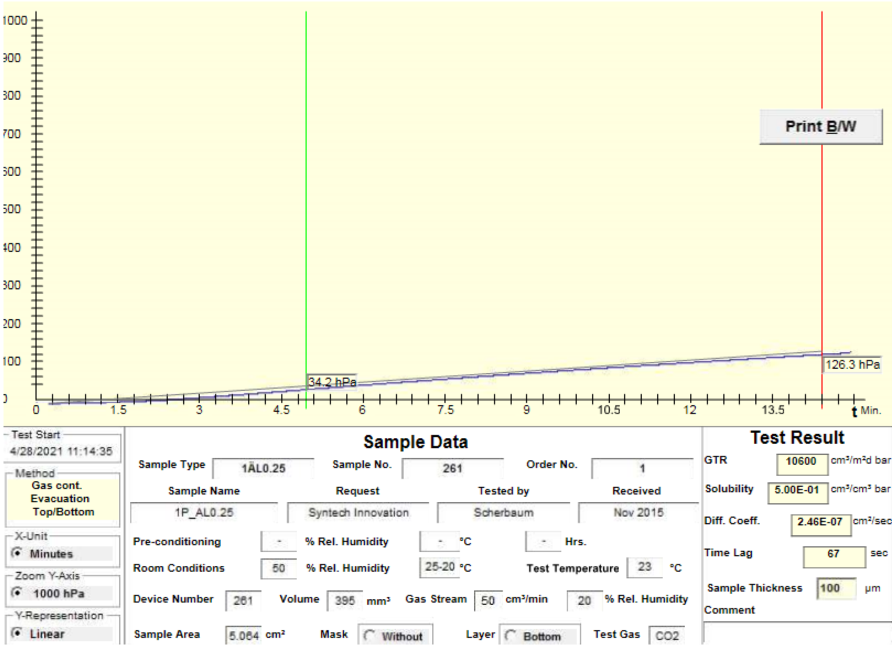
รูปที่ ก.33 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.5



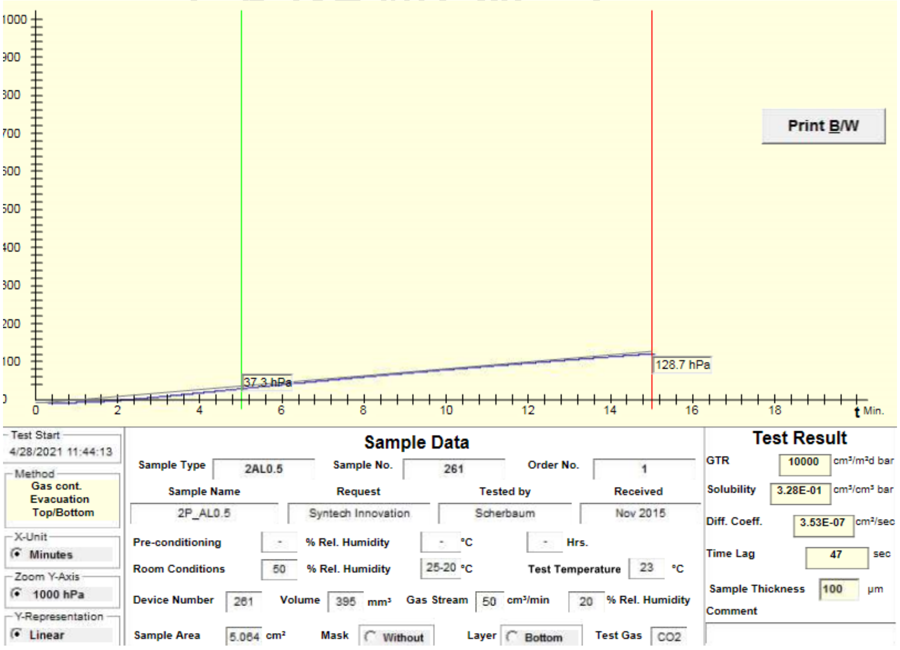
รูปที่ ก.34 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T1



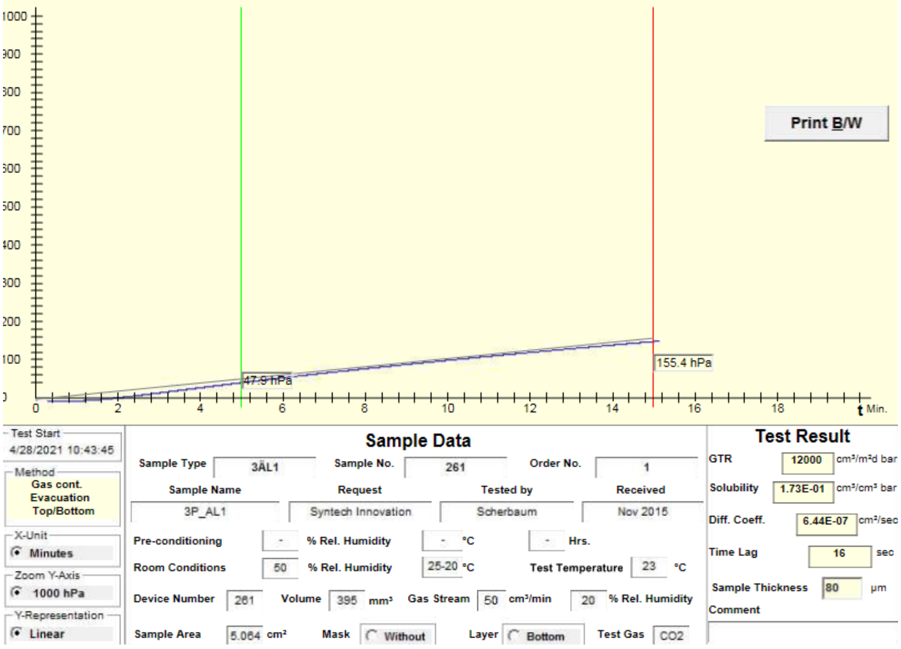
รูปที่ ก.35 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T3



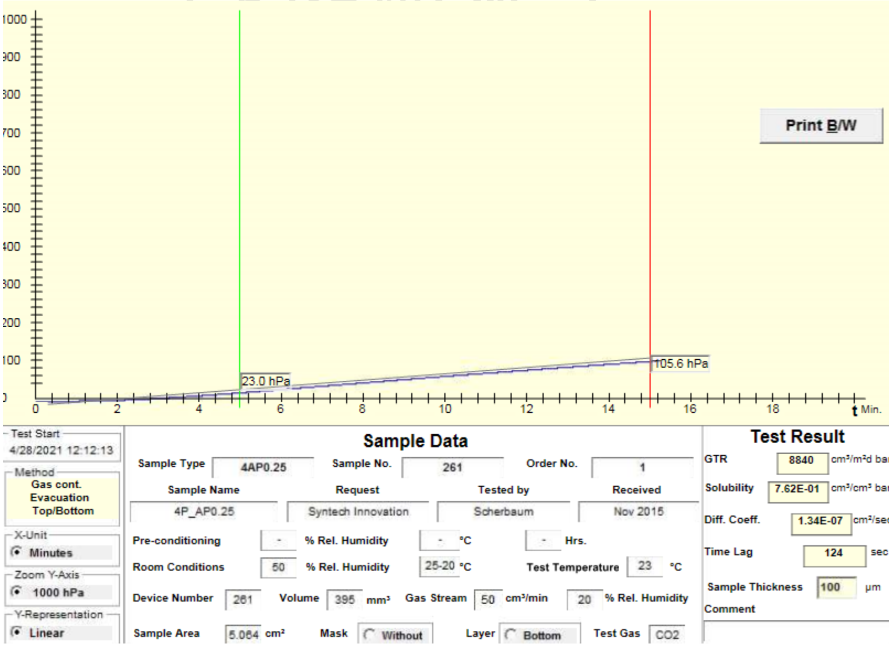
รูปที่ ก.36 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/AL0.25



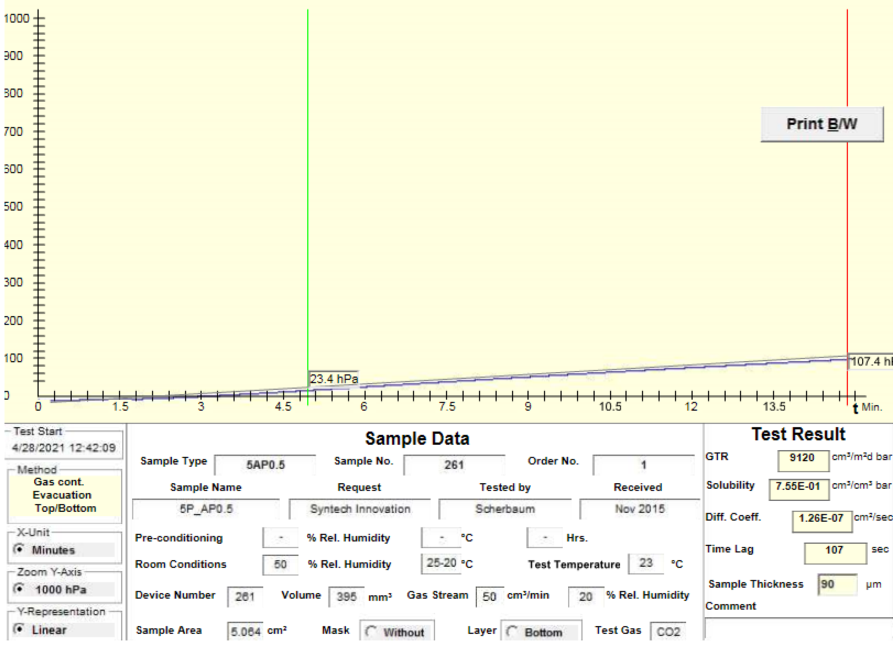
รูปที่ ก.37 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/AL0.5



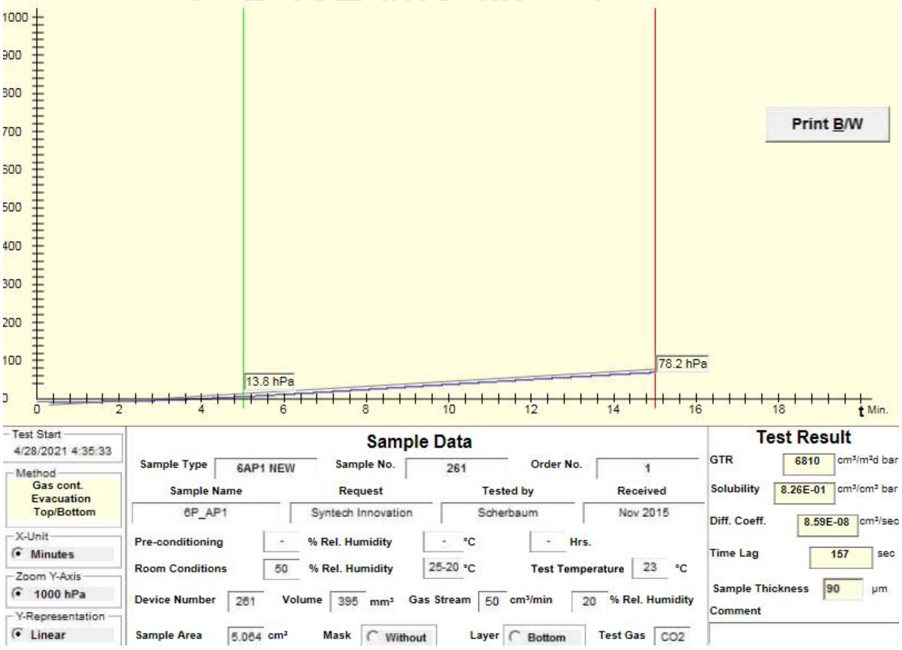
รูปที่ ก.38 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/AL1



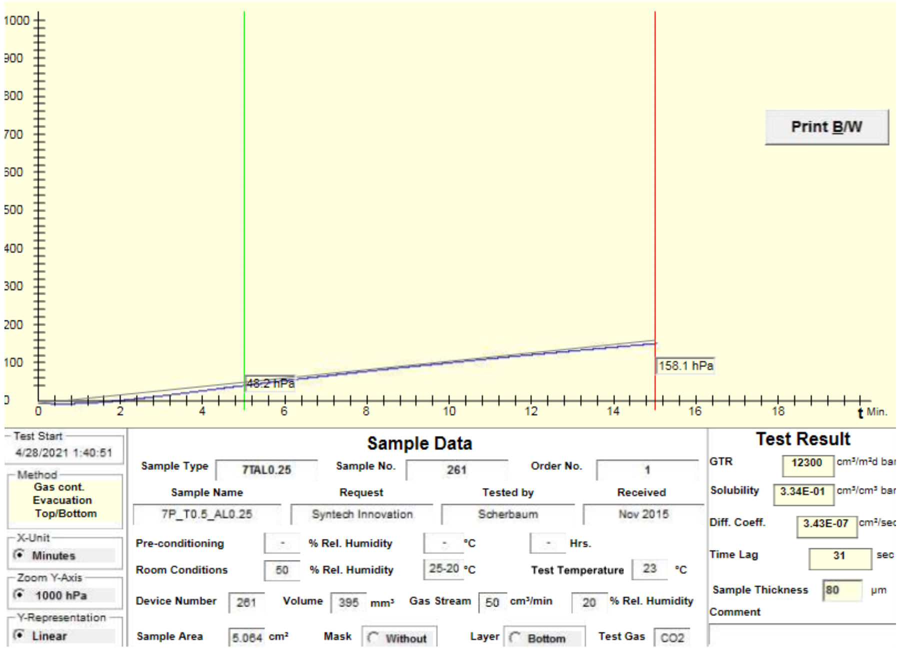
รูปที่ ก.39 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/AP0.25



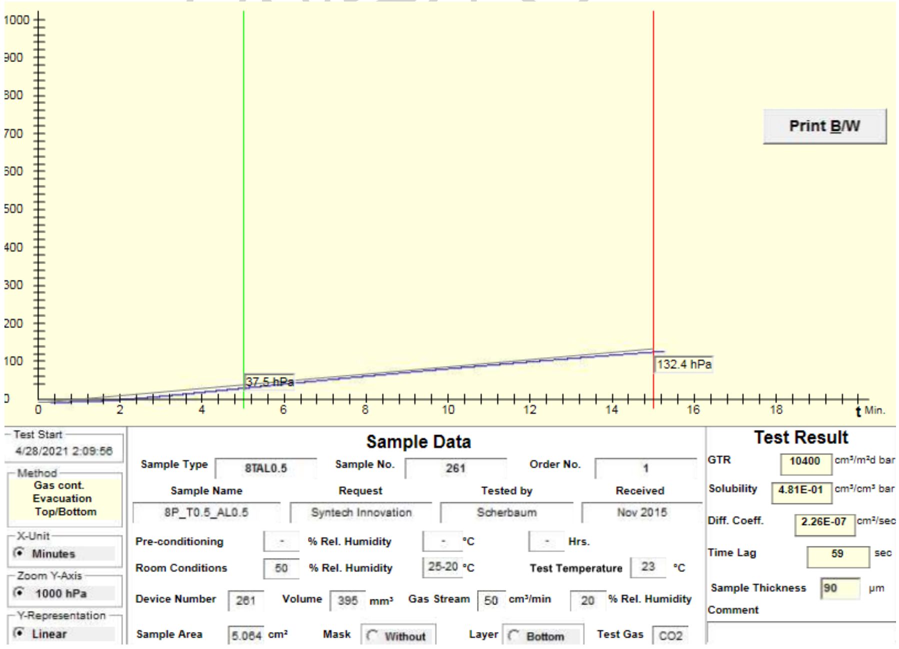
รูปที่ ก.40 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/AP0.5



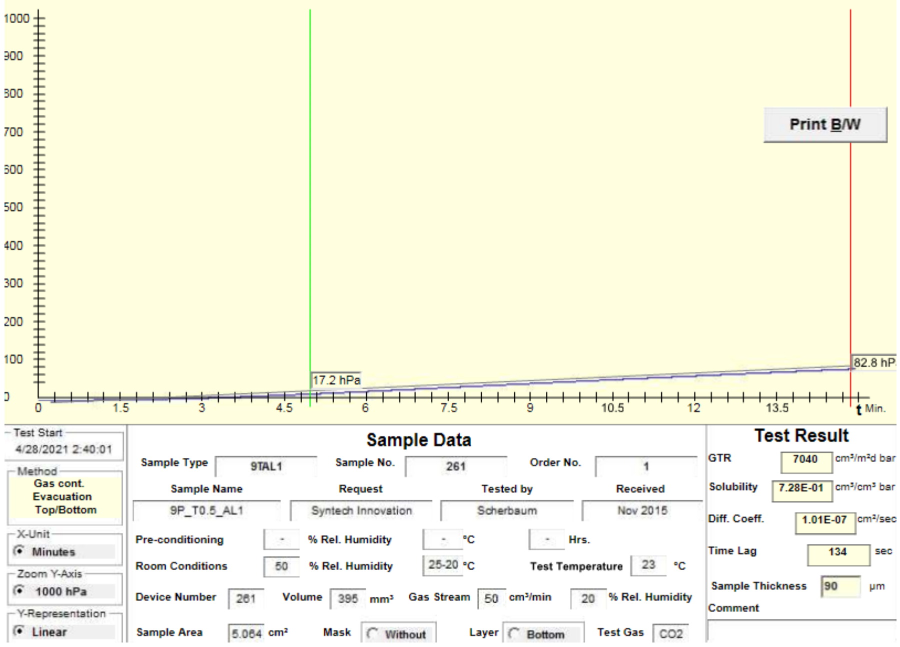
รูปที่ ก.41 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/AP1



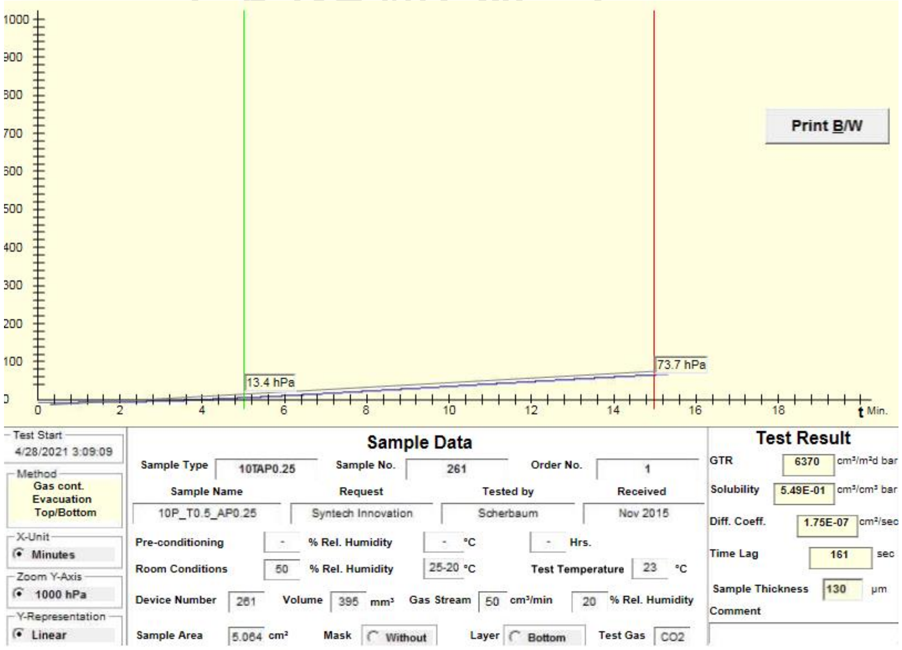
รูปที่ ก.42 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.5/AL0.25



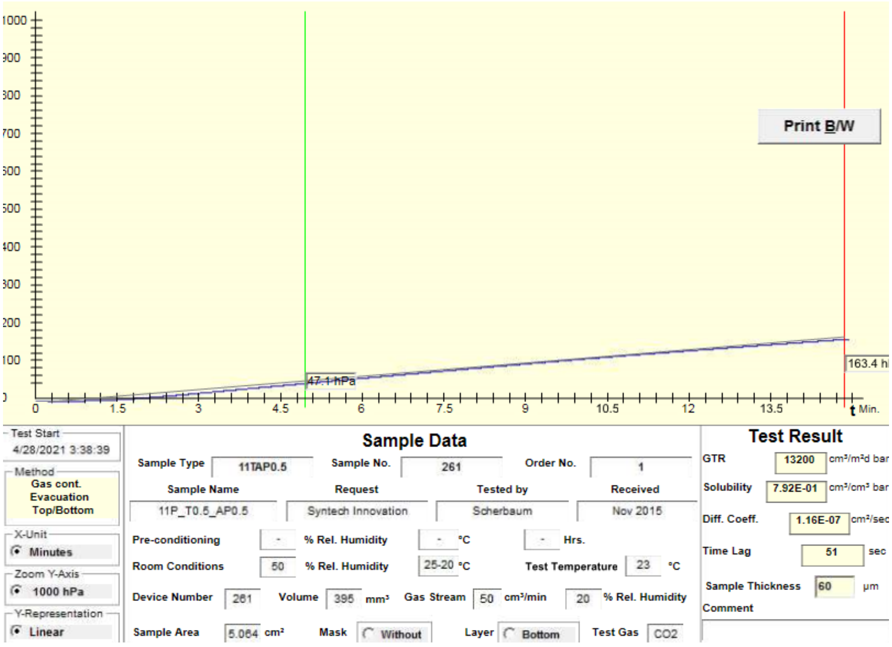
รูปที่ ก.43 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.5/AL0.5



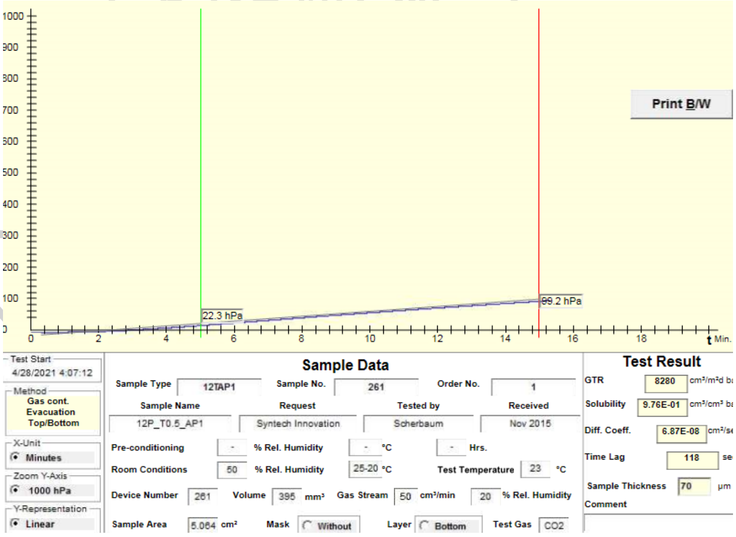
รูปที่ ก.44 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.5/AL1



รูปที่ ก.45 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.5/AP0.25



รูปที่ ก.46 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.5/AP0.5



รูปที่ ก.47 อัตราการซึมผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์ม PBAT/T0.5/AP1

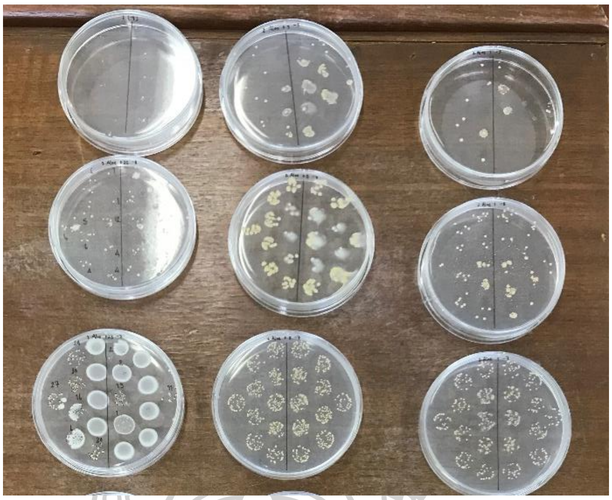
ก-5 ผลการศึกษาความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ (Radical scavenging activity)

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความสามารถในการต้านสารอนุมูลอิสระ (Radical scavenging activity)

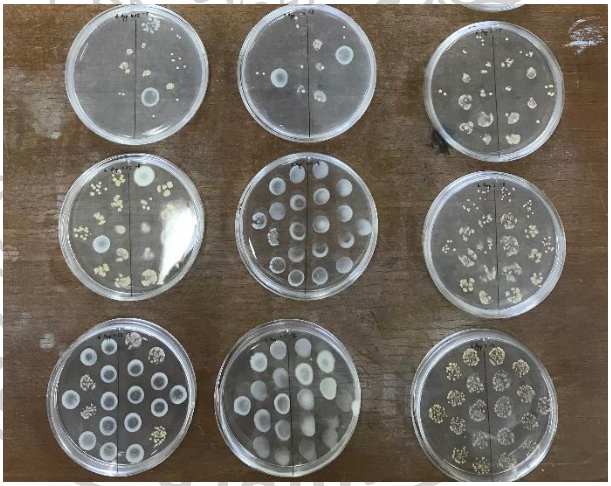
Sample	DPPH (% Inhibition)				Mean	S.D.
	1	2	3	4		
Aloe vera Extract	37.13	33.79	33.53	35.72	35.04	1.47
Apple Extract	93.41	93.56	93.52	93.42	93.48	0.06
Neat PBAT	0.00	0.00	0.00	-	0.00	0.00
PBAT/AL0.25	25.60	21.80	20.36	-	22.59	2.21
PBAT/AL0.5	25.31	22.34	22.35	-	23.33	1.40
PBAT/AL1	26.24	24.26	-	-	25.25	0.81
PBAT/AP0.25	52.79	57.95	57.07	-	55.94	2.25
PBAT/AP0.5	70.16	65.80	64.24	-	66.73	2.51
PBAT/AP1	87.47	86.15	85.82	-	86.48	0.71
PBAT/T0.5/AL0.25	25.82	24.91	22.93	-	24.55	1.21
PBAT/T0.5/AL0.5	34.35	32.38	31.43	31.56	32.41	1.17
PBAT/T0.5/AL1	31.03	32.54	33.44	33.54	32.64	1.01
PBAT/T0.5/AP0.25	85.78	85.10	85.05	84.77	85.18	0.37
PBAT/T0.5/AP0.5	91.00	90.32	89.83	89.67	90.21	0.52
PBAT/T0.5/AP1	93.13	93.20	93.42	93.47	93.31	0.14

มหาวิทยาลัยศิลปากร

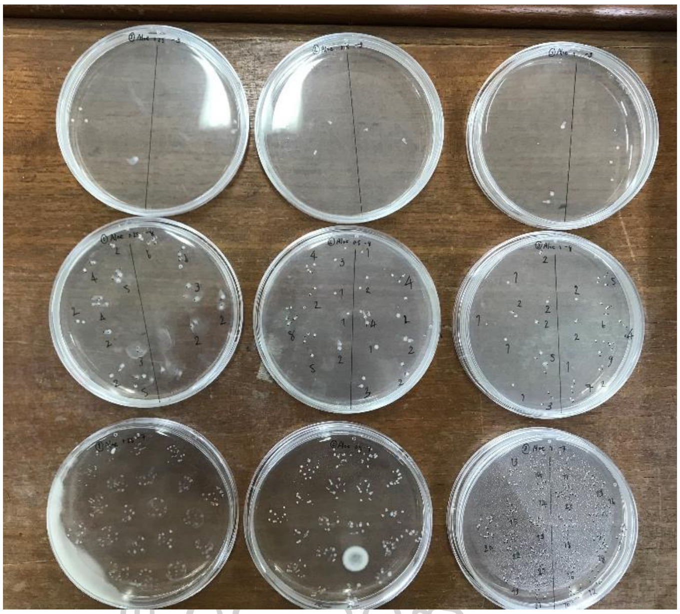
ก-6 ผลการศึกษาการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย



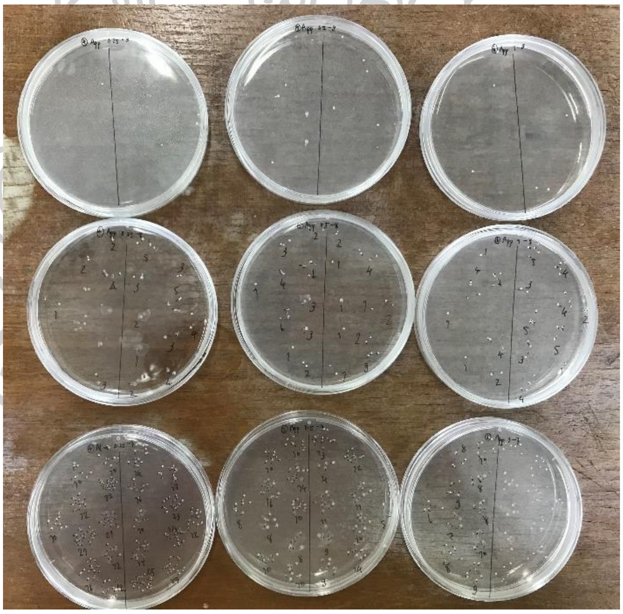
รูปที่ ก.48 อัตราการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย S.aureus ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม AL 0.25, 0.50 และ 1.00 phr



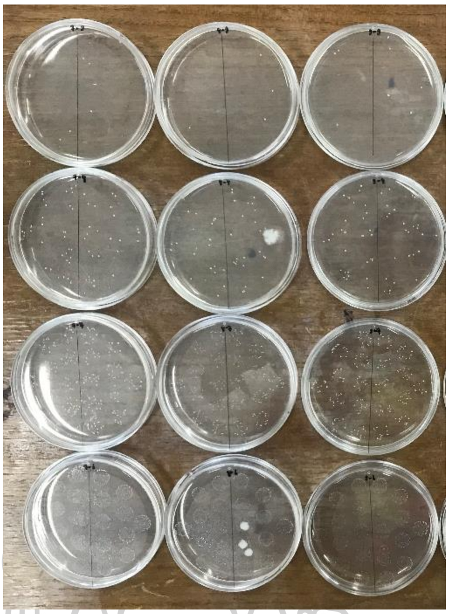
รูปที่ ก.49 อัตราการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย S.aureus ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม AP 0.25, 0.50 และ 1.00 phr



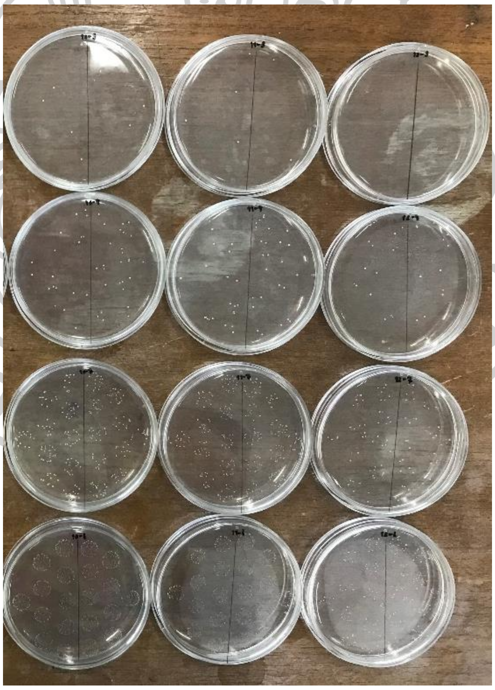
รูปที่ ก.50 อัตราการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.coli ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม AL 0.25, 0.50 และ 1.00 phr



รูปที่ ก.51 อัตราการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.coli ของฟิล์ม PBAT ที่มีการเติม AP 0.25, 0.50 และ 1.00 phr



รูปที่ ก.52 อัตราการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.coli ของฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติม AL 0.25, 0.50 และ 1.00 phr



รูปที่ ก.53 อัตราการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย E.coli ของฟิล์ม PBAT/T0.5 ที่มีการเติม AP 0.25, 0.50 และ 1.00 phr

ภาคผนวก ข

การคำนวณ

ข-1 การคำนวณปริมาณผลึกจากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC

การคำนวณปริมาณผลึก (Degree of crystallinity, X_c) คำนวณจากขั้นการให้ความร้อนครั้งที่ 2 สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{\Delta H_m^{\circ} \times \emptyset} \times 100\ \% \qquad \text{(สมการที่ 3.2)}$$

โดย X_c คือ ปริมาณผลึก (Degree of crystallinity)

ΔH_m คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมผลึกต่อหนึ่งหน่วย (J/g)

ΔH_{cc} คือ พลังงานความร้อนที่ทำให้เกิดผลึกต่อหนึ่งหน่วย (J/g)

ΔH_m° คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมผลึก 100% (J/g)

และ $\emptyset$ คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่อยู่ในคอมพอสิต

ตัวอย่าง การคำนวณปริมาณผลึกของ PBAT/T3

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณได้แก่ $\Delta H_{m\ (PBAT)}$ = 7.71 J/g, $\Delta H_m^{\circ}{}_{(PBAT)}$ = 114 J/g และ $\emptyset_{PBAT}$ = 0.97

$$X_c = \frac{7.71 - 0}{114 \times 0.97} \times 100\ \%$$

$$X_c = 6.97\ \%$$

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวก ค

การนำเสนอผลงานวิจัย

ภาคผนวก ค-1 การประชุมวิชาการระดับนานาชาติในงาน International Conference on Engineering and Industrial Technology 2020 (ICEIT 2020)

บันทึกรายงานการประชุม (Proceeding)

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

PAPER • OPEN ACCESS

Effect of titanium dioxide on the properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate) films

To cite this article: N. Anssanasuwan et al 2020 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **965** 012016

View the article online for updates and enhancements.

This content was downloaded by kiatkittipong_w from IP address 110.77.180.207 on 18/12/2020 at 03:11

International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT2020) IOP Publishing
IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **965** (2020) 012016 doi:10.1088/1757-899X/965/1/012016

Effect of titanium dioxide on the properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate) films

N. Arssanasuwan[1], P. Threepopnatkul[1,*] and A. Sittattrakul[1]

[1]Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom, 73000, Thailand

*Corresponding author: poonsubt@yahoo.com

Abstract. In this study, the effect of titanium dioxide (TiO_2) in poly(butylene adipate-co-terephthalate) was investigated. PBAT/TiO_2 biocomposite films containing different weight percentages (0.25, 0.5, 1 and 3 %w/w) of TiO_2 were prepared by mixing PBAT and TiO_2 in a twin screw extruder and thin films were prepared by cast film extruder. The thickness of each film is in the range of 50-90 micron. PBAT/TiO_2 biocomposite films were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy, X-Ray diffraction, Tensile testing, Scanning electron microscopy and Differential scanning calorimetry. Incorporating TiO_2 (0.25-1 %w/w) in PBAT matrix was found the Young's modulus and Tensile strength were increased while the addition of TiO_2 more than 1 %w/w (3 %w/w) exhibited lower Young's modulus and Tensile strength as a result of agglomeration of TiO_2 that was shown in SEM images. Thermal properties of biocomposite films showed the percent of crystallinity increased by increasing TiO_2 concentration up to 1 %w/w. Moreover, addition of TiO_2 concentration up to 3 %w/w the percentage of crystallinity was decreased probably as a result of agglomeration of TiO_2 that affected on crystallization of PBAT/TiO_2 biocomposite films.

1. Introduction

In the present, packagings are widely use in food and postharvest industry. After use, it produces garbage problem because it is not biodegradable. Therefore, in many countries including Thailand have idea to use biodegradable polymer as packaging material. Such as poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) that provides many advantages whether biodegradable, ductile, highly flexible like LDPE and good film-forming ability [1]. In addition, many researchers had investigated the effect of filler in PBAT matrix for improving the properties of polymer for better application in the field of packaging. For example, incorporation of organoclay [2], zinc oxide (ZnO) [3] and titanium dioxide (TiO_2) in PBAT was investigated by Raja Venkatesan et al. [4]. Raja Venkatesan et al. studied the effect of adding TiO_2 for improving the mechanical properties of PBAT. The results showed that the mechanical properties of PBAT films were improved by increasing TiO_2 concentration. However, films were prepared by solvent casting method. In this research, were investigated the PBAT/TiO_2 biocomposite films that were prepared by cast film extrusion. Furthermore, TiO_2 is a photocatalyst and is useful as ethylene scavenging and antimicrobial agent which is supported by the research of Ubonrat Siripatrawan et al. [5] that find the chitosan film which is incorporated with TiO_2 can exhibit ethylene photodegradation and antimicrobial activity against Gram positive, Gram negative bacteria and fungi and also according to the research of Raja Venkatesan et al.[4] that incorporated TiO_2 in PBAT matrix which they found the TiO_2 could exhibit antimicrobial activity against Gram positive and Gram negative.

Content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 licence. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.
Published under licence by IOP Publishing Ltd

International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT2020) IOP Publishing
IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 965 (2020) 012016 doi:10.1088/1757-899X/965/1/012016

The aim of this research is to develop PBAT/TiO_2 biodegradable films for food packaging by cast film extrusion and investigate the effect of TiO_2 on mechanical, morphological and thermal properties of PBAT matrix.

2. Experimental

The PBAT (Ecoflex® F blend C1200) was purchased from BASF SE. Titanium dioxide (anatse, -325 mesh) was purchased from SIGMA-ALDRICH, Co., Canada

PBAT/TiO_2 biocomposite films were prepared by mixing TiO_2 in different weight percentages (0.25, 0.5, 1 and 3 %w/w) and mixing with PBAT by twin screw extruder which obtained extrudate. Extrudate was cut to pellet and prepared thin films by cast film extruder. The thickness of each film is in range of 50-90 micron.

PBAT/TiO_2 biocomposite films were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) (NICOLET, Impact). X-ray diffraction (XRD) (SHIMADZU, Lab X, XRD 6100). Mechanical properties of films were performed by Universal Testing Machine according to ASTM D882 (Instron Corp.). Scanning electron microscopy (SEM, Mira3 TESCAN) was performed to observe microstructure of films which was prepared by immersed film in liquid nitrogen and subtract it to crack and sputtered coated with Pd/Au. Thermal properties of films were performed by differential scanning calorimetry (DSC) (TGA/DSC1, Mettler Toledo) under nitrogen atmosphere.

3. Results and discussion

3.1. Fourier transform infrared spectroscopy

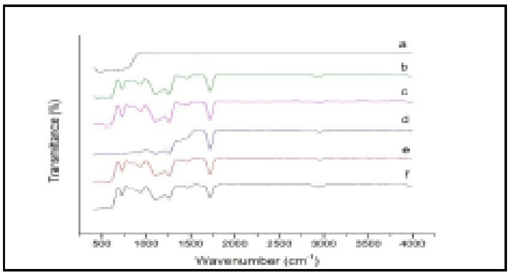


Figure 1. FTIR Spectra of a) TiO_2 powder and PBAT/TiO_2 biocomposite films containing different weight percentage of TiO_2 b) 0%, c) 0.25%, d) 0.5%, e) 1% and f) 3%w/w

Fourier transform infrared spectra of TiO_2 and PBAT/TiO_2 biocomposite films are shown in Figure 1. TiO_2 powder in Figure 1a) shows peak in range of 720-530 cm^{-1} correspond to bending vibration of Ti-O-Ti in TiO_2 structure [5]. Peak observed at 650 cm^{-1} is attributed to Ti-O vibration [4]. Peak of neat PBAT film is given in Figure 1b). Peak in range of 3200-2700 cm^{-1} is attributed to -OH stretching. The carbonyl groups C=O of ester linkage presented peak around 1730-1715 cm^{-1}. Two peaks of benzene substitute were located at 700 and 900 cm^{-1} [4]. FTIR spectra of PBAT/TiO_2 biocomposite films containing difference weight percentage of TiO_2 were shown in Figure 1c) - f). PBAT/TiO_2 biocmposite films show the similar peaks as neat PBAT but the peak shown at 1029 cm^{-1} indicates bending vibration of Ti-O-C which suggests that is the present of TiO_2 in PBAT matrix [5]. The peak at 1163 cm^{-1} is

International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT2020) IOP Publishing
IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 965 (2020) 012016 doi:10.1088/1757-899X/965/1/012016

attributed to C-O-C stretching might be caused by interaction between -OH groups of PBAT and Titanium [5].

3.2. X-ray diffraction

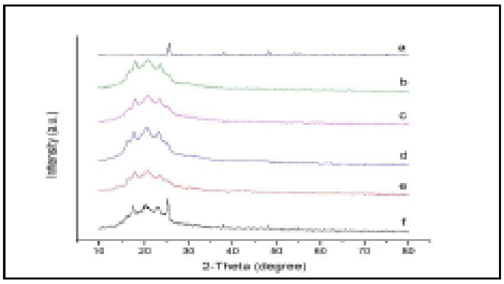


Figure 2. XRD pattern of a) TiO_2 powder and PBAT/TiO_2 biocomposite films containing different weight percentage of TiO_2 b) 0% c) 0.25% d) 0.5% e) 1% and f) 3%

The XRD patterns of TiO_2 powder and PBAT/TiO_2 biocomposite films are presented in Figure 2. The XRD pattern of TiO_2 powder shows in Figure 2a) that represented the crystalline peak at 25.3°, 38° and 48° correspond to the crystal plane of (101), (004) and (200) respectively [4]. Peak of neat PBAT film is given in Figure 2b) show a broad peak approximately 18.1° and 20.3° correspond to amorphous structure of PBAT [4]. Figure 2c) - f) show XRD patterns of PBAT/TiO_2 biocomposite films containing different weight percentages of TiO_2. Neat PBAT film and film containing lower amount of TiO_2 (0.25%w/w) represent crystalline peak approximately 17.8° suggestion that is the present of plane (101) which is the plane of orthorhombic of PBAT. The evidenced peaks at 25.3°, 38° and 48° were observed when increasing TiO_2 concentration (0.5-3 %w/w) that attributed the plane of (101), (004) and (200) respectively. In addition, the intensity of these peaks was increased when increasing TiO_2 concentration [4].

3.3. Mechanical properties

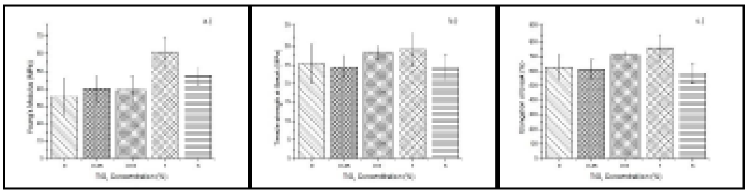


Figure 3. Mechanical properties of Neat PBAT and PBAT/TiO_2 biocomposite films containing different weight percentage of TiO_2 a.) Young's Modulus, b.) Tensile Strength and c.) Elongation at Break

International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT2020) IOP Publishing
IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **965** (2020) 012016 doi:10.1088/1757-899X/965/1/012016

The Young's modulus, tensile strength and elongation at break of neat PBAT and PBAT/TiO_2 biocomposite films are shown in Figure 3. Young's modulus and tensile strength of neat PBAT and PBAT/TiO_2 biocomposite films have the similar trend. Young's modulus and tensile strength of films increased with increasing TiO_2 concentration (0.25-1 %w/w) and then decreased at 3 %w/w of TiO_2. Because at 0.25-1 %w/w of TiO_2 concentration, TiO_2 could uniformly disperse in PBAT matrix and act as reinforcing agent in PBAT films. But the increase of TiO_2 concentration up to 3 %w/w, TiO_2 tended to agglomerate probably due to decreasing distance between particles [5]. The decrease of Young's modulus and tensile strength was due to the agglomerates of excess TiO_2 as presented in cross section of films in SEM images that maybe disrupt the PBAT chain. Elongation at break of films are shown in Figure 3c). Elongation at break of films containing TiO_2 at 0.25 %w/w was lower than neat PBAT film. However, elongation at break increased when increasing of TiO_2 concentration up to 1 %w/w and decreased when increasing of TiO_2 concentration to 3 %w/w.

3.4. Scanning electron microscopy

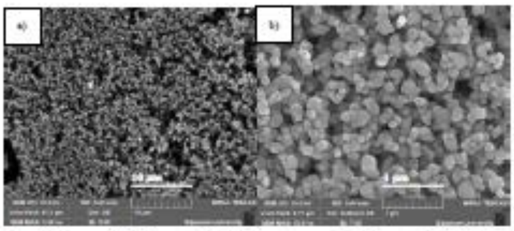


Figure 4. Morphology of TiO_2 powder at different magnification. a) 5000X and b) 50000X

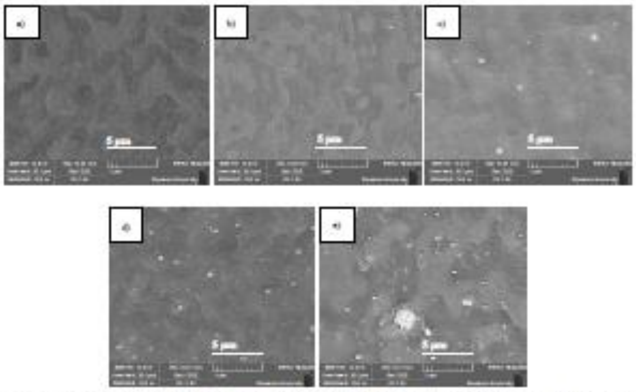


Figure 5. Morphology of PBAT/TiO_2 biocomposite films containing different weight percentage of TiO_2 at 10000X a) 0% b) 0.25% c) 0.5% d) 1% and e) 3%

International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT2020) IOP Publishing
IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **965** (2020) 012016 doi:10.1088/1757-899X/965/1/012016

The morphology of TiO_2 powder is shown in Figure 4. TiO_2 powder has good dispersion and the size is in the range of 0.1-0.4 micron. The SEM images of PBAT/TiO_2 biocomposite films containing different weight percentage of TiO_2 are depicted in Figure 5. Neat PBAT film in Figure 5a) shows the smooth surface. When increasing of TiO_2 concentration at 0.25-1 %w/w, TiO_2 can uniformly disperse in PBAT matrix which are shown in Figure 5b) - d). But the film containing 3 %w/w of TiO_2 is shown in the Figure 5e) exhibits the large cluster of agglomerated TiO_2 powder [4]. The TiO_2 agglomeration can affect the properties of these films.

3.5. Thermal properties

Table 1. Thermal properties from DSC of neat PBAT and PBAT/TiO_2 biocomposite films

Sample	T_m (C)	Tc (C)	ΔH_m	X_C (%)
Neat PBAT	124.72	87.20	5.86	5.14
PBAT/TiO_2 0.25%	124.64	86.62	7.77	6.83
PBAT/TiO_2 0.5%	125.45	88.04	8.03	7.08
PBAT/TiO_2 1%	125.05	88.54	8.18	7.25
PBAT/TiO_2 3%	125.03	86.96	7.71	6.97

Thermal properties of neat PBAT and PBAT/TiO_2 biocomposite films are shown in Table 1. The melting temperature and percent of crystallinity of neat PBAT film is 124.72 °C and 5.14 % respectively. An addition of TiO_2 concentration at 0.25-3 %w/w found that the melting temperature of the films were 124.64, 125.45, 125.05 and 125.03 °C. Percent of crystallinity of PBAT/TiO_2 biocomposite films containing TiO_2 concentration at 0.25-3 %w/w were 6.83, 7.08, 7.25 and 6.97% respectively and confirmed that TiO_2 act as nucleating agent in PBAT matrix which supported by the research of Alois Karl Schlarb et al. that TiO_2 acts as an efficient nucleating agent for PLA [6]. Melting temperature of neat PBAT and PBAT/TiO_2 biocomposite films have the similar values but percent of crystallinity of PBAT/TiO_2 biocomposite films was increased when increasing of TiO_2 concentration. In addition, percent of crystallinity of the film that contains TiO_2 at 3 %w/w is decreased probably due to agglomeration of TiO_2 that affects on crystallization of PBAT/TiO_2 biocomposite films.

4. Conclusion

PBAT/TiO_2 biocomposite films were prepared by cast film extrusion. The properties of biocomposite films were characterized by FTIR, XRD, Tensile testing, SEM and DSC. Incorporation of TiO_2 in PBAT matrix in the range of 0.25-1 %w/w was found to increase mechanical properties and thermal properties. Because TiO_2 were dispersed homogeneously in PBAT matrix that shown in SEM images. Percent of crystallinity is increased when increasing TiO_2 concentration. When adding of TiO_2 in excessive concentration (3 %w/w) was found to decrease mechanical properties and percent of crystallinity because the agglomeration of TiO_2 in the form of cluster made poor dispersion in PBAT matrix and hindered crystallization in biocomposite films.

5. Acknowledgement

This research was financially supported by the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University and National Research and Innovation Information System : NRIIS)

International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT2020) IOP Publishing
IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **965** (2020) 012016 doi:10.1088/1757-899X/965/1/012016

References

[1] Ferreira V F, Cividanes S L, Gouveia F R and Lona F M L 2019 *J. Polym Eng Sci.* **59** 7-15.
[2] Falcão G A M, Vitorino M B C, Almeida T G, Bardi M A G, Carvalho L H and Canedo E L 2017 *J. Polym Bull.* **74** 1-14.
[3] Venkatesan R. and Rajeswari N 2016 *J. Polym. Advan. Technol.* **28**
[4] Venkatesan R. and Rajeswari N 2017 *J. Polym. Advan. Technol.*
[5] Siripatrawan U and Kaewklin P 2018 *J. Food Hydrocoll.* **84** 125-134.
[6] Nomai, J, Suksut B, and Schlarb A K 2015 *J. Appl. Sci. Technol.* **8** 251-258.

รายการอ้างอิง

1. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, บทที่ *9* พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (*Polybutylene Adipate-co-Terephthalate).*
2. Falcão, G.A.M., et al., *PBAT/organoclay composite films: preparation and properties.* Polymer Bulletin, 2017. **74**(11): p. 4423-4436.
3. Venkatesan, R. and N. Rajeswari, *ZnO/PBAT nanocomposite films: Investigation on the mechanical and biological activity for food packaging.* Polymers for Advanced Technologies, 2017. **28**(1): p. 20-27.
4. Venkatesan, R. and N. Rajeswari, *TiO2 nanoparticles/poly(butylene adipate-co-terephthalate) bionanocomposite films for packaging applications.* 2017. **28**(12): p. 1699-1706.
5. Siripatrawan, U. and P. 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.
6. Online, M. เก็บรักษาผัก-ผลไม้สดให้นานขึ้นด้วย “บรรจุภัณฑ์ยืดอายุ” ผลงานนักเทคโนโลยีดีเด่นปี *48*. 2548 cited 4 June; Available from: https://mgronline.com /science/detail/9480000138653.
7. พรเฉลิมพงศ์, ผ.ด.พ. และ ศ.ด.น. รัตนาปนนท์. เอทิลีน / *ethylene*. cited 4 June; Available from: http://www.foodnetworksolution.com/wiki/ethylene.
8. สารต้านอนุมูลอิสระ กำจัดสารพิษ ทำให้อายุยืน ช่วยต้านมะเร็ง. cited 4 June; Available from: https://www.honestdocs.co/antioxidants-longevity.
9. พรเฉลิมพงศ์, ผ.ด.พ. และ ศ.ด.น. รัตนาปนท์. *Active packaging /* บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ cited 4 June; Available from: http://www.foodnetworksolution.com/wiki/ word/1887/active-packaging.
10. Xu, Y., et al., *Chitosan nanocomposite films incorporating cellulose nanocrystals and grape pomace extracts.* 2018. **31**(9): p. 631-638.
11. Gaikwad, K.K., J.Y. Lee, and Y.S. Lee, *Development of polyvinyl alcohol and apple pomace bio-composite film with antioxidant properties for active food packaging application.* Journal of Food Science and Technology, 2016. **53**(3): p.

1608-1619.

12. Sui Chin, S., F. Han Lyn, and Z.A. Nur Hanani, *Effect of Aloe vera (Aloe barbadensis Miller) gel on the physical and functional properties of fish gelatin films as active packaging.* Food Packaging and Shelf Life, 2017. **12**: p. 128-134.
13. UNIT, P.I., *Polybutyrate adipate terephthalate (PBAT).*
14. ไททาเนียมไดออกไซด์/TiO_2 และประโยชน์ไททาเนียมไดออกไซด์. cited 4 June; Available from: https://www.siamchemi.com.
15. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, ด.น.เ.ภ., ไทเทเนียมไดออกไซด์กับการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำ.
16. พรเฉลิมพงศ์, ผ.ด.พ. และ ศ.ด.น. รัตนาปนนท์. *Free radical /* อนุมูลอิสระ. cited 4 June; Available from:http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2254/free-radical.
17. เมยกลาง, เ. และ ด.เ. เรืองวิริยะชัย, การหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ.
18. พรเฉลิมพงศ์, ผ.ด.พ. และ ศ.ด.น. รัตนาปนนท์. *Antioxidant /* สารต้านออกซิเดชัน. cited 4 June; Available from: http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0188/antioxidant.
19. ไชยมุติ, ป. อนุมูลอิสระ (*Free radicals*). cited 4 June.
20. พรเฉลิมพงศ์, ผ.ด.พ. และ ศ.ด.น. รัตนาปนนท์. *Phenolic compounds /* สารประกอบฟีนอล. cited 4 June; Available from: http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/2585/phenolic-compound.
21. Boonjoong, S. ฟลาโวนอยด์ (*Flavonoids*). 2561 cited 25 June; Available from: http://st-chem-phytochemicals.blogspot.com/2018/12/test2.html.
22. พรเฉลิมพงศ์, ผ.ด.พ. และ ศ.ด.น. รัตนาปนนท์. *Polyphenol /* พอลิฟีนอล. cited 4 June; Available from: http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/3145/polyphenol.
23. พรเฉลิมพงศ์, ผ.ด.พ. และ ศ.ด.น. รัตนาปนนท์. *Anthocyanin /* แอนโทไซยานิน. cited 4 June; Available from: http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1103/anthocyanin.
24. สารสกัด เมล็ดองุ่น : *Powder*. cited 4 June; Available from: https://www.asianbioplex.com/shop/extracts-for-food/grape-seed-extract-powder.

25. Clinic, G. สารสกัดจากเมล็ดองุ่น (*Grape Seed Extract*). cited 4 June; Available from: http://www.greenclinic.in.th/grapeseed.html.

26. สารสกัด เปลือกมังคุด *: Powder*. cited 4 June; Available from:https://www.asianbioplex.com/shop/extracts-for-food/mangosteen-powder.

27. *Mangostin*. cited 4 June; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Mangostin.

28. PubChem. *Mangostenol*. cited 4 June; Available from: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5495927.

29. Faces, C. *1-Isomangostin*. cited 4 June; Available from:http://www.chemfaces.com/natural/1-Isomangostin-CFN95114.html.

30. มหาวิทยาลัยมหิดล, ห.ณ.ส.ค. มังคุด. cited 4 June; Available from: http://www.medplant.mahidol.ac.th/pubhealth/garcinia.html.

31. *Chemical structure of (a) hydrolysable tannin (HT) and (b) condensed tannin*. [cited 4 June; Available from: https://www.researchgate.net/figure/Chemical-structure-of-a-hydrolysable-tannin-HT-and-b-condensed-tannin-CT-when-R_fig8_263060113.

32. สารสกัด ชาเขียว : *Powder*. cited 4 June; Available from: https://www.asianbioplex.com/shop/extracts-for-food/green-tea-extract-powder.

33. *Epigallocatechin gallate*. cited 4 June; Available from:https://en.wikipedia.org/wiki/Epigallocatechin_gallate.

34. *Catechin Standards*. cited 4 June; Available from: https://labchem-wako.fujifilm.com/asia/category/00413.html.

35. สารสกัด แอปเปิ้ล : *Powder*. cited 4 June; Availablefrom:https://www.asianbioplex.com/shop/extracts-for-food/apple-extract-powder.

36. *Catechin*. cited 4 June; Available from:https://en.wikipedia.org/wiki/Catechin.

37. *Gallic acid*. cited 4 June; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Gallic_acid.

38. *Phloretin*. cited 4 June; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Phloretin.

39. *Quercetin*. cited 4 June; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Quercetin.

40. *Aloe Vera Gel Spray Dried Powder*. cited 15 April; Available from: https://www.asianbioplex.com/shop/extracts-for-food/aloe-vera-extract-powder.

41. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, ฐ.ค. ว่านหางจระเข้. cited 15 April; Available from: http://www.phargarden.com/main.php?action=viewpage&pid=281.

42. Sigma-Aldrich. *Aloin*. cited 15 April; Available from:https://www.sigmaaldrich.com /catalog/product/sigma/b6906?lang=en&region=TH.

43. Nabilah, B., et al., *Effect of Mangosteen (Garcinia mangostana L.) Pericarp Extract on the Different Carriers for Antioxidant Active Packaging Films.* Journal of Packaging Technology and Research, 2019.

44. Siripatrawan, U. and B.R. Harte, *Physical properties and antioxidant activity of an active film from chitosan incorporated with green tea extract.* Food Hydrocolloids, 2010. **24**(8): p. 770-775.

45. Feng, S., et al., *Physico-Mechanical and Antibacterial Properties of PLA/TiO2 Composite Materials Synthesized via Electrospinning and Solution Casting Processes.* Coatings, 2019. **9**: p. 525.

46. Nomai, J., B. Suksut, and A. Schlarb, *Crystallization Behavior of Poly(lactic acid)/Titanium Dioxide Nanocomposites.* KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology, 2015. **8**: p. 251-258.

47. Wang, X.-B. and W.-M. Liu, *Nanoparticle-Based Lubricant Additives*, in *Encyclopedia of Tribology*, Q.J. Wang and Y.-W. Chung, Editors. 2013, Springer US: Boston, MA. p. 2369-2376.

48. Threepopnatkul, P., et al., *Effect of Zeolite on Mechanical and Barrier Properties of PBAT Films for Life Extension of Agricultural Products.* Key Engineering Materials, 2020. **861**: p. 176-181.

49. Sigma-aldrich. *Molecular Sieves Technical Information Bulletin*. cited 15 April Available from :https://www.sigmaaldrich.com/TH/en/technical-documents /technical-article/chemistry-and-synthesis/reaction-design-and-optimization/molecular-sieves.

50. B.Wasutorn, การเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนซักซีเนต. 2020.

51. Kamarulzaman, N., M.F. Kasim, and R. Rusdi, *Band Gap Narrowing and Widening of ZnO Nanostructures and Doped Materials.* Nanoscale Research Letters, 2015. **10**(1): p. 346.

52. Raksina, P., การศึกษาผลของซีโอไลต์ต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิแลกติกแอซิด. 2020.

53. Riaz, A., et al., *Preparation and characterization of chitosan-based antimicrobial active food packaging film incorporated with apple peel polyphenols.* International Journal of Biological Macromolecules, 2018. **114**.

54. บุญเลิศ, อ. รายงานสรุปเนื้อหาและการนำไปใช้ประโยชน์จากการเข้าร่วมการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปี *2561*. 4 January 2019 [cited 17 June; Available from: https://erp.mju.ac.th/acticleDetail.aspx?qid=910.

55. เบญจมาศ หนูแป้น, et al., สารพฤกษเคมีและฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของสารสกัดจากใบราน้ำ *Phytochemical and Antibacterial Studies of the Crude Leaves' Extract from Limnophila rugosa (Roth) Merr.* Songklanakarin Journal of Plant Science, 2016. **3**: p. 26-33.

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐนรี อาศนสุวรรณ์
วัน เดือน ปี เกิด	23 กรกฎาคม 2538
สถานที่เกิด	จังหวัด ราชบุรี
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	30/2 ม. 5 ต. เจดีย์หัก อ. เมือง จ. ราชบุรี 70000
ผลงานตีพิมพ์	Natnaree Arssanasuwan, Poonsub Threepopnatkul and Amnard Sittattrakul "Effect of titanium dioxide on the properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate) films" International Conference on Engineering and Industrial Technology (ICEIT 2020), The ZIGN Hotel Pattaya, Chonburi, Thailand 11-13 September, 2020
รางวัลที่ได้รับ	พ.ศ. 2561-2562 (4 ภาคการศึกษา) ได้รับทุนการศึกษาและทุนนักศึกษาผู้ช่วยสอน จากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2563-2564 ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

มหาวิทยาลัยศิลปากร