



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปริญญา

เทคโนโลยีการบรรจุ

เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง फिल्मต้านจุลินทรีย์จากพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์
สำหรับต้นแบบถุงระบายปัสสาวะ

Anti-microbial Film from Nano Titanium Dioxide Based Polypropylene/
Poly(Lactic Acid) Blend for Urine Drainage Bag Prototype

نامผู้วิจัย นางสาวนลิน พลอยเพชร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชิราวุฒิ เพชรเย็น, วท.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ภาณุวัฒน์ สรรพกุล, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ดวงเดือน อางงค์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญารัตน์ จิฎกานนท์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ฟิล์มต้านจุลินทรีย์จากพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์
สำหรับต้นแบบถุงระบายปัสสาวะ

Anti-microbial Film from Nano Titanium Dioxide Based
Polypropylene/Poly(Lactic Acid) Blend for Urine Drainage Bag Prototype

โดย

นางสาวนลิน พลอยเพชร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

พ.ศ. 2557

นลิน พลอยเพชร 2557: फिल्मด้านจุลินทรีย์จากพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโน
ไททาเนียมไดออกไซด์สำหรับต้นแบบถุงระบายปัสสาวะ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
(เทคโนโลยีการบรรจุ) สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชีราวุฒิ เพชรเย็น, วท.ด. 105 หน้า

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยสองส่วนซึ่งประกอบด้วยการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม และการศึกษาอิทธิพลของปริมาณนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มนาโนคอมพอสิต การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมกับฟิล์มนาโนคอมพอสิตถูกขึ้นรูปผ่านกระบวนการผสมแบบหลอมเหลวและการอัดรีดขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม ในระบบพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดมีการใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้เพื่อปรับปรุงความเข้ากันระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด เมื่อปริมาณของพอลิแลคติกแอซิดเพิ่มขึ้นร้อยละ 40 ถึง 60 โดยน้ำหนักทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวและความเป็นผลึกลดลงจาก 158 ถึง 154 องศาเซลเซียส และร้อยละ 38 ถึง 31 ตามลำดับ สำหรับสมบัติการต้านทานต่อแรงดึงพบว่าค่ามอดุลัสและค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของพอลิแลคติกแอซิดมากขึ้น ในขณะที่การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลง สมบัติการสกัดกันซีให้เห็นว่าการเติมพอลิแลคติกแอซิดในพอลิโพรพิลีนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ ในขณะที่สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนมีค่าลดลง จากสมบัติทางสัณฐานวิทยา ความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติการสกัดกันพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์คือ พอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดในอัตราส่วนเท่ากับ 50:50 ในกรณีของฟิล์มนาโนคอมพอสิตพบว่า สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จนถึง 1 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละส่วนของเรซิน และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณอนุภาคนาโนมากกว่า 1 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละส่วนของเรซิน แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของสมบัติการสกัดกันเมื่อมีการเติมอนุภาคนาโนในปริมาณมากขึ้น ผลจากการทดสอบคุณสมบัติการต้านจุลินทรีย์แสดงให้เห็นว่าฟิล์มนาโนคอมพอสิตมีประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์ที่ต่ำ

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Nalin Ploypetchara 2014: Anti-microbial Film from Nano Titanium Dioxide Based Polypropylene/Poly(Lactic Acid) Blend for Urine Drainage Bag Prototype. Master of Science (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging and Materials Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Chiravoot Pechyen, Ph.D. 105 pages.

This study consists of two main parts including investigation of polypropylene (PP)/poly (lactic acid) (PLA) weight ratios affect to the properties of blend films and influence of nano titanium dioxide content on the properties of nano composite films. Fabrication of blend films and nanocomposite films were performed by melt mixing technique and cast film extrusion. In PP/PLA blend system, polypropylene-grafted-maleic anhydride was required as a compatibilizer to improve the miscibility between PP and PLA. Increasing of PLA content from 40 to 60 wt.% resulting in decreased melting temperature and crystallinity from 158 °C to 154 °C and 38% to 31%, respectively. For tensile properties, modulus and tensile strength increased with increasing the PLA content, while elongation at break was decreased. The barrier properties indicated that incorporation of PLA into PP tend to increased water vapor permeability while oxygen permeability was decreased. From the morphology, thermal, mechanical, and barrier results, the optimal blend ratio for medical packaging application was PP/PLA blend 50:50. In case of nanocomposite films, thermal and mechanical properties were improved by adding of nano titanium dioxide at up to 1 phr, and decreased at more than 1 phr. Nevertheless, there were no significant changes in barrier properties with increase of nanoparticles loading. The results of anti-microbial testing showed that nanocomposite films have low anti-microbial activity.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีราวุฒิ เพชรเย็น อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก เป็นอย่างยิ่งที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ แนวคิดในการดำเนินวิทยานิพนธ์การแก้ปัญหาอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยและการเขียนวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ภาณุวัฒน์ สรรพกุล และ ดร. ดวงเดือน อางองค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมทั้งสองท่าน ที่ให้คำแนะนำในการทำวิจัยและเวลาสำหรับการสอบวิทยานิพนธ์ และกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธาริณี นามพิชญ์ ประธานการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชิตชนก มีใจเชื้อ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก อาจารย์จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง ที่ได้สละเวลาอันมีค่า สำหรับการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ รวมถึงข้อเสนอแนะและแนวคิดต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อ วิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งให้แก่ข้าพเจ้า ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคณะอุตสาหกรรมเกษตรทุกท่านที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการดำเนินงาน และขอบคุณ เพื่อน ร่วมถึงรุ่นพี่ รุ่นน้องทุกคน ที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากโครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรม (NSTDA University Industry Research Collaboration, NUI-RC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อการตีพิมพ์ผลงานในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ ประจำปีงบประมาณ 2555 สำหรับนิสิตที่เข้าศึกษาภาคต้น ปีการศึกษา 2555 และทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2557 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา ที่ได้อบรม ให้ความรัก และกำลังใจผู้วิจัยตลอดมา จนประสบความสำเร็จในทุกวันนี้

นลิน พลอยเพชร

กรกฎาคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	35
อุปกรณ์	35
วิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	40
สรุปและข้อเสนอแนะ	64
สรุป	64
ข้อเสนอแนะ	67
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	68
ภาคผนวก	78
ภาคผนวก ก การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด และฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโน ไททาเนียมไดออกไซด์	79
ภาคผนวก ข การทดสอบและวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคนาโนไททาเนียมได ออกไซด์ ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด และฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโน ไททาเนียมไดออกไซด์	82
ภาคผนวก ค การทดสอบสมบัติทางกายภาพของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด และฟิล์ม นาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททา เนียมไดออกไซด์	84

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ง การทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด และฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์	87
ภาคผนวก จ การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดและฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์	90
ภาคผนวก ฉ การทดสอบสมบัติการสกัดกันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดและฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์	92
ภาคผนวก ช การทดสอบสมบัติการต้านจุลินทรีย์ของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์	96
ภาคผนวก ซ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	100
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	104

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความเหมาะสมของกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อสำหรับการใช้งานในพลาสติก	8
2	จุลินทรีย์ก่อโรค (pathogen) ที่พบบ่อยในการติดเชื้อระบบทางเดินปัสสาวะ	13
3	ตัวอย่างการนำสารต้านจุลินทรีย์มาใช้ในการผลิตถุงระบายปัสสาวะ	14
4	แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด	37
5	แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์	38
6	สมบัติทางความร้อนของฟิล์มตัวอย่างจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี	44
7	เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม	46
8	แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์	50
9	โครงสร้างผลึกขององค์ประกอบในฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์	56
10	สมบัติทางความร้อนของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสม	57
11	เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสม	68
12	การศึกษาสมบัติการต้าน <i>Enterococcus faecalis</i> ของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสม	62
13	การศึกษาสมบัติการต้าน <i>Escherichia coli</i> ของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสม	62

ตารางผนวกที่

ง1	สภาวะการทดสอบด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี	88
ฉ1	ค่ามอดุลัส ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าร้อยละในการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด	101
ฉ2	สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนและสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด	101

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ฉ3 ค่ามอดุลัส ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าร้อยละในการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์ม นาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์	102
ฉ4 สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนและสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มนาโน คอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์	102

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 แสดงปริมาณการใช้งานของวัสดุชนิดต่างๆ สำหรับบรรจุภัณฑ์ปลอดเชื้อทางการแพทย์ในปี ค.ศ. 2007	12
2 ลักษณะโครงสร้างของพอลิโพรพิลีน	14
3 เส้นทางการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด	17
4 วัฏจักรของพอลิแลคติกแอซิด	18
5 สมบัติของพอลิเมอร์ผสม	19
6 มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้	21
7 กลไกการต้านจุลินทรีย์ของไททาเนียมไดออกไซด์	23
8 กระบวนการผลิตที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกสำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์ ปี พ.ศ. 2554 จากการสำรวจผู้ประกอบการพลาสติกจำนวน 12 ราย	25
9 การผลิตแผ่นฟิล์มด้วยการอัดรีดขึ้นรูป	26
10 พูรีयरทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด (ก) PP (ข) PLA (ค) PP/PLA (60:40) (ง) PP/PLA (50:50) และ (จ) PP/PLA (40:60)	40
11 พูรีयरทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด ในช่วงเลขคลื่นเท่ากับ $1800-1700 \text{ cm}^{-1}$ (ก) PP (ข) PLA (ค) PP/PLA (60:40) (ง) PP/PLA (50:50) และ (จ) PP/PLA (40:60)	41
12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องแสดงลักษณะทางพื้นผิว (ภาพซ้าย) และภาคตัดตามยาว (ภาพขวา) ของฟิล์มตัวอย่าง (ก) PP (ข) PLA (ค) PP/PLA (60:40) (ง) PP/PLA (50:50) และ (จ) PP/PLA (40:60)	42
13 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มตัวอย่าง (ก) PP (ข) PLA (ค) PP/PLA(60:40) (ง) PP/PLA (50:50) และ (จ) PP/PLA (40:60)	43
14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาสเฟียรูไลท์ของฟิล์มตัวอย่าง (ก) PP (ข) PP/PLA (60:40) (ค) PP/PLA (50:50) และ (ง) PP/PLA (40:60)	43
15 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของฟิล์มตัวอย่าง (ก) PP (ข) PLA (ค) PP/PLA (60:40) (ง) PP/PLA (50:50) และ (จ) PP/PLA (40:60)	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
16 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิโพรพิลีน พอลิแลคติกแอซิด และพอลิโพรพิลีน กราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์	46
17 ค่ามอดุลัสของยังและค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มตัวอย่าง	47
18 ค่าร้อยละในการยืดตัว ณ จุดขาด ของฟิล์มตัวอย่าง	47
19 ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนและค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์ม ตัวอย่าง	48
20 เฟสไดอะแกรม (phase diagrams) ในระบบที่มีพอลิเมอร์ 2 ชนิด	49
21 พูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์	51
22 พูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/ พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (ก) 0TiO_2 (ข) 0.25TiO_2 (ค) 0.5TiO_2 (ง) 1.0TiO_2 (จ) 1.5TiO_2 และ (ฉ) 2.0TiO_2	51
23 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์	52
24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะทางพื้นผิว (ภาพ ซ้าย) และภาคตัดตามยาว (ภาพขวา) ของฟิล์มนาโนคอมพอสิต (ก) 0TiO_2 (ข) 0.25TiO_2 (ค) 0.5TiO_2 (ง) 1.0TiO_2 (จ) 1.5TiO_2 และ (ฉ) 2.0TiO_2	53
25 การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคนาโน	54
26 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์	55
27 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์	56
28 ค่ามอดุลัสของยังและความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสม พอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์	59
29 ค่าร้อยละในการยืดตัว ณ จุดขาด ของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/ พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์	59
30 สมบัติการสกัดกันของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐาน นาโนไททาเนียมไดออกไซด์	60
31 แถบช่องว่างระหว่างชั้นพลังงานของรูปผลึกไททาเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช (pH) เท่ากับ 7	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 แผนผังแสดงขั้นตอนการวิจัย	81
จ1 ตัวอย่างชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกล	91
ฉ1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นกับเวลา	94
ช1 แสดงวิธีการทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/ พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการต้านเชื้อจุลินทรีย์	99

ฟิล์มต้านจุลินทรีย์จากพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียม

ไดออกไซด์สำหรับต้นแบบถุงระบายปัสสาวะ

Anti-microbial Film from Nano Titanium Dioxide Based
Polypropylene/Poly(Lactic Acid) Blend for Urine Drainage Bag

Prototype

คำนำ

ในปัจจุบันบรรจุภัณฑ์ได้เข้ามามีบทบาทต่อการค้าและการบริการเป็นอย่างมาก โดยมีหน้าที่ในการรักษาคุณภาพ ปกป้องสินค้า ให้ความสะดวกในเรื่องการขนส่ง และการจัดเก็บ อีกทั้งยังเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับการส่งเสริมทางด้านการตลาด ซึ่งบรรจุภัณฑ์นั้นได้เข้ามามีความเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมหลากหลายด้านที่สามารถเห็นได้จากการที่อุตสาหกรรมเกษตร การแพทย์และอาหารต่างก็นำบรรจุภัณฑ์มาใช้งานเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค สำหรับบรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์จะมีหน้าที่ในการรักษาปกป้องวัสดุที่อยู่ภายในให้คงสภาพเดิมและมีความสามารถในการทำให้วัสดุนั้นอยู่ในสภาวะที่ปราศจากเชื้อตลอดจนถึงขณะที่มีการใช้งาน โดยจะต้องสามารถป้องกันการปนเปื้อนที่อาจเกิดขึ้นจากเชื้อโรคและสิ่งแปลกปลอมภายนอก การเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ให้เหมาะสมกับความต้องการในการใช้งานจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการติดเชื้อจากผู้ป่วยและป้องกันการนำเชื้อโรคไปสู่ผู้ป่วย บรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์ เช่น ถุงบรรจุปัสสาวะ ถุงบรรจุเลือด และบรรจุภัณฑ์ยา มักนิยมผลิตมาจากพลาสติกฐานปิโตรเคมี ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน และพอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น

พอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเส้นใยและวัสดุสำหรับการบรรจุ เนื่องจากสามารถทนความร้อนได้สูง ทนทานต่อสารเคมีและมีความยืดหยุ่นที่ดี นอกจากนี้ยังนิยมใช้พอลิโพรพิลีนในอุตสาหกรรมการผลิตบรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์ชนิดแบบใช้ครั้งเดียว เนื่องจากสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ผลิตที่ต้องการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่น อันได้แก่ ความใส ความสามารถในการซึมผ่าน การทนทานต่อการฆ่าเชื้อ และต้นทุนการผลิตที่ต่ำด้วย สมบัตินี้ดังกล่าวทำให้พอลิโพรพิลีนถูกนำมาใช้งานในการผลิตบรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์ได้หลากหลายรูปแบบ เช่น กระบอกฉีดยาชนิดใช้แล้วทิ้ง ขงฆ่าเชื้อสำหรับเครื่องมือแพทย์ อุปกรณ์ตรวจโรคในห้องปฏิบัติการชนิดใช้แล้วทิ้ง นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเพื่อใช้ในงานด้าน

อุปกรณ์สำหรับสารที่ใช้ในการฟอกไต และอุปกรณ์สารอาหารทางการแพทย์อีกด้วย (พรพรรณ และจรรยา, 2554) แต่ด้วยความต้องการในการใช้งานพลาสติกที่เพิ่มมากขึ้นนั้นส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมาทั้งจากในส่วนของกระบวนการผลิตและวิธีการกำจัด ซึ่งพอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีที่ไม่สามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ เป็นผลให้ในปัจจุบันนานาประเทศได้ตระหนักเกี่ยวกับปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยมีการใช้ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกที่สามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่น พอลิแลคติกแอซิด แต่พอลิแลคติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีราคาสูง มีความเปราะสูงและมีความต้านทานต่อการซึมผ่านของน้ำที่ต่ำ ในทางตรงกันข้ามพอลิโพรพิลีนนั้นมีราคาถูก มีความเหนียวสูงและมีความต้านทานต่อการซึมผ่านของน้ำที่ดี ดังนั้นการทำพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิโพรพิลีนจะสามารถตอบสนองต่อความต้องการในด้านวัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์ในส่วนของต้นทุน คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ และการกำจัดขยะพลาสติกหลังการใช้งานได้เป็นอย่างดี

วัสดุนาโน (nanomaterials) หรืออนุภาคนาโน (nanoparticles) ได้ถูกนำมาใช้ในบรรจุภัณฑ์เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการสกัดกั้น วัสดุนาโนบางชนิด เช่น เงิน ทองแดง ซิงค์ออกไซด์และไททาเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติในการต้านจุลินทรีย์ นอกจากการใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์แล้ววัสดุนาโนยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เช่น การนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้ในการตรวจวิเคราะห์หรือวินิจฉัย ใช้ในการห่อหุ้มสารเพื่อนำส่งในร่างกาย และยังมีใช้งานในผลิตภัณฑ์ด้านสุขภาพ เช่น เครื่องสำอาง ยา เวชภัณฑ์ เครื่องนุ่งห่ม รวมไปถึงสินค้าประเภทอิเล็กทรอนิกส์ ผลิตภัณฑ์อาหาร และเครื่องดื่ม เป็นต้น (วรางคณา, 2553) ซึ่งไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในการเป็นสารบำบัดน้ำ อากาศและแก๊สพิษ เนื่องจากมีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (photocatalyst) ที่มีประสิทธิภาพในการสลายสารประกอบอินทรีย์เกือบทุกชนิดเมื่ออยู่ภายใต้แสงอาทิตย์ นอกจากความสามารถในการต้านจุลินทรีย์แล้วไททาเนียมไดออกไซด์ยังมีความสามารถด้านการกำจัดกลิ่นและความสามารถในการป้องกันการเกิดหยดน้ำ จากรายงานการวิจัยพบว่าไททาเนียมไดออกไซด์สามารถลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในอาหารจากการลดปริมาณในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในบรรจุภัณฑ์อาหาร (Chawengkijwanich and Hayata, 2008) อีกทั้งยังพบว่าการเติมไททาเนียมไดออกไซด์จะส่งผลให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้นอีกด้วย (Esthappan *et al.*, 2012b)

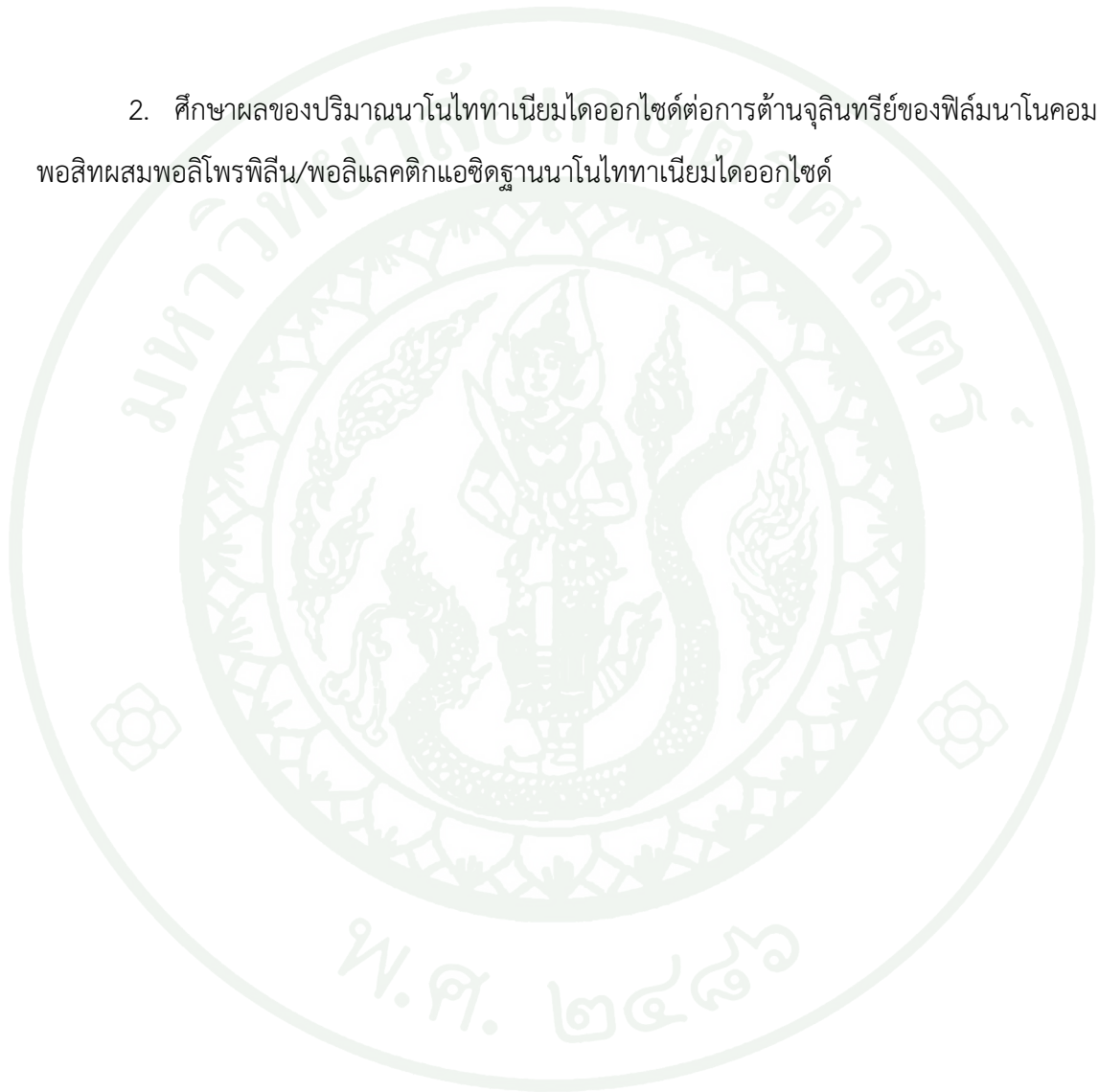
จากข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นทำให้งานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาวัสดุบรรจุภัณฑ์ประเภทพลาสติกให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์ โดยในงานวิจัยได้มีการศึกษาหาอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดที่ทำให้ฟิล์มที่ได้

มีสมบัติที่ดีที่สุด ซึ่งจะทำการศึกษาในส่วนของสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการสกัดกันของฟิล์ม นอกจากนี้ยังทำการศึกษาหาปริมาณนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิด ฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีความสามารถในการต้านจุลินทรีย์เพื่อเป็นประโยชน์และข้อมูลสำหรับการพัฒนาวัสดุประเภทพลาสติกให้มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์



วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดในการเตรียมฟิล์ม
ด้านจุลินทรีย์ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการสกัดกัน
2. ศึกษาผลของปริมาณนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการต้านจุลินทรีย์ของฟิล์มนาโนคอม
พอลิผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์



การตรวจเอกสาร

1. บรรจุภัณฑ์ (package)

1.1 ความหมายและหน้าที่ของบรรจุภัณฑ์

บรรจุภัณฑ์ หมายถึง สิ่งห่อหุ้มหรือภาชนะที่ใช้เพื่อบรรจุ รวบรวม และขนส่งผลิตภัณฑ์จากผู้ผลิตไปยังผู้บริโภค โดยมีวัตถุประสงค์เบื้องต้นในการป้องกันหรือรักษาผลิตภัณฑ์ให้สามารถคงสภาพเดิมไว้ได้มากที่สุด ซึ่งมูลค่าของบรรจุภัณฑ์นั้นต้องมีความเหมาะสม และสอดคล้องกับความต้องการของผลิตภัณฑ์ หน้าที่หลักของบรรจุภัณฑ์ (งามทิพย์, 2554) มีดังนี้

1.1.1 บรรจุผลิตภัณฑ์ (containment) เป็นหน้าที่พื้นฐานของภาชนะบรรจุ โดยบรรจุภัณฑ์ต้องสามารถบรรจุ ห่อหุ้ม และรวบรวมผลิตภัณฑ์ไว้ด้วยกัน เพื่อความสะดวก และรวดเร็วในการขน-ย้าย เก็บรักษา และการจัดการ

1.1.2 รักษาและคุ้มครองผลิตภัณฑ์ (preservation and protection) ทำหน้าที่ปกป้องผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ภายในให้ปลอดภัยจากความเสียหายที่ส่งผลให้เกิดการเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น แสง ไอน้ำ แก๊ส ความร้อน จุลินทรีย์ แรงกระแทก แรงกด และการสั่นสะเทือน

1.1.3 อำนวยความสะดวก (utility and convenience) บรรจุภัณฑ์ต้องให้ความสะดวกในเรื่องการใช้งาน การขนส่ง และการจัดเก็บ รวมถึงเหมาะสมต่อพฤติกรรมการซื้อขาย เช่น เอื้ออำนวยต่อการแยกขาย ส่งต่อ และการกระจายผลิตภัณฑ์

1.1.4 สื่อสารและให้ข้อมูล (communication and information) ทำหน้าที่แสดงลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยมีการระบุข้อความสำคัญตามกฎหมายหรือข้อกำหนด เพื่อให้ข้อมูลแก่ผู้บริโภคและทำหน้าที่จูงใจผู้บริโภคให้เกิดความสนใจหรือเป็นการโฆษณาได้อีกทางหนึ่ง

1.1.5 เหมาะสมกับเครื่องจักรและวิธีในการบรรจุ (machinability) บรรจุภัณฑ์ต้องมีการออกแบบให้มีความเหมาะสม และสอดคล้องกับกระบวนการบรรจุเพื่อให้กระบวนการผลิตเป็นไปอย่างราบรื่น และมีอัตราเร็วในการผลิตตามที่ต้องการ

1.2 ประเภทของบรรจุภัณฑ์

การแบ่งประเภทของบรรจุภัณฑ์สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายลักษณะตามจุดประสงค์ของการแบ่งประเภท เช่น แบ่งตามลักษณะกรรมวิธีการผลิตและวิธีการขนถ่ายผลิตภัณฑ์ แบ่งตามวิธีการบรรจุ แบ่งตามการใช้งาน แบ่งตามความคงรูป แบ่งตามวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ และแบ่งตามการออกแบบ เป็นต้น ซึ่งการแบ่งประเภทบรรจุภัณฑ์ตามการออกแบบสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1.2.1 บรรจุภัณฑ์ชั้นในหรือปฐมภูมิ (primary packaging) เป็นบรรจุภัณฑ์ที่สัมผัสกับผลิตภัณฑ์โดยตรง มีหน้าที่หลักในการบรรจุ และปกป้องผลิตภัณฑ์จากสภาพแวดล้อม

1.2.2 บรรจุภัณฑ์ชั้นที่สองหรือทุติยภูมิ (secondary packaging) เป็นบรรจุภัณฑ์ที่รวบรวมบรรจุภัณฑ์ปฐมภูมิเข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มความสามารถในการป้องกันการจัดจำหน่าย และการขนส่งผลิตภัณฑ์

1.2.3 บรรจุภัณฑ์ชั้นที่สามหรือตติยภูมิ (tertiary packaging) เป็นบรรจุภัณฑ์ที่รวบรวมบรรจุภัณฑ์ทุติยภูมิเข้าด้วยกัน โดยมีหน้าที่ในการป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการขนส่ง และขนย้ายผลิตภัณฑ์

1.3 วัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์

วัสดุบรรจุภัณฑ์แต่ละประเภทมีสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุบรรจุภัณฑ์ให้มีความเหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้บรรจุภัณฑ์ที่ได้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของผลิตภัณฑ์ ซึ่งวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์แบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

1.3.1 กระดาษ (paper) เป็นวัสดุที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการบรรจุ โดยคุณภาพของกระดาษจะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ และสารเติมแต่งที่ใช้ในการผลิต ข้อดีของกระดาษคือ น้ำหนักเบาและราคาต้นทุนต่ำ

1.3.2 พลาสติก (plastics) เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไปตามชนิดของพลาสติก โดยสามารถแบ่งพลาสติกออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่คือ เทอร์โมเซตติงพลาสติก (thermosetting plastics) และเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic)

1.3.3 แก้ว (glass) มีความเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุบรรจุภัณฑ์ประเภทอื่นข้อดีของแก้วคือมีความใส สามารถรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้ดี ทนแรงกดได้สูง และนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง

1.3.4 โลหะ (metals) วัสดุโลหะที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุคือ เหล็กกล้า และ อะลูมิเนียมจุดเด่นของบรรจุภัณฑ์โลหะคือ แข็งแรง ทนทาน บรรจุผลิตภัณฑ์ได้ง่ายและรวดเร็ว โดยสามารถนำกลับมาผลิตใหม่หรือรีไซเคิลได้

2. บรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์

บรรจุภัณฑ์ที่ใช้สำหรับการบรรจุเครื่องมือ และเวชภัณฑ์ทางการแพทย์จะต้องสามารถรักษาหรือปกป้องสิ่งอยู่ภายในให้คงสภาพตลอดเชื่ออย่างมีประสิทธิภาพตลอดเวลาจนถึงขณะมีการใช้งาน โดยมีบรรจุภัณฑ์ที่นำมาใช้งานนั้นจะต้องมีความเหมาะสมกับกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อแต่ละรูปแบบ ซึ่งกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อ (sterilization) เป็นกระบวนการกำจัดหรือทำลายเชื้อจุลินทรีย์ทุกชนิดรวมทั้งสปอร์ของแบคทีเรียด้วยการใช้วิธีทางกายภาพหรือวิธีทางเคมี เช่น ความร้อน รังสี และการใช้น้ำยาฆ่าเชื้อ โดยกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อที่มีการใช้งานกันโดยทั่วไปมีดังนี้ (Merotta, 1990)

2.1 กระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อ

การเลือกใช้กระบวนการในการทำให้ปราศจากเชื้อให้มีความเหมาะสมกับคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงที่สุดอีกทั้งยังเป็นการป้องกันการเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายหลังการทำให้ปราศจากเชื้อ ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของพอลิไวนิลคลอไรด์ที่สามารถเกิดการเสื่อมสลายภายใต้การฉายรังสีและความร้อนสูง ดังนั้นกระบวนการที่เหมาะสมพอลิไวนิลคลอไรด์คือการอบด้วยแก๊สเอทิลีนออกไซด์ ซึ่งได้แสดงความเหมาะสมของชนิดพลาสติกกับกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความเหมาะสมของกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อสำหรับการใช้งานในพลาสติก

Polymer	Steam	Dry Heat	ETO	Gamma	e-beam
Polyolefins					
HDPE	Poor	Poor	Good	Good	Good
LDPE	Poor	Poor	Good	Good	Good
UMHPE	Poor	Poor	Good	Good	Good
PP	Good	Fair	Good	Fair	Fair
PVC					
PVC plasticized	Fair	Fair	Good	Good	Good
PVC unplasticized	Poor	Poor	Good	Fair	Fair
Polystyrene/styrenics					
Polystyrene	Poor	Poor	Good	Good	Good
ABS	Poor	Poor	Good	Good	Good
SAN	Poor	Poor	Good	Good	Good
ASA	Poor	Poor	Good	Good	Good
MABS	Poor	Poor	Good	Good	Good
SBC	Poor	Poor	Good	Good	Good
Acrylics	Poor	Poor	Good	Good	Good
Polycarbonates	Fair	Fair	Good	Good	Good
High heat polycarbonates	Good	Good	Good	Good	Good
Polyurethanes	Poor	Poor	Good	Good	Good
Acetals	Good	Good	Good	Poor	Poor
Polyamides					
Nylon 6, Nylon 66	Fair	Fair	Good	Fair	Fair
Aromatic	Good	Good	Good	Good	Good
Nylon 12, 10, 6/12	Poor	Poor	Good	Fair	Fair
Polyesters					
PBT	Fair	Fair	Good	Good	Good
PET	Poor	Poor	Good	Good	Good
Copolyesters	Poor	Poor	Good	Good	Good

ตารางที่ 1 (ต่อ)

Polymer	Steam	Dry Heat	ETO	Gamma	e-beam
High temperature thermoplastics					
Polysulfones	Good	Good	Good	Good	Good
PPS	Good	Good	Good	Good	Good
LCP	Good	Good	Good	Good	Good
PEI	Fair	Fair	Good	Good	Good
PAI	Fair	Fair	Good	Good	Good
PEEK	Good	Good	Good	Good	Good
Fluoropolymers					
PTFE	Fair	Fair	Good	Poor	Poor
FEP	Good	Good	Good	Fair	Fair
PFA	Good	Good	Good	Good	Good
ECTFE/ETFE	Good	Good	Good	Good	Good
Elastomers					
Silicones	Good	Good	Good	Good	Good
TPU	Poor	Fair	Good	Good	Good
TPC	Poor	Good	Good	Good	Good
TPA	Poor	Poor	Good	Good	Good
TPS	Poor	Poor	Good	Good	Good
TPO	Poor	Fair	Good	Good	Good
Biopolymers					
PLLA	Fair	Good	Good	Good	Good
PLA	Poor	Fair	Good	Good	Good
PHB	Poor	Poor	Good	Fair	Fair
PGA	Good	Good	Good	Good	Good
PCL	Fair	Good	Good	Good	Good
Thermosets	Good	Good	Good	Good	Good

ที่มา: Sastri (2010)

2.1.1 การอบด้วยแก๊สเอทิลีนออกไซด์ (ethylene oxide sterilization: ETO) เป็นวิธีการที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายที่มีการใช้งานในการฆ่าเชื้อยาและผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการทำให้ปราศจากเชื้อในพลาสติกที่สามารถเกิดการสลายตัวได้ภายใต้ไอน้ำและรังสี โดยจะมีการอบด้วยแก๊สเอทิลีนออกไซด์ที่สามารถทำลายสปอร์ของเชื้อแบคทีเรียและเชื้อจุลินทรีย์ของเชื้อแบคทีเรียจากการที่เข้าไปทำให้เซลล์ของจุลินทรีย์ไม่สามารถทำหน้าที่ได้ตามปกติ

2.1.2 การฉายรังสี (radiation sterilization) เป็นกระบวนการที่ได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากเข้ามาทดแทนความซับซ้อนของการอบด้วยแก๊สเอทิลีนออกไซด์ที่มีปัจจัยในด้านความร้อน ความชื้นและความดันเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยการฉายรังสีสามารถทำลายจุลินทรีย์และสปอร์ของจุลินทรีย์ที่ทนความร้อนสูงได้ แต่ยังข้อจำกัดในด้านวัสดุที่อาจเกิดการเสื่อมสลายหลังจากผ่านการฉายรังสีเป็นผลให้สมบัติของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป เช่น เกิดการเปลี่ยนสีและความแข็งแรงของวัสดุลดลง

2.1.3 การอบด้วยไอน้ำร้อน (steam sterilization, autoclave) เป็นการฆ่าเชื้อโดยใช้ไอน้ำภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและความดันสูงในการทำลายจุลินทรีย์ ซึ่งข้อดีของวิธีนี้คือ ราคาถูก ประหยัดเวลา สะอาด และไม่เกิดสารที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม แต่มีข้อเสียคือสามารถใช้กับวัสดุที่ทนความร้อนได้เท่านั้น โดยมีการใช้ความดันเท่ากับ 15 ปิเอสไอ (psi) หรือ 0.5 บาร์ (bar) และอุณหภูมิ 121 ถึง 134 องศาเซลเซียส ภายในระยะเวลาสั้นตั้งแต่ 3 ถึง 15 นาที

2.1.4 การอบด้วยความร้อน (dry heat sterilization) เป็นการอบด้วยความร้อนแห้ง ซึ่งความร้อนจะทำให้เกิดการทำลายเซลล์จุลินทรีย์โดยการดึงน้ำออกจากเซลล์เป็นผลให้โปรตีนในเซลล์เสียสภาพและความเข้มข้นของสารในเซลล์ผิดปกติ โดยมีการใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 121 ถึง 180 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำให้ปราศจากเชื้อตั้งแต่ 30 นาที ถึง 24 ชั่วโมง

2.2 พลาสติกสำหรับอุตสาหกรรมทางการแพทย์

พลาสติกเป็นวัสดุทางเลือกที่มีความนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมภาชนะบรรจุเภสัชภัณฑ์และอุปกรณ์ทางการแพทย์ เนื่องจากคุณสมบัติเด่นบางประการ เช่น น้ำหนักเบา มีความทนทาน ทนต่อความร้อน ป้องกันการซึมผ่านได้ดี มีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ ฯลฯ จึงทำให้พลาสติกถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมภาชนะบรรจุเภสัชภัณฑ์และอุปกรณ์ทางการแพทย์ ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมปลายทางที่สร้างมูลค่าเพิ่มและมีอัตราการเจริญเติบโตสูง โดยรูปแบบโครงสร้าง

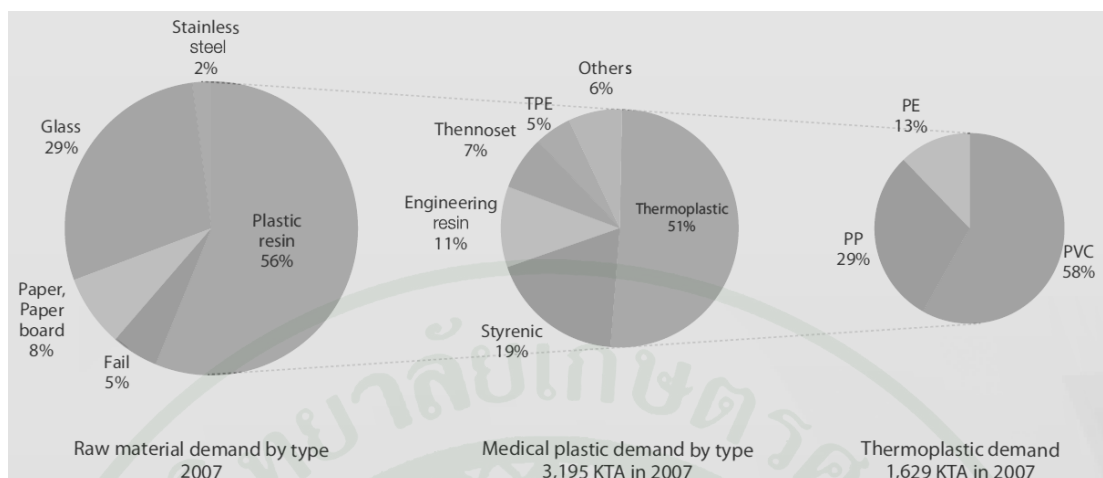
ประชากรที่มีอายุสูงขึ้นในปัจจุบันบวกกับการพัฒนาด้านงานวิจัยและเทคโนโลยีเป็นอีกปัจจัยที่ผลักดันให้อุตสาหกรรมมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งในปี พ.ศ. 2554 ประเทศไทยมีการนำเข้าและส่งออกวัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์สูงถึง 37,000 ล้านบาท และ 90,000 ล้านบาท เพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2553 คิดเป็นร้อยละ 13.6 และ ร้อยละ 9 ตามลำดับ โดยมีประเทศคู่ค้าที่สำคัญคือ สหรัฐอเมริกา ประเทศญี่ปุ่น และประเทศเยอรมนี (สถาบันพลาสติก, 2555) สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ทางการแพทย์ในประเทศไทยนั้นยังมีการผลิตด้วยเทคโนโลยีในระดับต่ำถึงกลาง โดยส่วนใหญ่จะทำการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกที่อยู่ในรูปของถุงมือแพทย์ สายใส่ทางเดินอาหาร ชุดให้น้ำเกลือ เครื่องมือแพทย์ บรรจุภัณฑ์ยา เช่น กระปุกยา และถุงใส่ยา เป็นต้น ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของพลาสติกสำหรับอุตสาหกรรมทางการแพทย์ได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.2.1 พลาสติกที่ใช้กันทั่วไป (commodity plastics) เช่น พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีน คลอไรด์ พอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีน

2.2.2 พลาสติกวิศวกรรม (engineering plastics) เช่น พอลิคาร์บอเนต และอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (acrylonitrile butadiene styrene copolymer: ABS)

2.2.3 เทอร์โมพลาสติก อีลาสโตเมอร์ (thermoplastic elastomers) เช่น เทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (thermoplastic polyurethane: TPU) เทอร์โมพลาสติกวัลคาไนเซต (thermoplastic vulcanizate: TPV) และ สไตรีน-บิวทาไดอีน (styrene-butadiene copolymer: SBC)

นอกจากนี้ยังนิยมใช้พลาสติกผสมและวัสดุเสริมแรงเพื่อปรับปรุงสมบัติของพลาสติกให้เหมาะกับการนำไปใช้งานมากยิ่งขึ้น สำหรับบรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์มักนิยมใช้พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน และพอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นวัสดุในการผลิต (ภาพที่ 1) แต่อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ถูกนำมาใช้ในทางการแพทย์จะต้องได้รับการควบคุมคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์เพื่อป้องกันและลดความเสี่ยงในการติดเชื้อจากผู้ป่วยและการนำเชื้อโรคไปสู่ผู้ป่วยจากการใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติก ซึ่งมีวิธีการตรวจสอบคุณภาพตามมาตรฐานต่างๆ เช่น The United States Pharmacopeia (USP) European Pharmacopoeia (Ph.Eur.) The Pharmacopoeia of Japan (JP) Thai Pharmacopoeia (TP) ISO 10993 และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) เป็นต้น (สถาบันพลาสติก, 2555)



ภาพที่ 1 แสดงปริมาณการใช้งานของวัสดุชนิดต่างๆ สำหรับบรรจุภัณฑ์ปลอดเชื้อทางการแพทย์ในปี ค.ศ. 2007

ที่มา: เอสซีจี เคมิคอลส์ (2554)

2.3 ถุงระบายปัสสาวะ (urine drainage bag)

ถุงระบายปัสสาวะหรือถุงเก็บปัสสาวะเป็นบรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์ที่มีการใช้งานในปริมาณมาก เนื่องจากในปัจจุบันผู้ป่วยจำนวนมาก เช่น ผู้ป่วยที่ได้รับการผ่าตัด ผู้ป่วยพิการหรือความทุพพลภาพ เป็นต้น มีความจำเป็นในการใช้ถุงระบายปัสสาวะ ในบางครั้งการใช้ถุงระบายปัสสาวะเป็นเวลานานอาจก่อให้เกิดการติดเชื้อระบบทางเดินปัสสาวะ (urinary tract infection) โดยการติดเชื้อในระบบทางเดินปัสสาวะเป็นปัญหาการติดเชื้อที่พบบ่อยในโรงพยาบาลซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการติดเชื้อในกระแสเลือด ทำให้อัตราการตายของผู้ป่วยเพิ่มขึ้น เพิ่มอัตราการดื้อยาในโรงพยาบาล และทำให้ค่าใช้จ่ายในการรักษาสูงขึ้น

การติดเชื้อระบบทางเดินปัสสาวะคือ โรคหรือภาวะการอักเสบของอวัยวะในระบบทางเดินปัสสาวะที่ตอบสนองต่อการติดเชื้อ โรคหรือภาวะที่เกิดจากอวัยวะในระบบทางเดินปัสสาวะเกิดการอักเสบจากการติดเชื้อ โดยส่วนใหญ่จะเป็นการติดเชื้อแบคทีเรีย แต่ทั้งนี้สามารถเกิดขึ้นได้จากเชื้อโรคชนิดอื่น เช่น เชื้อรา และเชื้อไวรัส เป็นต้น แต่อัตราการพบน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การติดเชื้อจากแบคทีเรีย การติดเชื้อระบบปัสสาวะเกิดได้หลายแบบ ซึ่งมักสัมพันธ์กับการมีแบคทีเรียในปัสสาวะ (bacteriuria) และปัสสาวะเป็นหนอง (pyuria) (สมพล, 2556) แบคทีเรียที่เป็นสาเหตุ

หลักของการติดเชื้อทางเดินปัสสาวะคือ *Escherichia coli* แต่แบคทีเรียอื่นที่แสดงไว้ในตารางที่ 2 ก็เป็นสาเหตุให้เกิดการติดเชื้อทางเดินปัสสาวะได้เช่นกัน

ตารางที่ 2 จุลินทรีย์ก่อโรค (pathogen) ที่พบบ่อยในการติดเชื้อระบบทางเดินปัสสาวะ

Pathogen	Distribution
Hospital-wide	
<i>Escherichia coli</i>	26 %
<i>Enterococci</i>	16 %
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	12 %
<i>Candida Species</i>	9 %
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	6 %
<i>Enterobacter Species</i>	6 %
Intensive Care Unit	
<i>Candida Species</i>	25 %
<i>Escherichia coli</i>	18 %
<i>Enterococci</i>	13 %
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	11 %
<i>Enterobacter Species</i>	6 %
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	6 %

ที่มา: The Association for Professionals in Infection Control and Epidemiology (2008)

การป้องกันการติดเชื้อทางเดินปัสสาวะจากการใช้ถุงระบายปัสสาวะสามารถทำได้โดยการดูแลถุงระบายปัสสาวะให้อยู่ในระบบปิดตลอดเวลาเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของเชื้อเข้าสู่ผู้ป่วย แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาถุงระบายปัสสาวะให้มีสมบัติในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้สามารถควบคุมการติดเชื้อและใช้งานได้สะดวกมากยิ่งขึ้น

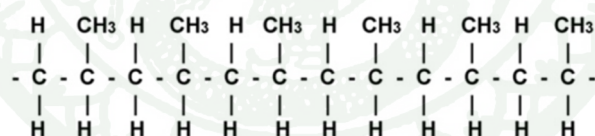
ตารางที่ 3 ตัวอย่างการนำสารต้านจุลินทรีย์มาใช้ในการผลิตถุงระบายปัสสาวะ

ชื่อการค้า	รายละเอียดผลิตภัณฑ์	ภาพตัวอย่าง	บริษัท
BARD® COMPLETE CARE® drain bags	การออกแบบรูปทรงหยดน้ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการ ระบายปัสสาวะ พร้อมทั้ง เคลือบด้วยสารต้านจุลินทรีย์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการ ต้านทานต่อเชื้อที่ก่อโรคใน ระบบทางเดินปัสสาวะ		C. R. Bard, Inc. (USA)

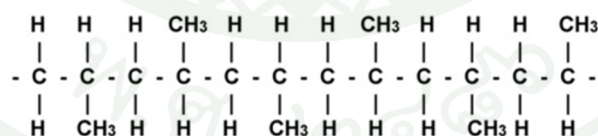
ที่มา: Bard Medical (n.d.)

3. พอลิโพรพิลีน (polypropylene: PP)

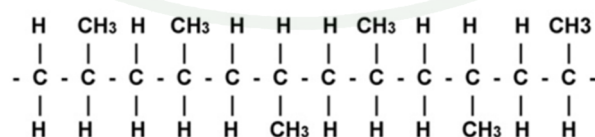
3.1 โครงสร้างของพอลิโพรพิลีน



Isotactic with methyl groups on same side of chain



Syndiotactic with alternating orientation of methyl groups



Atactic with random orientation of methyl groups

ภาพที่ 2 ลักษณะโครงสร้างของพอลิโพรพิลีน

ที่มา: Calhoun (2009)

พอลิโพรพิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง (linear polymer) และเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ของโพรพิลีนมอนอเมอร์ภายใต้สภาวะและตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเหมาะสม ซึ่งสภาวะในการเกิดปฏิกิริยาและชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีผลต่อการจัดเรียงโครงสร้างของพอลิโพรพิลีน โดยโครงสร้างของพอลิโพรพิลีนนั้นจะมีความแตกต่างกันตามทิศทางในการจัดตำแหน่งของหมู่แทนที่ (tacticity) หรือ หมู่เมทิล (methyl group) ทำให้เกิดโครงสร้าง 3 แบบ ดังนี้ (Calhoun, 2009)

3.1.1 ไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีน (isotactic polypropylene: iPP) หมู่เมทิลในสายโซ่โพลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในด้านเดียวกันของสายโซ่ทำให้มีความเป็นผลึกสูง โดยทั่วไปจะมีความเป็นผลึกอยู่ในช่วง 40 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ทำให้วัสดุมีความแข็งแรง ทนทานต่อสารเคมีและมีการซึมผ่านของแก๊สที่ต่ำ

3.1.2 ซินดิโอแทคติกพอลิโพรพิลีน (syndiotactic polypropylene: sPP) หมู่เมทิลในสายโซ่โพลิเมอร์สลับด้านกันไปมาอย่างเป็นระเบียบ โดยการสังเคราะห์จะต้องใช้วิธีการและตัวเร่งที่จำเพาะจึงทำให้พอลิโพรพิลีนชนิดนี้ยังไม่มีการใช้งานที่แพร่หลาย

3.1.3 อะแทคติกพอลิโพรพิลีน (atactic polypropylene: aPP) หมู่เมทิลในสายโซ่โพลิเมอร์ของพอลิโพรพิลีนมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่มสลับกันไปมาทำให้สายโซ่ไม่สามารถเกิดการจัดเรียงตัวในลักษณะที่เป็นระเบียบได้และเกิดเป็นอสัณฐานพอลิเมอร์ (amorphous polymer) ที่มีลักษณะอ่อนนุ่ม วัสดุที่ผลิตจากพอลิโพรพิลีนชนิดนี้มีความแข็งแรงที่ต่ำ ไม่ทนทานต่อตัวทำละลาย การซึมผ่านของไอน้ำและอากาศสูง จึงไม่นิยมนำมาใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์และมีการผลิตในเชิงพาณิชย์ต่ำ

3.2 สมบัติและการใช้งานของพอลิโพรพิลีน

ในปัจจุบันที่มีการใช้งานพอลิโพรพิลีนกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเส้นใยและวัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากสมบัติเด่นหลายประการเช่น น้ำหนักเบา ทนทานต่อสารไขมัน ทนทานต่อความร้อน ทนทานต่อสารเคมี ทนทานต่อการเสียดสีและต้านทานการซึมผ่านของแก๊สได้ดี ซึ่งมี การใช้งานพอลิโพรพิลีนในบรรจุภัณฑ์แบบยืดหยุ่น (flexible packaging) และภาชนะบรรจุเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังมีการใช้พอลิโพรพิลีนในด้านพลาสติกสำหรับใช้งานทางด้านการแพทย์หรือในห้องปฏิบัติการ โดยมีข้อดีคือทนต่อความร้อนสูงได้สามารถนำไปอบฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งอัดความดันหรือการฆ่าเชื้อโดยใช้ไอน้ำได้ ถึงแม้ว่าพอลิโพรพิลีนจะเป็นเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ที่สามารถเกิด

การหลอมและขึ้นรูปใหม่ได้ แต่มีข้อควรระวังคือพลาสติกที่ผ่านกระบวนการที่มีการให้ความร้อนหลายครั้งสามารถเกิดการแตกสลายหรือการขาดออกของสายโซ่พอลิเมอร์ (chain scission) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สั้นลงหรือน้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลงเป็นผลให้สมบัติด้อยลง เช่น ความเหนียวลดลง เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและไม่สามารถขึ้นรูปได้ เป็นต้น จากงานวิจัยของ Costa *et al.* (2007) พบว่าเมื่อนำพอลิโพรพิลีนมาผ่านกระบวนการทางความร้อนด้วยการอัดรีด (extrusion) เป็นจำนวนหลายครั้งจะทำให้สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของวัสดุลดต่ำลง

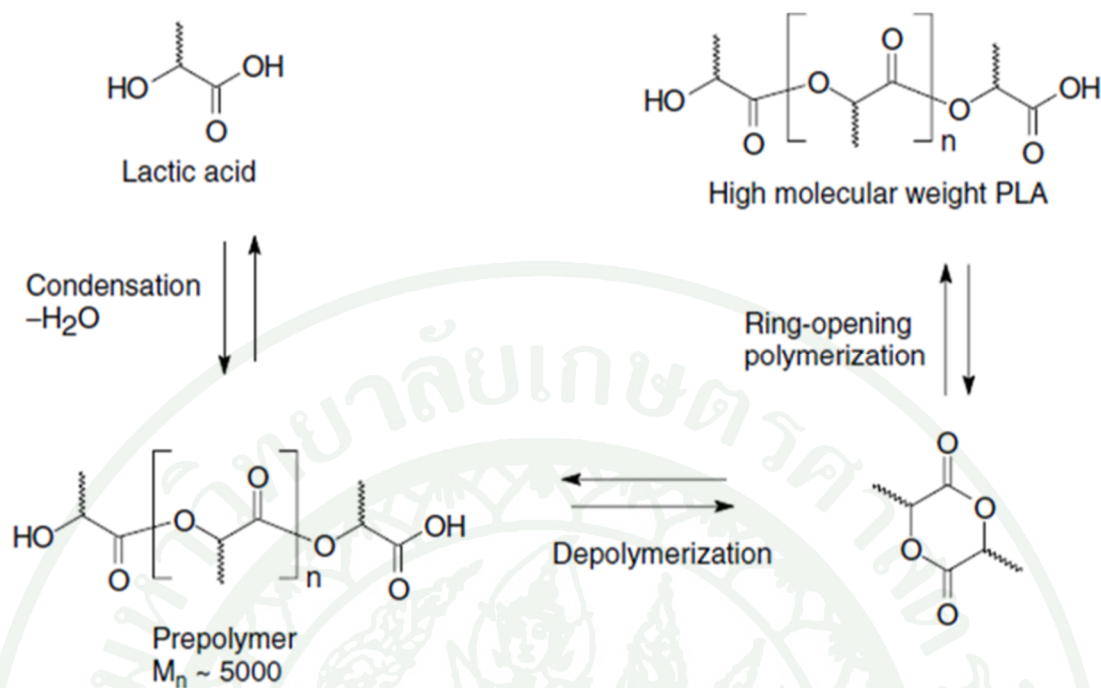
4. พอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic acid): PLA)

พอลิแลคติกแอซิดเป็นพลาสติกชีวภาพที่อยู่ในกลุ่มพอลิเอสเตอร์ที่มีสายโซ่ตรง (aliphatic polyester) ซึ่งผลิตได้จากการสังเคราะห์โดยผ่านกระบวนการทางเคมีของมอนอเมอร์คือกรดแลคติก (lactic acid) ที่ได้จากแหล่งวัตถุดิบทางการเกษตรหรือทรัพยากรทางธรรมชาติที่สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้จำพวกแป้งและน้ำตาล เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง หรืออ้อย เป็นต้น

4.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด

กรดแลคติกซึ่งเป็นมอนอเมอร์ของพอลิแลคติกแอซิดมีไอโซเมอร์สองรูปแบบคือแบบดี (d-lactic acid) และแบบแอล (l-lactic acid) ซึ่งไอโซเมอร์ทั้งสองแบบนี้มีสูตรเคมีเหมือนกันแต่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางสามมิติไม่เหมือนกันและบิตระนาบแสงโพลาไรซ์ในทิศทางที่ต่างกัน โดยในธรรมชาติส่วนใหญ่จะพบกรดแลคติกในรูปแบบแอลไอโซเมอร์หรือพบในรูปของผสมระหว่างแอลและดีไอโซเมอร์ ซึ่งของผสมระหว่างแอลและดีไอโซเมอร์ในอัตราส่วนที่เท่ากัน ($l/d = 1:1$) จะเรียกว่าของผสมราซิมิก (racemic mixture) ซึ่งไม่มีสมบัติบิตระนาบแสงโพลาไรซ์ (optically inactive)

การสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดสามารถกระทำได้ผ่านการเกิดปฏิกิริยา 3 แบบคือการควบแน่นโดยตรง (direct condensation polymerization) การควบแน่นแบบอะซีโอโทรปิก (azeotropic dehydrative condensation) และการของเปิดวงของแลคไทด์ (ring-opening polymerization) ในระดับอุตสาหกรรมจะทำการสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดโดยการเปิดวงของแลคไทด์เนื่องจากให้พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ในขณะที่การสังเคราะห์ผ่านการควบแน่นโดยตรงของกรดแลคติกจะทำให้ได้พอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เนื่องจากการกำจัดน้ำที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการทำได้ยากเป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับดังแสดงในภาพที่ 3 ทำให้พอลิแลคติกแอซิดที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ



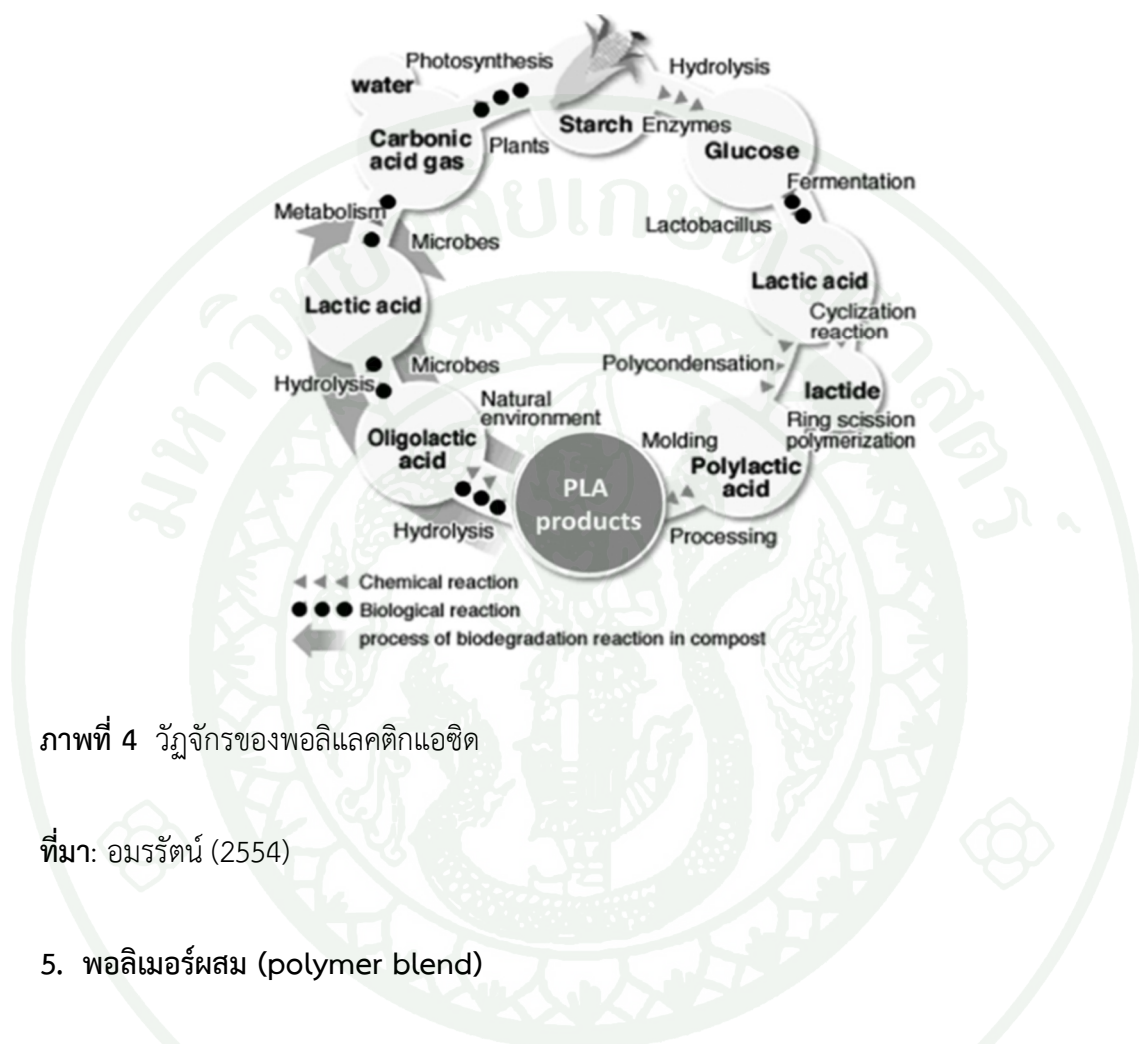
ภาพที่ 3 เส้นทางสังเคราะห์พอลิแลคติกแอซิด

ที่มา: Drumright *et al.* (2000)

4.2 สมบัติและการใช้งานของพอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกแอซิดเป็นเทอร์โมพลาสติกที่สามารถขึ้นรูปทางความร้อนด้วยกระบวนการผลิตที่ใช้กันในอุตสาหกรรมพลาสติกทั่วไป เช่น การฉีดขึ้นรูป การขึ้นรูปด้วยความร้อน การอัดรีด และการเป่าขึ้นและการอัดขึ้นรูปเป็นต้นสมบัติโดยทั่วไปของพอลิแลคติกแอซิดคือใส เปราะ มีความคงรูปและความแข็งแรงสูง ต้านทานต่อการแพร่ผ่านของไอน้ำและอากาศได้ดี อีกทั้งยังสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตได้ พอลิแลคติกแอซิดมีอุณหภูมิการหลอมเหลวอยู่ในช่วง 130 ถึง 160 องศาเซลเซียส แต่ไม่สามารถทนความร้อนได้มากกว่า 110 องศาเซลเซียส (อมรรัตน์, 2554) ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ ดังนั้นพอลิแลคติกแอซิดจึงถูกนำมาใช้งานสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่มีการใช้งานที่อุณหภูมิไม่สูงมากและไม่ใช้กับบรรจุภัณฑ์ที่ต้องเข้าไมโครเวฟ เช่น ฟิล์มสำหรับหุ้มอาหาร กล่อง จาน แก้วน้ำและภาชนะที่ใช้ครั้งเดียวทิ้ง นอกจากนี้ยังมีการใช้งานในด้านเส้นใยและสิ่งทอ เช่น การผลิตเป็นเสื้อผ้าและผ้าเบาะรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งเมื่อนำผลิตภัณฑ์หลังการใช้งานที่ผลิตจากพอลิแลคติกแอซิดไปฝังกลบในดินจะสามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพภายในระยะเวลาอันสั้นเมื่อ

เปรียบเทียบกับพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โดยจะให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 วัฏจักรของพอลิแลคติกแอซิด

ที่มา: อมรรัตน์ (2554)

5. พอลิเมอร์ผสม (polymer blend)

พอลิเมอร์ผสมคือพอลิเมอร์ที่ได้จากการผสมโดยวิธีทางกายภาพของพอลิเมอร์เท่าๆกับหรือมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไปเข้าด้วยกันเพื่อให้มีสมบัติตามที่ต้องการ โดยวัตถุประสงค์ของการทำพอลิเมอร์ผสมคือปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้มีความหลากหลายมากขึ้น

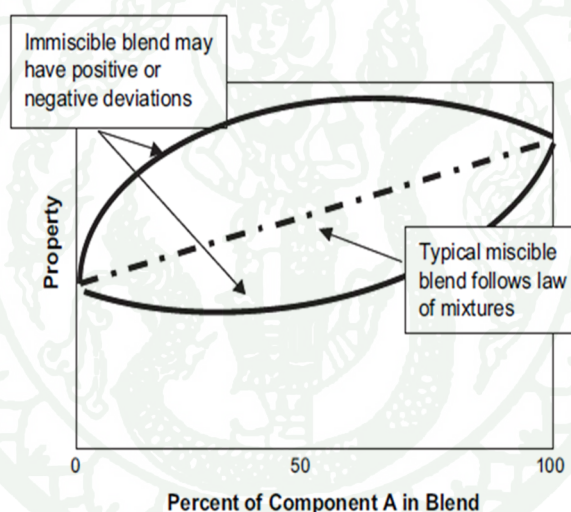
5.1 สภาพความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม (compatibility)

ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม (miscibility of polymer) สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic miscibility) โดยหลักการดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับสมดุลระหว่างเอนทัลปีและเอนโทรปีของการผสมที่มีต่อพลังงานเสรีของการผสม (free energy of mixing) การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสมสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}} \quad (\text{สมการที่ 1})$$

โดยที่ ΔG_{mix} = การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสม(kJ/mol)
 ΔH_{mix} = การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการผสม(kJ/mol)
 ΔS_{mix} = การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม(kJ/mol)
 T = อุณหภูมิ (K)

ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสมบัติของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ซึ่งพอลิเมอร์ผสมที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันต้องมี ΔG_{mix} เป็นค่าลบ โดยสามารถแบ่งพอลิเมอร์ผสมตามความเข้ากันได้ออกเป็น 3 ชนิด คือ



ภาพที่ 5 สมบัติของพอลิเมอร์ผสม

ที่มา: Morris (2009)

5.1.1 พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ (completely miscible blends) เป็นพอลิเมอร์ผสมที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ในระดับโมเลกุล พอลิเมอร์ผสมชนิดนี้จะปรากฏอุณหภูมิคล้ายแก้ว (glass transition temperature: T_g) เพียงค่าเดียว โดยมีค่าอยู่ระหว่างอุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดและค่อนข้างขึ้นกับอัตราส่วนขององค์ประกอบในพอลิเมอร์ผสม

5.1.2 พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ส่วนหนึ่ง (partially miscible blends) พอลิเมอร์ผสมเกิดเป็นลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกันและมีการปรากฏอุณหภูมิคล้ายแก้วของแต่ละพอลิเมอร์ โดยมีการเลื่อนของค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วไปจากค่าจริงของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ

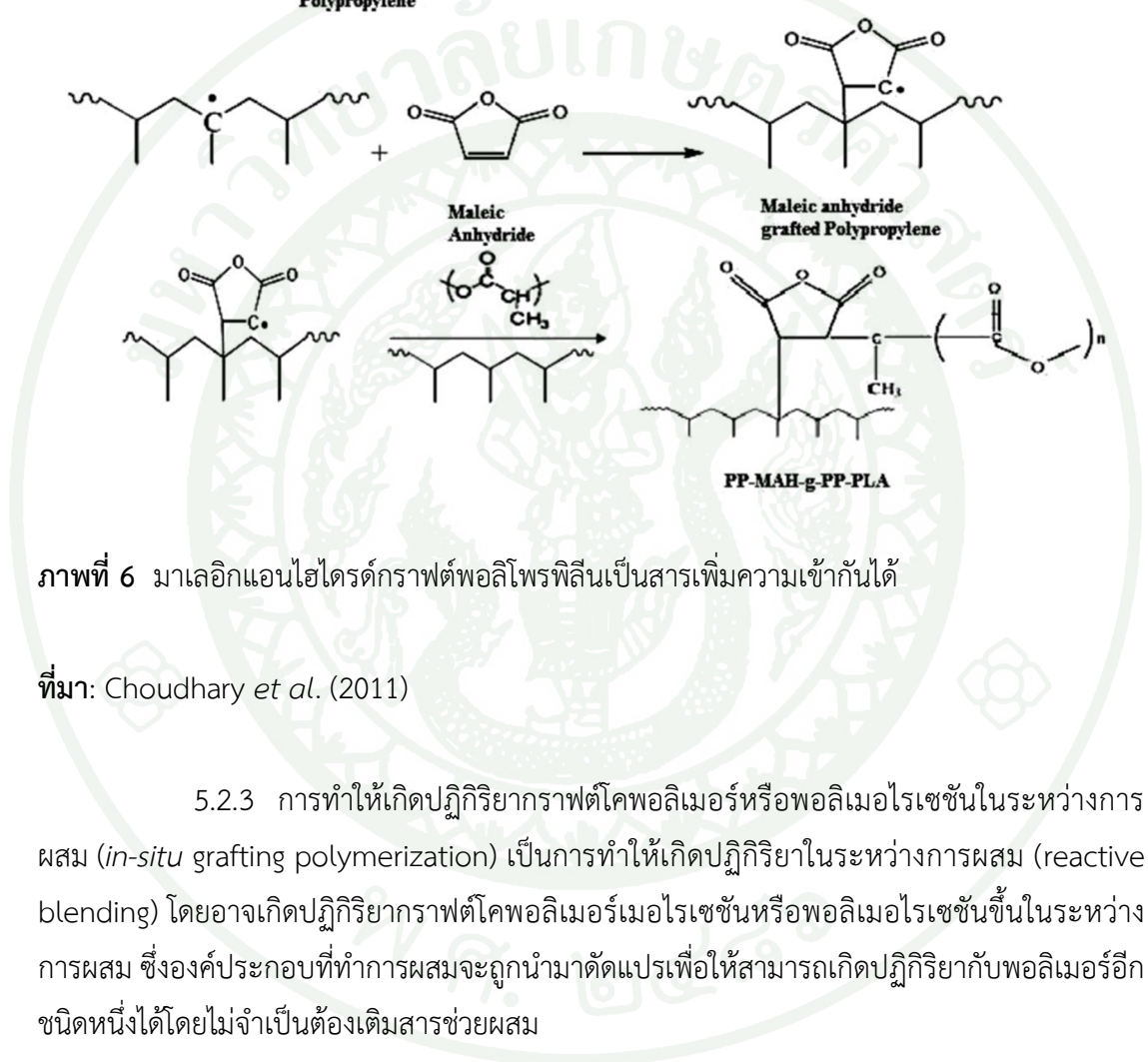
5.1.3 พอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันไม่ได้ (fully immiscible) พอลิเมอร์ผสมมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกันและจะปรากฏอุณหภูมิคล้ายแก้วของแต่ละพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบในพอลิเมอร์ผสม

5.2 การเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่จะมีสมบัติที่ค่อนข้างต่ำโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ทั้งนี้เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัส (interfacial adhesion) ที่ต่ำ ดังนั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ในการผสมจึงนิยมใช้สารช่วยผสมหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผสม โดยการเติมสารช่วยผสมหรือสารเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) จะไปปรับปรุงแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างสัณฐานวิทยาและสมบัติของที่เหมาะสม ซึ่งการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมสามารถทำได้ดังนี้ (สมจิตต์, 2548)

5.2.1 การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (addition of block copolymers /graft copolymers) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับการนิยมนำมาใช้ในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ โดยเฉพาะบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกของพอลิเมอร์ที่เหมือนกันกับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะไปอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิด

5.2.2 การเติมพอลิเมอร์ที่หมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (addition of functional/reactive polymers) เป็นการนำพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะทำการผสมมาผ่านการดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวจะสามารถเกิดปฏิกิริยาหรือเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลกับพอลิเมอร์ ชนิดที่สองตัวอย่างเช่น การใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์บนสายโซ่ของพอลิไอโอเลฟินส์ โดยหมู่คาร์บอกซิลิกของมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่ฟังก์ชันในพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้

ที่มา: Choudhary *et al.* (2011)

5.2.3 การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์เซชันในระหว่างการผลิต (in-situ grafting polymerization) เป็นการทำให้เกิดปฏิกิริยาในระหว่างการผลิต (reactive blending) โดยอาจเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์เซชันขึ้นในระหว่างการผลิต ซึ่งองค์ประกอบที่ทำการผสมจะถูกนำมาดัดแปรเพื่อให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม

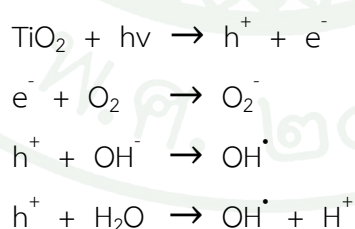
6. นาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (nano titanium dioxide: nano TiO_2)

นาโนเทคโนโลยี เป็นวิชาที่รวมเอาสาขาวิชาทางด้านวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์เข้าไว้ด้วยกัน ถ้ากล่าวโดยกว้างๆ นาโนเทคโนโลยีคือ หลักของการจัดการวัสดุในระดับอะตอมหรือโมเลกุล เพื่อสร้างวัสดุหรืออุปกรณ์ในระดับที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือในระดับนาโนเมตร (ประมาณ 1 ถึง 100 นาโนเมตร) ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีคุณสมบัติที่พิเศษขึ้น

ทั้งในด้านฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ ซึ่งสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์เพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้งานได้มากยิ่งขึ้น

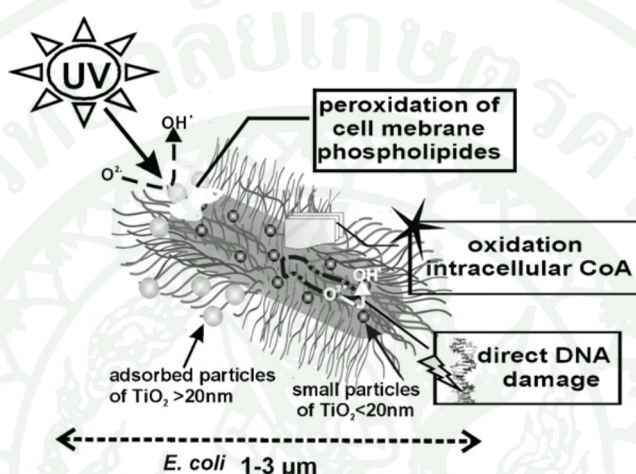
ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำประเภทเอ็นชนิดหนึ่ง (N-type semiconductor) ที่มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรคเมื่ออยู่ในรูปของอนุภาคนาโน นอกจากนี้ไททาเนียมไดออกไซด์ยังเป็นสารที่มีประโยชน์หลากหลายและมีความปลอดภัย ในปัจจุบันมีการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ในยาสีฟัน สีทาอาคาร และเครื่องสำอาง เช่น ลิปสติก ครีมกันแดด แป้ง หรือใช้ในผลิตภัณฑ์บรรจุอาหาร อีกทั้งสามารถนำมาใช้สำหรับการบำบัดน้ำ อากาศและแก๊สพิษ รวมถึงการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย ไวรัส เชื้อราและเชื้อโรคชนิดอื่นๆ เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงหรือโฟโตคาตาไลซิสที่มีประสิทธิภาพในการสลายสารประกอบอินทรีย์เกือบทุกชนิดเมื่ออยู่ภายใต้แสงอาทิตย์ (Dastjerdi and Montazer, 2010)

โฟโตคาตาไลซิส (photocatalysis) มาจากส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ “โฟโต (photo)” ที่ใช้สำหรับนำหน้าคำที่มีแสงเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยและ “คาตาลิสต์ (catalyst)” ที่หมายถึงกระบวนการที่สารมีส่วนร่วมในการเปลี่ยนแปลงอัตราของปฏิกิริยาเคมี โดยที่ตัวเองไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือสูญหายไปภายหลัง สารที่เรียกว่าตัวเร่งจะช่วยเพิ่มอัตราในการเกิดปฏิกิริยาด้วยการปลดพลังงานที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นโฟโตคาตาไลซิสจึงมีความหมายว่าการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่มีการใช้แสงในการกระตุ้นสารตัวเร่งให้เปลี่ยนแปลงอัตราของปฏิกิริยาเคมีโดยที่ตัวสารเร่งไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับเกิดปฏิกิริยาทางเคมีนั้นและเรียกสารที่เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยการลดพลังงานกระตุ้น (activation energy) หรือสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงว่าโฟโตคาตาลิสต์ (สรרך, 2552)



เมื่อทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตไปยังไททาเนียมไดออกไซด์จะทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) และประจุลบของซูเปอร์ออกไซด์ (superoxide anions) ตามสมการด้านบน ซึ่งสารตระกูลออกซิเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถทำลายโครงสร้างและยับยั้งชีวเคมีของจุลินทรีย์ โดยอนุมูลไฮดรอกซิลและโมเลกุลของออกซิเจนจะทำให้สารประกอบอินทรีย์ถูกทำเป็นออกไซด์จนในที่สุดจะกลายเป็นน้ำและ

คาร์บอนไดออกไซด์ (Llorens, 2012) ตามธรรมชาติในตัวสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงจะไม่สามารถดูดจับสารอินทรีย์ แบคทีเรีย เชื้อรา ฯลฯ ที่อยู่ในน้ำหรืออากาศ ยกเว้นว่าสิ่งเหล่านั้นจะมาเกาะติดที่ผิวหน้าของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและจะไม่สามารถทำงานได้หากปราศจากแสง โดยปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโฟโตคาตาไลซิส ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความเข้มข้น อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen) และความเข้มของแสง (light intensity) เป็นต้น



ภาพที่ 7 กลไกการต้านจุลินทรีย์ของไททาเนียมไดออกไซด์

ที่มา: Markowska-Szczupaka *et al.* (2011)

7. การคอมปาวด์ (compounding)

ในบางครั้งกระบวนการผลิตอาจมีความจำเป็นที่ต้องการผสมสารเคมีที่เรียกว่าสารเติมแต่ง (additives) เพื่อช่วยปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามที่ต้องการโดยสามารถแบ่งเทคนิคในการคอมปาวด์ได้เป็น 2 เทคนิคคือ การคอมปาวด์แบบแบทและการคอมปาวด์แบบต่อเนื่อง (เจริญ, 2547)

7.1 การคอมปาวด์แบบแบท (batch compounding) เป็นการผสมพลาสติกกับสารเคมีโดยใช้เครื่องผสมหลัก 2 ชนิดคือ เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งและเครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน

7.1.1 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll-mill) โดยลูกกลิ้งซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของเครื่องจะหมุนสวนทางกันและสามารถปรับความเร็วของการหมุนได้ ข้อดีของการผสมแบบนี้คือ สามารถมองเห็นลักษณะและระดับการผสมได้และสามารถทำความสะอาดเครื่องมือได้ง่าย แต่ข้อเสียคือ การผสมในระบบเปิดทำให้มีโอกาสในการปนเปื้อนที่สูงและการผสมให้แต่ละแบทมีขนาดเท่ากันทำได้ยาก อีกทั้งยังใช้ระยะเวลาในการผสมที่มากกว่าการใช้เครื่องผสมแบบปิด

7.1.2 เครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน (internal mixer) ใช้การหมุนของโรเตอร์ (rotor) ภายในห้องผสม ลักษณะของโรเตอร์ที่ไม่ราบเรียบทำให้ในขณะหมุนเกิดแรงเฉือนสูงภายในของผสมส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของสารเคมีในพลาสติกที่ดี ข้อดีของการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิดหรือเครื่องผสมภายในคือ ใช้เวลาในการผสมต่ำและไม่ต้องใช้ความชำนาญในการใช้งาน เนื่องจากการผสมที่ทำในภาชนะปิดจะไม่เกิดการสูญเสียวัสดุ ไม่เกิดการปนเปื้อนและขนาดของแบทในการผสมแต่ละครั้งค่อนข้างคงที่ ดังนั้นจึงมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง

7.2 การคอมปาวด์แบบต่อเนื่อง (continuous compounding) เป็นการคอมปาวด์หรือการผสมพลาสติกโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูด

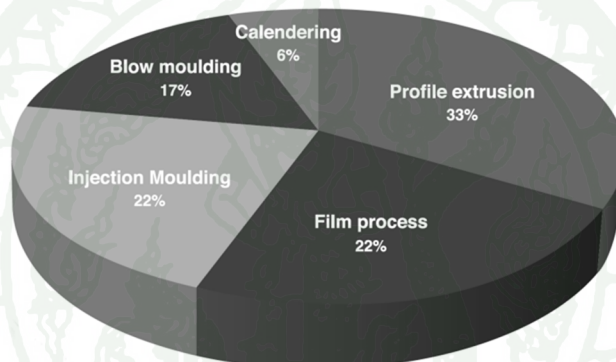
7.2.1 เครื่องเอกซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว (single-screw extrusion) การผสมโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยวไม่สามารถผสมสารเติมแต่งให้เป็นเนื้อเดียวกับพลาสติกได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นไม่มากพอที่จะทำให้สารเติมแต่งเกิดการกระจายตัวเข้ากันได้ดีถึงระดับโมเลกุล แต่สามารถปรับปรุงความสามารถในการผสมได้โดยการเพิ่มส่วนประกอบที่เพิ่มแรงเฉือนของสกรูทำให้สารเคมีเกิดการกระจายตัวเข้ากับพลาสติกได้ดีขึ้น

7.2.2 เครื่องเอกซ์ทรูดแบบสกรูคู่ (twin-screw extrusion) การผสมโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูดแบบสกรูคู่จะมีประสิทธิภาพในการผสมที่ดีเนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการหมุนของสกรูมีค่าสูงกว่าเครื่องเอกซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว

8. การผลิตแผ่นฟิล์มด้วยการอัดรีดขึ้นรูป (film extrusion)

การผลิตแผ่นฟิล์มด้วยการอัดรีดขึ้นรูปเป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกแบบต่อเนื่องที่มีการใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบาง ซึ่งการผลิตแผ่นฟิล์มเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีการ

ใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุและอุปกรณ์ทางการแพทย์ (ภาพที่ 8) สำหรับในอุตสาหกรรมพลาสติกจะนิยมใช้กระบวนการหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์ม (cast film extrusion) ในการผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มในขณะที่กระบวนการเป่าฟิล์ม (blown film extrusion) จะถูกใช้ในการผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นท่อกลวง วัสดุที่ใช้ในการผลิตแผ่นฟิล์มพลาสติกด้วยการอัดรีดขึ้นรูปเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก โดยพลาสติกในกลุ่มพอลิโอเลฟินส์ (polyolefins) จะเป็นพลาสติกที่มีการใช้มากที่สุด เช่น พอลิเอทิลีน (polyethylene: PE) และพอลิโพรพิลีน ส่วนพลาสติกชนิดอื่นที่นิยมใช้คือ พอลิเอไมด์ (polyamide: PA) หรือไนลอน (nylon) พอลิคาร์บอเนต (polycarbonate: PC) พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride: PVC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate: PET) (เจริญ, 2547)



ภาพที่ 8 กระบวนการผลิตที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกสำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์ ปี พ.ศ. 2554 จากการสำรวจผู้ประกอบการพลาสติกจำนวน 12 ราย

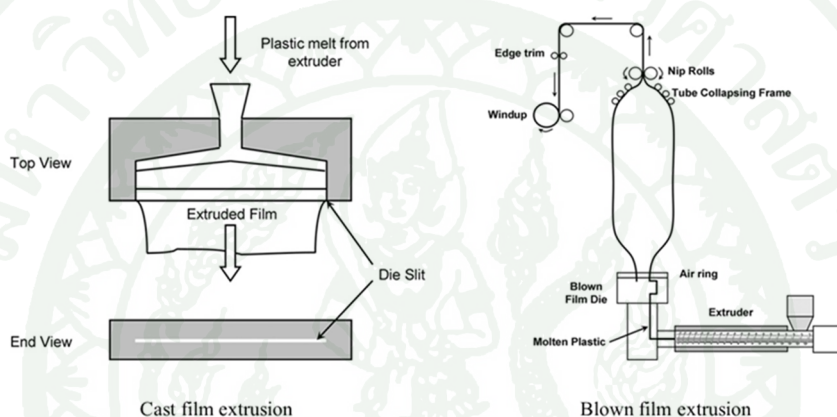
ที่มา: สถาบันพลาสติก (2555)

8.1 กระบวนการหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์ม

การขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการอัดรีดเป็นเทคนิคเดียวกับการขึ้นรูปด้วยการเอกซ์ทรูด โดยพลาสติกหลอมเหลวจะถูกอัดรีดผ่านหัวดายที่มีลักษณะกว้าง และมีความสูงน้อยมาก จากนั้นแผ่นพลาสติกจะถูกดึงด้วยลูกกลิ้งที่มีการหล่อเย็นเพื่อให้เกิดเป็นฟิล์ม ข้อดีของกระบวนการหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์ม คือ ได้ฟิล์มพลาสติกที่ใส ความหนาสม่ำเสมอ และอัตราเร็วในการผลิตสูง

8.2 กระบวนการเป่าฟิล์ม

กระบวนการเป่าฟิล์มเป็นกระบวนการที่มีการใช้งานทั่วไปสำหรับการผลิตฟิล์มพลาสติก โดยมีการเทคนิคเดียวกับการขึ้นรูปด้วยการเอกซ์ทรูดเช่นเดียวกับกระบวนการหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์ม แต่พลาสติกหลอมเหลวจะถูกอัดรีดผ่านหัวตายที่มีลักษณะเป็นรูปวงแหวน ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นท่อกลวงซึ่งเกิดจากการขยายออกโดยเป่าอากาศเข้าไปภายใน ข้อดีกระบวนการเป่าฟิล์ม คือ ควบคุมความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางของฟิล์มได้



ภาพที่ 9 การผลิตแผ่นฟิล์มด้วยการอัดรีดขึ้นรูป

ที่มา: Massey (2012)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ Hamad *et al.* (2011) ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ตั้งต้นในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิโพรพิลีน (PLA/PP) ที่มีต่อสมบัติทางการไหลและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม โดยทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว และทำการเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิโพรพิลีนเป็น 100:0 70:30 50:50 30:70 และ 100:0 โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่าพอลิเมอร์ผสมในสภาวะหลอมเหลวจะมีพฤติกรรมการไหลที่มีลักษณะเป็นแบบซูโดพลาสติก (pseudo plastic) และความหนืดของพอลิเมอร์ผสมมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับแรงเฉือน (shear-sensitivity) ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์บริสุทธิ์ ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าใกล้เคียงกับความหนืดของพอลิแลคติกแอซิดแต่มีค่าต่ำกว่าความหนืดของพอลิโพรพิลีน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมมีความสามารถในการขึ้นรูปที่ดีกว่าพอลิ

โพรพิลีน ในส่วนของสมบัติเชิงกลพบว่าในระบบของพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณของพอลิแลคติกแอซิดเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่าพอลิเมอร์ผสมมีค่าความเค้น ณ จุดขาด (stress at break) กับค่าความเครียด ณ จุดขาด (strain at break) ที่ต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิดและพอลิโพรพิลีน โดยเมื่อปริมาณของพอลิแลคติกแอซิดเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเครียดและค่าความเค้น ณ จุดขาดมีค่าลดลง แต่เมื่อปริมาณของพอลิแลคติกแอซิดมากกว่าร้อยละ 50 พบว่าค่าทั้งสองข้างต้นกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งกราฟระหว่างความเค้นกับความเครียด (stress-strain curve) แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันไม่ได้ (immiscible) ของพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิโพรพิลีน เนื่องจากที่ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่ากฎของการผสม (line of mixing rule)

ผลของความเข้ากันได้ระหว่างสารประกอบในพอลิเมอร์ผสมที่มีต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology) สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน ได้ถูกศึกษาโดย Choudhary *et al.* (2011) ซึ่งทางคณะผู้วิจัยได้ทำการผสมสารองค์ประกอบคือ พอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดด้วยวิธีการผสมแบบหลอมเหลว (melt-blending) พร้อมทั้งมีการใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (polypropylene-g-maleic anhydride: PP-g-MA) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ ซึ่งพบว่าการเติมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จะส่งผลให้ค่ามอดุลัสแรงดึง (tensile modulus) ค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และค่าความต้านทานแรงดัดโค้ง (flexural strength) ของวัสดุมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้การเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้จะทำให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้นอีกด้วย จากการทดสอบด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีได้ยืนยันการเกิดพันธะการยึดเหนี่ยว (interfacial bonds) ระหว่างพอลิโพรพิลีนพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และพอลิแลคติกแอซิด โดยลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมีลักษณะที่เกิดการแยกเฟส (bi-phase) ระหว่างพอลิโพรพิลีนและพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งสารเพิ่มความเข้ากันได้จะทำหน้าที่เชื่อมระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดทำให้เฟสที่เกิดการกระจายตัว (dispersed phase) สามารถเกิดการกระจายตัวในเนื้อพื้น (matrix phase) ได้ดียิ่งขึ้น

Kim *et al.* (2004) ได้ทำการศึกษาผลของการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่มีต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสมบัติการต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low-density polyethylene: LDPE) ในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำการผสมด้วยกระบวนการแบบหลอม (melt-mixing) และมีการใช้พอลิเอทิลีนไกลซิไดลเมทาคริเลต (polyethylene-glycidyl methacrylate: PE-GMA) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมพบว่า เมื่อปริมาณของพอลิเอทิลีนไกลซิไดลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้นจะทำให้เฟสที่เกิดการกระจายตัวหรือพอลิเอทิลีนมีขนาด (domain size) ที่ลดลง

และเกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้น ในส่วนของผลจากการทดสอบด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ของไฮโดรเจนนิวเคลียสหรือโปรตอน ($^1\text{H-NMR}$ spectroscopy) ได้ยืนยันการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างพอลิแลคติกแอซิด สารเพิ่มความเข้ากันได้และโคพอลิเมอร์ นอกจากนี้การเติมพอลิเอทิลีนไกลคอลเมทาคริเลตยังไปเพิ่มสมบัติการต้านทานต่อแรงดึง โดยค่าความเค้นสูงสุดมีค่าสูงขึ้น และค่าความเครียด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ในขณะที่สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

ในงานวิจัยของ Yoo *et al.* (2010) ได้ทำการศึกษาค่าของชนิดของสารเพิ่มความเข้ากันได้ และปริมาณของสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและการเกิดไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดในอัตราส่วนเท่ากับ 80:20 โดยน้ำหนัก โดยในการทดลองได้ทำการศึกษาค่าความเข้ากันได้จำนวน 2 ชนิดคือ พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์และสไตรีน-เอทิลีน-บิวไทลีน-สไตรีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (styrene-ethylene-butylene-styrene-g-maleic anhydride: SEBS-g-MAH) ในปริมาณ 1 3 5 7 และ 10 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ทั้งสองชนิด จะไปทำให้ขนาดของพอลิแลคติกแอซิดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวของเฟสที่เกิดการกระจายตัวในเนื้อพื้นที่ดีขึ้น จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมก่อนการไฮโดรไลซิสพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมจะมีค่าสูงสุดเมื่อมีการเติมพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณเท่ากับ 3 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน แต่ค่าความต้านทานการกระแทก (impact strength) มีค่าค่อนข้างไม่เปลี่ยนแปลง โดยการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานแรงดึงอาจเกิดจากการที่พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ตั้งต้น และหลังการไฮโดรไลซิสพบว่าปริมาณของพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่เพิ่มขึ้นนั้นมีผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความต้านทานการกระแทก ในขณะที่การเติมสไตรีน-เอทิลีน-บิวไทลีน-สไตรีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงมีค่าลดลงและค่าความต้านทานการกระแทกมีค่าสูงขึ้นทั้งก่อนและหลังการไฮโดรไลซิส โดยคณะผู้วิจัยได้สรุปว่าพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เหมาะสมสำหรับระบบที่ต้องการเพิ่ม ค่าความต้านทานแรงดึง ส่วนสไตรีน-เอทิลีน-บิวไทลีน-สไตรีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารที่เหมาะสมกับระบบที่ต้องการเพิ่มค่าความต้านทานการกระแทก นอกจากนี้ผลจากการศึกษาความเข้ากันได้พบว่าที่ 3 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน ของพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีค่าความตึงผิว (interfacial tension) ที่ต่ำที่สุด โดยผลดังกล่าวเป็นการแสดงถึงระดับความเข้ากันได้ (degree of compatibilization) ที่ดีที่สุด ซึ่งมี

ความสอดคล้องกับผลจากค่าความต้านทานแรงดึงที่มีค่าสูงที่สุดเมื่อใช้พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลือก แอนไฮโดรไลนปริมาณ 3 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน

Reddy *et al.* (2008) ทำการเตรียมเส้นใยผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิโพรพิลีน ในอัตราส่วนเท่ากับ 100:0 80:20 50:50 20:80 และ 0:100 เพื่อทำการเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดไฮโดรไลซิสและความสามารถในการย้อมติดสี (dyeability) เส้นใยผสมได้ถูกนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา โครงสร้างทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลรวมไปถึงความต้านทานต่อการไฮโดรไลซิสและการย่อยสลายทางชีวภาพของเส้นใย ซึ่งพบว่าความเหนียวที่จุดขาด (breaking tenacity) ของเส้นใยผสมมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ ในส่วนของค่าการยืดตัวมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าความเหนียวที่จุดขาด ซึ่งเกิดจากการที่เส้นใยผสมไม่เกิดลักษณะแบบเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ (completely compatible) จึงไม่สามารถเกิดการยืดออกได้อย่างสมบูรณ์เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์บริสุทธิ์ จากผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า การเติมพอลิโพรพิลีนลงในพอลิแลคติกแอซิดจะทำให้อุณหภูมิการหลอมเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ทั้งสองมีความเข้ากันได้ส่วนหนึ่ง (partially compatible) นอกจากนี้พบว่าเส้นใยผสมมีความต้านทานต่อการเกิดไฮโดรไลซิสที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิดโดยเส้นใยผสมจะมีการลดลงของความแข็งแรง (strength) ภายหลังการเกิดไฮโดรไลซิสที่ต่ำกว่าและความสามารถในการย่อยสลายจะลดลงเมื่อปริมาณของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีความต้านทานต่อจุลินทรีย์ที่มากกว่าและอาจทำหน้าที่ป้องกันพอลิแลคติกแอซิดจากการย่อยสลายเป็นผลให้เส้นใยผสมมีความสามารถในการเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพที่ต่ำกว่าเส้นใยพอลิแลคติกแอซิด

Esthappan *et al.* (2012a) ได้ทำการสังเคราะห์นาโนไททาเนียมไดออกไซด์และเตรียมเป็นฟิล์มนาโนคอมโพสิตกับพอลิโพรพิลีนเพื่อศึกษาผลของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน ซึ่งพบว่าค่าความต้านทานแรงดึงและมอดุลัสของฟิล์มทั้งก่อนและหลังการศึกษาศสมบัติการทนทานต่อความร้อน (thermal ageing) จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจนถึงร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก แต่จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์มากกว่าร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก การเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานแรงดึงและมอดุลัสเมื่อมีการเติมไททาเนียมไดออกไซด์เป็นผลจากการที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคนาโนกับพอลิเมอร์สามารถถ่ายเทความเครียด (transfer stress) ที่เกิดขึ้นได้ แต่เมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้นจะก่อให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (aggregation) ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคนาโนกับพอลิเมอร์น้อยลงและเกิดเป็นจุดบกพร่องภายในคอมโพสิตเป็นผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มลดลง จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนพบว่า

การเติมอนุภาคนาโนช่วยเพิ่มความเสถียรทางความร้อนจากการที่สารตัวเติมเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลเมื่อได้รับความร้อน โดยที่อัตราการสลายตัว (degradation rate) และอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการสลายตัว (onset of degradation) มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณอนุภาคนาโนเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Esthappan *et al.* (2012b) ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อสมบัติเชิงกล ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและเสถียรภาพทางความร้อนของเส้นใยพอลิพรพิลีน โดยพบว่าค่าความเหนียวมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากผลของการเสริมแรงที่มากขึ้น แต่ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นและค่าลดลงเมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนมีมากกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในส่วนสมบัติทางความร้อนพบว่าเส้นใยจะมีอุณหภูมิเริ่มเกิดการสลายตัวที่สูงขึ้นเมื่อมีการเติมไททาเนียมไดออกไซด์และปริมาณผลึกของเส้นใยจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการที่อนุภาคนาโนประพฤติตัวเป็นสารก่อผลึก (nucleating agents) จึงทำให้เส้นใยมีปริมาณผลึกที่สูงขึ้น

Zhou *et al.* (2009) ทำการศึกษาผลของปริมาณนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลและสมบัติการสกัดกั้นของฟิล์มจากเวย์โปรตีน (whey protein isolate: WPI) ซึ่งพบว่าเมื่อใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จะทำให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นแต่มีสมบัติการสกัดกั้นที่ต่ำลง ตรงข้ามกับการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนักที่ส่งผลให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำลงและมีสมบัติการสกัดกั้นที่ดีขึ้น สมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึงที่ลดลงเมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนมีค่ามากกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดยอาจเป็นผลมาจากการกระจายตัวของอนุภาคนาโนมีลักษณะแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneous distribution) และเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของเฟสที่อยู่ในฟิล์มโปรตีน ในด้านความสามารถในการซึมผ่านของน้ำในฟิล์มโปรตีนพบว่าการเติมอนุภาคนาโนในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนักจะทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor permeability: WVP) มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนจากการลดลงของการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุล (cross-linking) ของฟิล์มโปรตีน ในขณะที่การเติมอนุภาคนาโนในปริมาณมากกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนักจะทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าลดลงเป็นผลมาจากการที่นาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีลักษณะที่ไม่ชอบน้ำหรือไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) มากกว่าโปรตีน โดยทางผู้วิจัยได้ทำการสรุปว่าปริมาณการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมคือร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเพื่อให้มีความสมดุลระหว่างสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลและสมบัติการสกัดกั้น

Kim *et al.* (2008) ได้ทำการพัฒนาวิธีในการทดสอบความสามารถในการความสามารถในการต้านจุลินทรีย์ (antimicrobial activity testing) โดยศึกษาประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์ของไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งพบว่าจำนวนเริ่มต้นของเชื้ออีโคไล (*Escherichia coli*: *E. coli*) ที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาคือ 10^6 ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร (CFU/ml) เนื่องจากมีการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้ออีโคไลที่มากที่สุด ทำให้ง่ายต่อการประมาณความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก (photocatalytic activity) ของไททาเนียมไดออกไซด์ ในส่วนของความเข้มแสง (light intensities) และเวลาในการฉายแสง (irradiation time) พบว่าค่าที่เหมาะสมคือ 1.0 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2) และ 3 ชั่วโมง ตามลำดับ

จากงานวิจัยของ Chawengkijwanich and Hayata (2008) ทำการศึกษาสมบัติในการต้านเชื้ออีโคไลของฟิล์มพอลิโพรพิลีน (oriented-polypropylene: OPP) ที่มีการเคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์และทำการศึกษาศักยภาพในการต้านจุลินทรีย์ของฟิล์มด้วยวิธีแบบ *In vitro* test และ actual test ซึ่งผลการทดลองจากทั้ง 2 วิธีพบว่าฟิล์มที่มีการเคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์มีความสามารถในการต้านจุลินทรีย์ที่ดีกว่า โดยมีการลดลงของเชื้ออีโคไลที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่มีการเคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ และพบว่าประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์ของฟิล์มไม่ขึ้นกับขนาดของอนุภาค นอกจากนี้ในการทดสอบแบบ *In vitro* test ภายใต้การให้แสงยูวีเอ (ultraviolet A: UVA) โดยใช้หลอดไฟแบบแบคไลท์ (black-light) และเดย์ไลท์ฟลูออเรสเซนต์ (daylight fluorescent) พบว่าฟิล์มภายใต้แสงจากหลอดไฟเดย์ไลท์ฟลูออเรสเซนต์จะได้รับแสงที่มีความเข้มต่ำกว่า เป็นผลให้มีความสามารถในการต้านจุลินทรีย์ที่ลดลงเนื่องจากความเข้มแสงที่สูงจะมีการเกิดของอนุมูลไฮดรอกซิลที่มากกว่า ซึ่งการยับยั้งการเจริญเติบโตจุลินทรีย์เป็นผลมาจากทั้งกระบวนการโฟโตแคตาไลติก (photocatalytic disinfection) ของไททาเนียมไดออกไซด์และการกระตุ้นด้วยแสง (photo-activation) จากแสงยูวีเอในกระบวนการโฟโตแคตาไลติกนั้น อนุมูลไฮดรอกซิลและอนุพันธ์ออกซิเจนซึ่งว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (reactive oxygen species: ROS) ที่เกิดขึ้นจะเข้าไปทำลายจุลินทรีย์โดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) กับสารประกอบภายในเยื่อหุ้มเซลล์ ส่วนในกระบวนการกระตุ้นด้วยแสงนั้นเซลล์แบคทีเรียจะถูกทำลายโดยการเกิดสภาวะความเครียดจากอนุมูลออกซิเจน (oxidative stress) ที่อยู่ภายใน

Xing *et al.* (2012) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติการต้านจุลินทรีย์สมบัติเชิงกล และสมบัติการสกัดกันของฟิล์มพอลิเอทิลีนที่มีการเติมนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีการดัดแปรพื้นผิวด้วยไททาเนียมแอสเตอ (titanium acid ester) ในปริมาณเท่ากับร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยพบว่าไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวจะขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าและมีการรวมตัวกัน

เป็นกลุ่มก้อนที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิว ซึ่งฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคนาโนทั้งที่ผ่านและไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิวจะมีความสามารถในการต้านเชื้ออีโคไลที่ต่ำกว่า เชื้อสตาฟิโลค็อกคัส ออเรียส (*Staphylococcus aureus: S. aureus*) และความสามารถในการต้านแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการฉายรังสียูวี ในส่วนของสมบัติเชิงกลและสมบัติการสกดกัน พบว่าการเติมอนุภาคนาโนจะทำให้ฟิล์มมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดที่สูงขึ้นและมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการเติมไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวจะทำให้ฟิล์มมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดและมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำสูงกว่าฟิล์มที่มีการเติมอนุภาคนาโนที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิว

Habibi *et al.* (2010) ศึกษาสมบัติการต้านจุลินทรีย์ของฟิล์มบางและฟิล์มคอมพอสิตนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้ออีโคไล เชื้อสตาฟิโลค็อกคัส ออเรียส และเชื้อกลุ่มบาซิลลัส (*Bacillus species*) จากผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของฟิล์มบางและฟิล์มคอมพอสิตนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีค่าต่ำกว่าการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ด้วยรังสียูวีเพียงอย่างเดียว โดยร้อยละการอยู่รอด (% survival) ของเชื้ออีโคไลที่มีการใช้รังสียูวีเพียงอย่างเดียวเท่ากับ 3.2 ในขณะที่การใช้ฟิล์มคอมพอสิตนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับรังสียูวีมีร้อยละการอยู่รอดของเชื้ออีโคไลเท่ากับ 91 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่รังสียูวีมีโอกาที่ทำให้เกิดการกลายพันธุ์ของเชื้อแบคทีเรีย

Kim *et al.* (2003) ศึกษาผลของปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์และระยะเวลาในการฉายรังสียูวีที่มีต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ก่อโรคจากอาหาร (food-borne pathogenic bacteria) ได้แก่ เชื้อซาลโมเนลล่า (*Salmonella choleraesuis*) เชื้อวibriโอ พาราฮีโมไลติคัส (*Vibrio parahaemolyticus*) และ เชื้อลิสทีเรีย โมโนไซโตจิเนส (*Listeria monocytogenes*) โดยพบว่าผลจากการฆ่าเชื้อ (bactericidal) ด้วยไททาเนียมไดออกไซด์ของสารละลายจุลินทรีย์ทั้งสามชนิดภายหลังการฉายรังสียูวีมีค่ามากกว่าระบบที่ไม่มีไททาเนียมไดออกไซด์ เมื่อปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์และระยะเวลาในการฉายรังสียูวีเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าอัตราการตายของเชื้อแบคทีเรียจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์มากกว่า 1.25 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (mg/ml) และเชื้อแบคทีเรียตายอย่างสมบูรณ์เมื่อผ่านการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทั้งนี้เชื้อลิสทีเรีย โมโนไซโตจิเนสมีความทนทานมากกว่าเชื้อแบคทีเรียชนิดอื่น เนื่องจากมีร้อยละการอยู่รอด 13 ภายหลังจากผ่านการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในขณะที่เชื้อซาลโมเนลล่า และ เชื้อวibriโอ พาราฮีโมไลติคัสมีความทนทานที่ต่ำกว่า โดยเกิดการตายอย่างสมบูรณ์เมื่อผ่านการฉายรังสียูวีเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

Bodaghi *et al.* (2012) ศึกษาประสิทธิภาพในการยับยั้งการเติบโตของเชื้อกลุ่มซูโดโมนาส (*Pseudomonas spp.*) และ เชื้อ *Rhodotorula mucilaginosa* ของฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีการเติมไททาเนียมไดออกไซด์ โดยมีการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกผสมระหว่างอะนาเทสกับรูไทล์ในอัตราส่วน 7 ต่อ 3 โดยน้ำหนัก ในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และทำการเตรียมฟิล์มคอมพอสิตด้วยวิธีการผสมแบบหลอม จากผลการทดลองพบว่าเชื้อกลุ่มซูโดโมนาสมีจำนวนลดลงจากจำนวนเริ่มต้นในปริมาณเท่ากับ $1.35 \log \text{CFU/ml}$ และ $4 \log \text{CFU/ml}$ สำหรับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ไม่มีการเติมและมีการเติมไททาเนียมไดออกไซด์ ในขณะที่เชื้อ *Rhodotorula mucilaginosa* มีจำนวนลดลงจากจำนวนเริ่มต้นเท่ากับ $2 \log \text{CFU/ml}$ สำหรับฟิล์มคอมพอสิตไททาเนียมไดออกไซด์ และลดลงเท่ากับ $0.64 \log \text{CFU/ml}$ สำหรับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ภายหลังการฉายรังสียูวีที่ความเข้ม 1 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยกลไกการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่างแสงยูวีกับฟิล์มคอมพอสิตไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีสมบัติในการเป็นฟิล์มโฟโตคาตาไลสต์

Chung *et al.* (2009) ศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงต่อสมบัติด้านการต้านเชื้ออีโคไล และ เชื้อสตาฟิโลค็อกคัส ออเรียส ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง 2 ชนิด คือ หลอดฟลูออเรสเซนต์ และหลอดแบคไไลท์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากลไกการต้านจุลินทรีย์ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์จะเกิดขึ้นเมื่อถูกกระตุ้นโดยแหล่งกำเนิดแสงที่ให้พลังงานมากกว่าแถบช่องว่างพลังงานของไททาเนียมไดออกไซด์ โดยหลอดแบคไไลท์จะมีการปลดปล่อยรังสียูวีในช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ 365 นาโนเมตร ซึ่งให้ค่าพลังงานที่มากกว่าแถบช่องว่างพลังงานของไททาเนียมไดออกไซด์และพลังงานที่ถูกปลดปล่อยจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ทั้งนี้ทำให้การต้านจุลินทรีย์ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยหลอดแบคไไลท์มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า

Muranyi *et al.* (2010) ทำการพัฒนาศรเคลือบต้านจุลินทรีย์ฐานไททาเนียมไดออกไซด์ โดยทำการเคลือบไททาเนียมไดออกไซด์ลงบนสไลด์แก้ว (glass slide) ด้วยวิธีการโซลเจล (sol-gel method) และศึกษาการลดลงของเชื้อแอสเพอร์จิลลัส ไนเจอร์ (*Aspergillus niger*) เชื้อ *Bacillus atrophaeus* และเชื้อโคคูเรียไรโซฟีลา (*Kocuria rhizophila*) สำหรับเชื้อโคคูเรียไรโซฟีลามีการลดลงของเชื้อมากกว่า $3.3 \log_{10}$ ภายใต้อการฉายรังสียูวีเอ (UV-A) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของสภาวะในการทดลองอื่นๆ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) และความเข้มของการฉายแสง (radiation intensity) โดยพบว่าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นทำให้การยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นและส่งผลต่อประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์ของไททาเนียมไดออกไซด์

ผลของความเข้มของการฉายแสงถูกศึกษาด้วยการลดระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับตัวอย่าง โดยเมื่อระยะห่างดังกล่าวลดลงทำให้ความเข้มแสงที่ตกกระทบตัวอย่างมีค่าสูงขึ้นและเป็นผลให้จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่ลดลงมีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นนี้อาจไม่ได้เป็นผลมาจากปฏิกิริยาโฟโตคาตาไลติกของไททาเนียมไดออกไซด์ แต่เป็นผลมาจากการความเข้มแสงยูวีที่สูงขึ้น

Prasad *et al.* (2009) ศึกษาประสิทธิภาพในการต้านเชื้อ *Bacillus anthracis* ด้วยการใช้นาโนไททาเนียมไดออกไซด์และรังสียูวีเอในการทดสอบ โดยพบว่าระยะเวลาในการฉายแสง (time of exposure) ปริมาณของตัวเร่ง (quantity of catalyst) ความเข้มแสง (intensity of light) และขนาดของอนุภาค (particle size) มีผลต่อการยับยั้งการเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งอัตราในการยับยั้งการเติบโตของเชื้อ *Bacillus anthracis* มีค่ามากขึ้นมีการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกผสมระหว่างอะนาเทสกับรูไทล์ นอกจากนี้พบว่าเมื่อปริมาณของตัวเร่งและความเข้มของแสงยูวีเอมากขึ้นส่งผลให้เกิดการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ดีขึ้น อีกทั้งประสิทธิภาพในการต้านเชื้อของไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปของอนุภาคนาโนจะดีกว่าการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ (bulk sized)

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะนำพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดและนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มาเป็นวัตถุดิบในการเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตสำหรับผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์ โดยมีการใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์พอลิโพรพิลีนเป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ เพื่อให้ฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่ได้มีสมบัติทางเคมี สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติในการต้านจุลินทรีย์ที่เหมาะสม ซึ่งการใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดจะทำให้ฟิล์มที่ได้มีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ ส่วนการเติมนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จะเพิ่มความสามารถในการต้านจุลินทรีย์ อีกทั้งยังเข้าไปเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของฟิล์มอีกด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1.1 เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีน (EL-PRO™ P600F, SCG Plastics Company)
- 1.2 พอลิแลคติกแอซิด (Ingeo™ Biopolymer 4043D, NatureWorks)
- 1.3 พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Fusabond® P613, DuPont™)
- 1.4 นาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium(IV) oxide 634662, SIGMA-ALDRICH)
- 1.5 เชื้อจุลินทรีย์ *Enterococcus faecalis* และ *Escherichia coli*

2. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างการทดลอง วิเคราะห์และทดสอบ

- 2.1 เครื่องผสมสีพลาสติก (colour mixer: Model BSH, Bosco engineering, Thailand)
- 2.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder: Model Labtech Engineering LTE 20-40, Thailand)
- 2.3 เครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์ม (cast film extruder: Model 5-layer-flat-film & sheet coextrusion line, COLLIN®, Germany)
- 2.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก (sartorius analytical balances: Model CP 224S, Sartorius AG, Germany)
- 2.5 ตู้อบลมร้อน (hot air oven: Binder Model ED53/E2, Scientific Promotion Co., Ltd., Thailand)
- 2.6 เครื่องมือวัดความหนา (hand-held micrometer: Model ID-C112BS, Mitutoyo, Japan)
- 2.7 หลอดแบคไลท์ (TL-D Blacklight Blue: TL-D 18W BLB 1SL, Philips)
- 2.8 ตู้ทดสอบความคงสภาพของตัวอย่างในการควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (climate test chambers: binder Model KEF 720, Scientific Promotion Co., Ltd., Thailand)

2.9 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (fouriertransform infrared spectrometer: FTIR, Model Bruker TENSOR 27 GmbH, Germany)

2.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM, Model JSM-6610LV JEOL, United States)

2.11 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (light microscope: LM, AxioLab, Carl Zeiss Microscopy, LLC.)

2.12 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรสโกปี (x-ray diffraction spectroscopy: XRD, Model broker axs advanced x-ray solutions GmbH Broker, Germany)

2.13 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter: DSC, Model Mettler Toledo DSC1 STARe SYSTEMS, Switzerland)

2.14 เครื่องวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักโดยใช้ความร้อน (thermogravimetric analyzer: TGA, Model Mettler Toledo TGA/DSC1 STARe, Switzerland)

2.15 เครื่องทดสอบแรงดึง (instron universal testing machine: Model 5965 Instron Co., Ltd, Thailand)

2.16 เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน (oxygen permeability tester: Model 8500 oxygen permeable analyzer llinois instruments)

2.17 ชุดเครื่องมือทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

วิธีการ

1. फिल्मพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด

1.1 การเตรียมฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด (ภาคผนวก ก)

ในขั้นแรกนำเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนและพอลิแลคติกแอซิดมาทำการอบไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมงก่อนการใช้งาน จากนั้นทำการเตรียมเป็นเม็ด คอมปาวด์ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างพอลิโพรพิลีนกับ พอลิแลคติกแอซิดเป็นร้อยละ 60:40 50:50 และ 40:60 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีการใช้พอลิ โพรพิลีนกราฟต์มาเลอิคแอนไฮไดรด์เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ปริมาณคงที่ที่ 3 ส่วนโดยน้ำหนักต่อ

หนึ่งร้อยละของเรซิน ดังแสดงในตารางที่ 4 จากนั้นนำเม็ดคอมปาวด์ที่ได้มาทำการเป่าขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์ม

ตารางที่ 4 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด

ชิ้นงานทดสอบ	องค์ประกอบ		
	PP (wt%)	PLA (wt%)	PP-g-MA (phr)
PP	100	0	0
PLA	0	100	0
PP/PLA (60:40)	60	40	3
PP/PLA (50:50)	50	50	3
PP/PLA (40:60)	40	60	3

1.2 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด

1.2.1 ทดสอบสมบัติทางเคมีศึกษาเอกลักษณ์โครงสร้างทางเคมีและความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ โดยทำการทดสอบในช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ (ภาคผนวก ข)

1.2.2 ทดสอบสมบัติทางกายภาพศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและลักษณะผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (ภาคผนวก ค)

1.2.3 ทดสอบสมบัติทางความร้อนศึกษาความเป็นผลึกและอุณหภูมิหลอมเหลวด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนิงแคลอริมิเตอร์ โดยทำการทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนคงที่เท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ส่วนเสถียรภาพทางความร้อนด้วยจะทำการศึกษาด้วยเครื่องวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักโดยใช้ความร้อน ซึ่งทำการทดสอบโดยใช้ช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 600 องศาเซลเซียสและใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน (ภาคผนวก ง)

1.2.4 ทดสอบสมบัติเชิงกลศึกษาความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D882 (ภาคผนวก จ)

1.2.5 ทดสอบสมบัติการสกัดกั้น ศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำด้วยวิธี cup method ตามมาตรฐาน ASTM E96 และศึกษาอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนด้วยเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (ภาคผนวก ฉ)

2. ฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

2.1 การเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (ภาคผนวก ก)

การเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมจะใช้วิธีการเช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่างดังที่ได้กล่าวไว้ในวิธีการข้อที่ 1.1 แต่จะมีการใช้พอลิพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดในอัตราส่วนที่ทำให้ได้ฟิล์มที่มีสมบัติดีที่สุด (ผลจากการทดลองในข้อที่ 1) และทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 100 นาโนเมตรเป็น 0 0.25 0.5 1.0 1.5 และ 2 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ชิ้นงาน ทดสอบ	องค์ประกอบ			
	PP (wt%)	PLA (wt%)	PP-g-MA (phr)	Nano TiO ₂ (phr)
0TiO ₂			3	0
0.25TiO ₂	ในอัตราส่วนที่ทำให้ได้ ฟิล์มที่มีสมบัติดีที่สุด (ผลจากการทดลองในข้อที่ 1)		3	0.25
0.5TiO ₂			3	0.5
1.0TiO ₂			3	1.0
1.5TiO ₂			3	1.5
2.0TiO ₂			3	2.0

2.2 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

2.2.1 ทดสอบสมบัติทางเคมีศึกษาเอกลักษณ์โครงสร้างทางเคมีด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ โดยทำการทดสอบในช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ $4000-400\text{ cm}^{-1}$ (ภาคผนวก ข)

2.2.2 ทดสอบสมบัติทางกายภาพศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และศึกษาสมบัติผลึกของตัวอย่างด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรสโกปี โดยทำการทดสอบในช่วง 0 ถึง 80 องศาของมุมที่เลี้ยวเบนสองเซต (2 Theta) ของรังสีเอกซ์ (ภาคผนวก ค)

2.2.3 ทดสอบสมบัติทางความร้อนศึกษาความเป็นผลึกและอุณหภูมิหลอมเหลวด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ โดยทำการทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนคงที่เท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักโดยใช้ความร้อน ซึ่งทำการทดสอบที่ช่วงอุณหภูมิจาก 40 ถึง 600 องศาเซลเซียส และใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน (ภาคผนวก ง)

2.2.4 ทดสอบสมบัติเชิงกลศึกษาความสามารถในการต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882 (ภาคผนวก จ)

2.2.5 ทดสอบสมบัติการสกัดกั้น ศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำด้วยวิธี cup method ตามมาตรฐาน ASTM E96 และศึกษาอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนเครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน (ภาคผนวก ฉ)

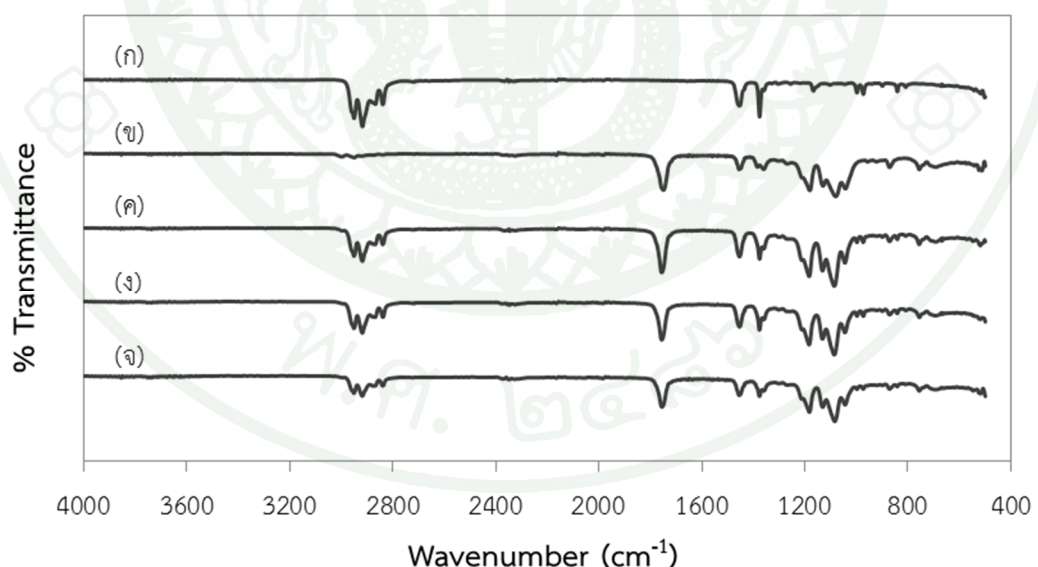
2.2.6 ทดสอบสมบัติการต้านจุลินทรีย์ศึกษาความสามารถในการต้านจุลินทรีย์ของฟิล์มนาโนคอมพอสิตโดยดัดแปลงจาก Chawengkijwanich and Hayata (2008) (ภาคผนวก ช)

ผลและวิจารณ์

1. ผลของอัตราส่วนระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

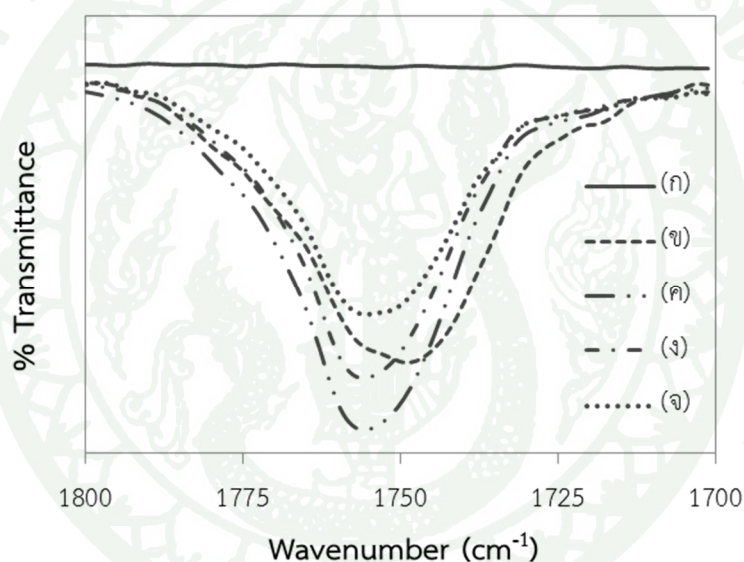
1.1 เอกลักษณ์ทางเคมีของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดด้วยเทคนิคเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

ทรานสมิตแตนซ์แบนด์ที่ตำแหน่งเลขคลื่นเท่ากับ $2950\text{--}2838\text{ cm}^{-1}$ (C-H stretching) $1455\text{--}1453\text{ cm}^{-1}$ (-CH_3 bending) และ 1376 cm^{-1} (C-H bending) แสดงถึงลักษณะเฉพาะของพอลิโพรพิลีน (Riga *et al.*, 1998) (ภาพที่ 10 (ก)) ในขณะที่ทรานสมิตแตนซ์แบนด์ที่ตำแหน่งเลขคลื่นเท่ากับ 1749 cm^{-1} (C=O stretching) 1181 cm^{-1} (symmetric C-O-C stretching) และ 1080 cm^{-1} (asymmetric CH_3) แสดงถึงลักษณะเฉพาะของพอลิแลคติกแอซิด (Hoidy *et al.*, 2010) (ภาพที่ 10 (ข)) โดยทรานสมิตแตนซ์แบนด์ดังที่กล่าวมาข้างต้นซึ่งแสดงถึงพอลิโพรพิลีนและพอลิแลคติกแอซิดถูกพบในฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม (ภาพที่ 10 (ค) (ง) และ (จ))



ภาพที่ 10 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด (ก) PP (ข) PLA (ค) PP/PLA (60:40) (ง) PP/PLA (50:50) และ (จ) PP/PLA (40:60)

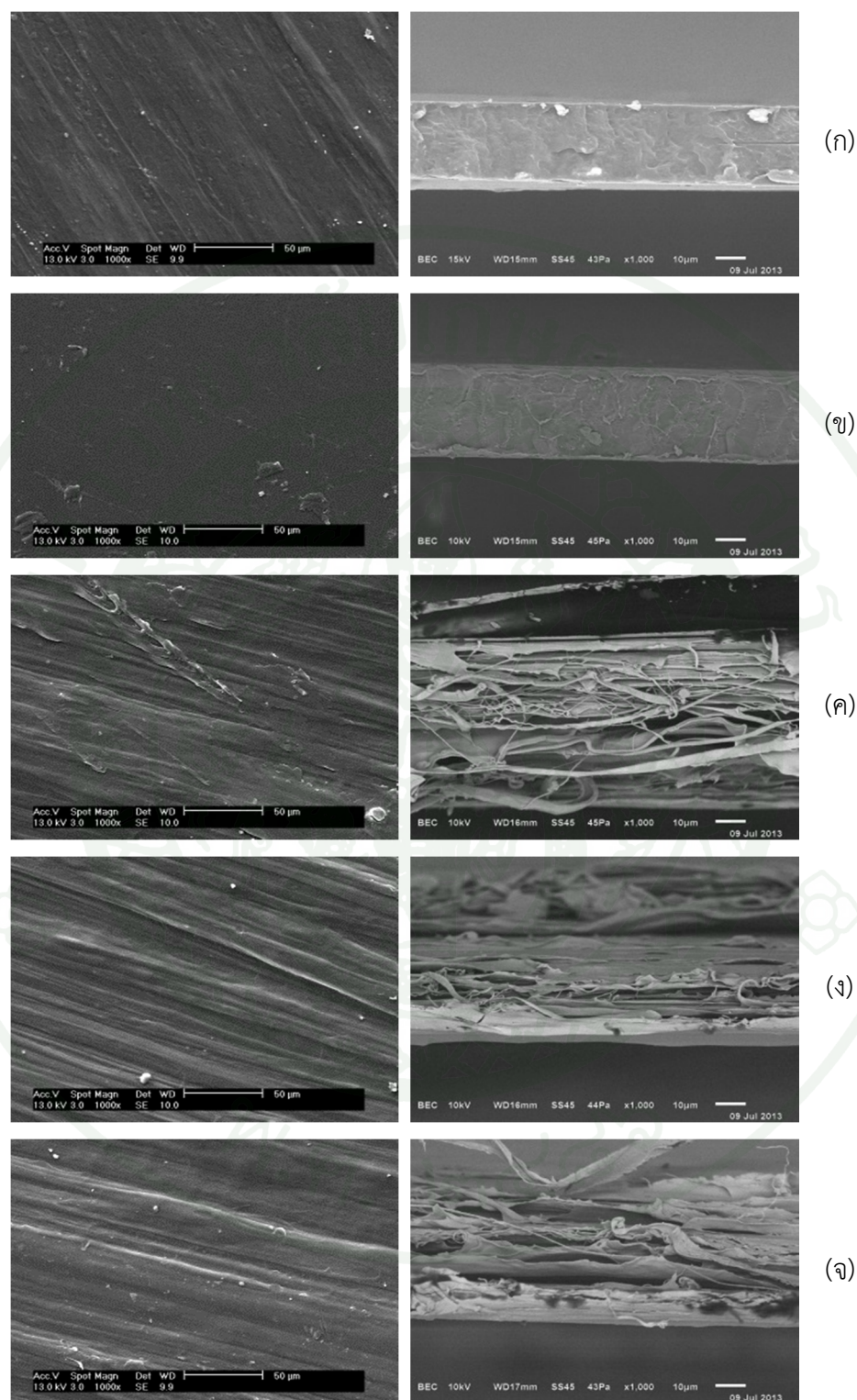
พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด โดยส่วนของพอลิโพรพิลีนในพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์มีความเข้ากันได้กับพอลิโพรพิลีน ในขณะที่ตำแหน่งกัมมันต์ (active site) ในหมู่แอนไฮไดรด์ (anhydride) สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิล (carbonyl) ในพอลิแลคติกแอซิดเกิดเป็นพันธะเอสเทอร์ (ester linkage) การหายไปของพีคแอนไฮไดรด์ของพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ตำแหน่งเลขคลื่นเท่ากับ 1800 cm^{-1} และ 1700 cm^{-1} (Bikiaris *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2011; Sclavons *et al.*, 1996) รวมทั้งการปรากฏของพีคซึ่งเป็นพันธะเอสเทอร์ที่ตำแหน่งเลขคลื่นเท่ากับ $1756\text{--}1755\text{ cm}^{-1}$ (ภาพที่ 11 (ค) (ง) และ (จ)) แสดงถึงปฏิกิริยาระหว่างพอลิโพรพิลีน พอลิแลคติกแอซิดและพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Choudhary *et al.*, 2011)



ภาพที่ 11 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด ในช่วงเลขคลื่นเท่ากับ $1800\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$ (ก) PP (ข) PLA (ค) PP/PLA (60:40) (ง) PP/PLA (50:50) และ (จ) PP/PLA (40:60)

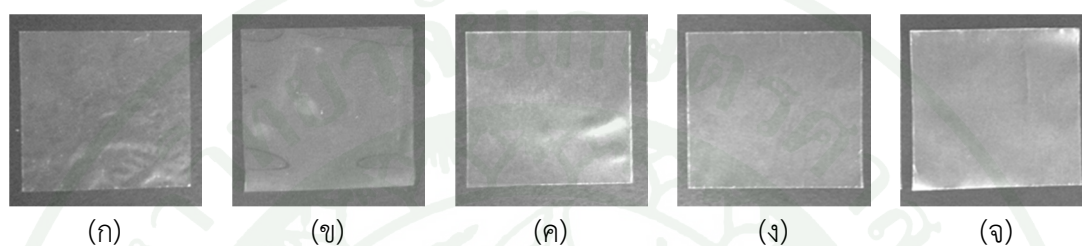
1.2 ลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด

เมื่อทำการเปรียบเทียบพื้นผิวของฟิล์มตัวอย่างพบว่าฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดมีพื้นผิวที่เรียบกว่าฟิล์มตัวอย่างชนิดอื่นและพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความขรุขระมากขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์บริสุทธิ์

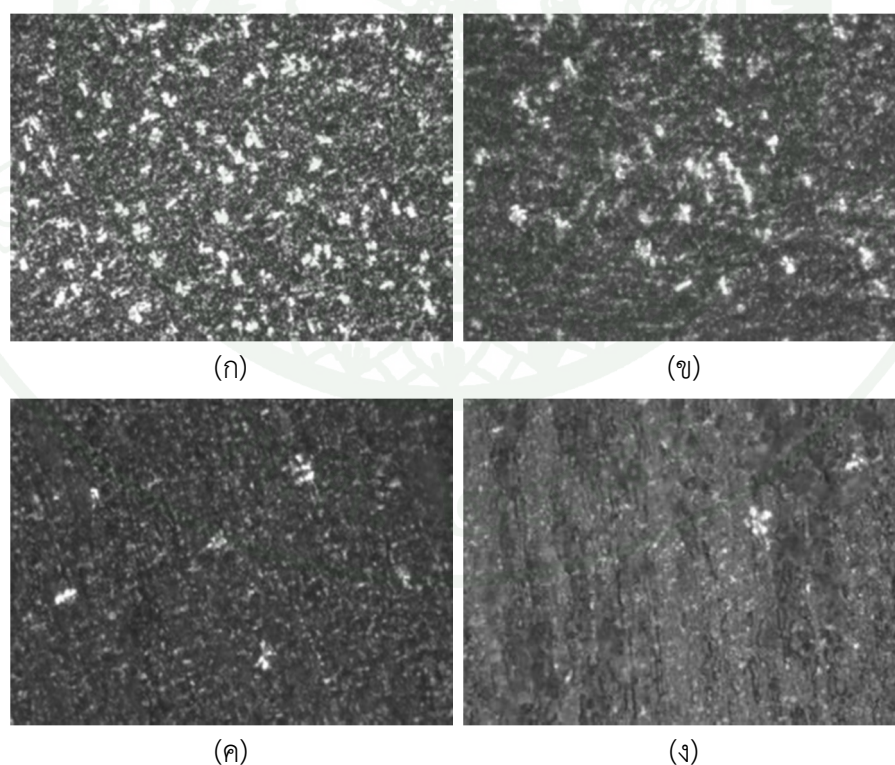


ภาพที่ 12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะทางพื้นผิว (ภาพซ้าย) และภาคตัดตามยาว (ภาพขวา) ของฟิล์มตัวอย่าง (ก) PP (ข) PLA (ค) PP/PLA (60:40) (ง) PP/PLA (50:50) และ (จ) PP/PLA (40:60)

ลักษณะแบบแยกเฟส (phase separation) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน กับพอลิแลคติกแอซิดสามารถเห็นได้ชัดเจนในภาพตัดตามยาวของตัวอย่าง (ภาพที่ 12) การแยกเฟสที่เกิดขึ้นนี้เป็นลักษณะปกติที่พบในพอลิเมอร์ผสมแบบเข้ากันไม่ได้ (immiscible polymer blends) (Kim *et al.*, 2004) จากภาพที่ 13 พบว่าฟิล์มพอลิแลคติกแอซิดมีลักษณะใสกว่าฟิล์มพอลิโพรพิลีน และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีลักษณะที่ขุ่นกว่าฟิล์มพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งสองชนิด



ภาพที่ 13 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มตัวอย่าง (ก) PP (ข) PLA (ค) PP/PLA(60:40) (ง) PP/PLA (50:50) และ (จ) PP/PLA (40:60)



ภาพที่ 14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มตัวอย่าง (ก) PP (ข) PP/PLA (60:40) (ค) PP/PLA (50:50) และ (ง) PP/PLA (40:60)

ภาพที่ 14 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาสเฟียรูไลต์ (spherulitic morphology) ของพอลิโพรพิลีนและพอลิเมอร์ผสม ในขณะที่ไม่พบลักษณะทางสัณฐานวิทยาสเฟียรูไลต์ของพอลิแลคติกแอซิด (ไม่ได้แสดงภาพ) จากภาพจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมส่งผลอย่างมากต่อปริมาณหรือความหนาแน่นของผลึก (nucleation density) โดยเมื่อสัดส่วนของพอลิแลคติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นของผลึกลดลง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่ส่วนของพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถเกิดผลึกได้ (non-crystallizable) หรือพอลิแลคติกแอซิดเข้าไปรบกวนการเกิดสเฟียรูไลต์ (spherulite formation) (Lorenzo *et al.*, 2003)

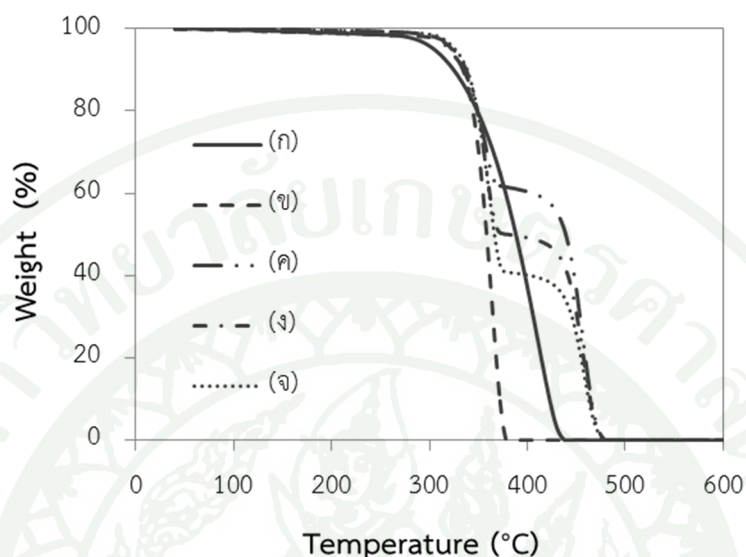
1.3 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด

ตารางที่ 6 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มตัวอย่างจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

ชิ้นงานทดสอบ	T_g (°C)	T_c (°C)	T_m (°C)	ΔH_{cc} (J/g)	ΔH_m (J/g)	$X_{c,blend}$ (%)
PP	-	117.69	159.96	-	81.93	43.37
PLA	56.00	-	154.98	30.95	31.72	0.83
PP/PLA (60:40)	52.48	118.28	157.96	3.00	60.20	38.00
PP/PLA (50:50)	53.56	118.34	156.77	9.97	58.19	34.21
PP/PLA (40:60)	53.07	118.56	154.01	14.45	55.23	31.04

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรีพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลว (melting temperature: T_m) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของพอลิแลคติกแอซิดมากขึ้น ซึ่งในระบบพอลิเมอร์ผสมที่พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งเป็นอสัณฐาน (amorphous) และอีกชนิดหนึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึก (crystalline) การมีอยู่ของส่วนที่เป็นอสัณฐานอาจก่อให้เกิดการลดลงของอุณหภูมิหลอมเหลว (Kim *et al.*, 2004) จากข้อมูลที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6 พบว่าอุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด ในขณะที่อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature: T_c) ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อสัดส่วนของพอลิแลคติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น เมื่อพิจารณาที่ปริมาณผลึก (crystallinity: X_c) พบว่ามีค่าลดลงเมื่อปริมาณของพอลิแลคติกแอซิดมีค่าสูงขึ้น โดยอาจเกิดจากการลดลงของส่วนที่

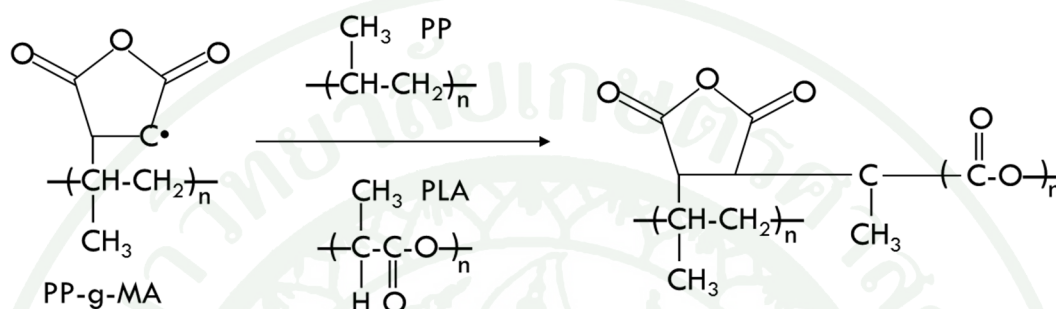
สามารถเกิดผลึกหรือพอลิโพรพิลีนและการที่ส่วนที่เป็นอสัณฐานหรือพอลิแลคติกแอซิดยับยั้งกระบวนการเกิดผลึกในระบบพอลิเมอร์ผสม (Al-Rawajfeh *et al.*, 2006)



ภาพที่ 15 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของฟิล์มตัวอย่าง (ก) PP (ข) PLA (ค) PP/PLA (60:40) (ง) PP/PLA (50:50) และ (จ) PP/PLA (40:60)

ลักษณะการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์มตัวอย่างได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 15 โดยลักษณะการสลายตัวทางความร้อนแบบ 2 ขั้นตอน (two-step degradation) ที่พบในพอลิเมอร์ผสม (ภาพที่ 15 (ค) (ง) และ (จ)) แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ผสมที่มีลักษณะแบบเข้ากันไม่ได้ (Zhou *et al.*, 2013) โดยน้ำหนักที่ลดลงของตัวอย่างในขั้นที่หนึ่งและขั้นที่สองแสดงถึงปริมาณของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมตามลำดับ เมื่อพิจารณาความเสถียรทางความร้อนพบว่าพอลิโพรพิลีน ($T_{d,onset}$ เท่ากับ 318 องศาเซลเซียส) เริ่มสลายตัวก่อนพอลิแลคติกแอซิด ($T_{d,onset}$ เท่ากับ 330 องศาเซลเซียส) และการผสมพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิโพรพิลีนส่งผลให้อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการสลายตัวมีค่าสูงขึ้น ($T_{d,onset}$ เท่ากับ 331 องศาเซลเซียส) เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีน นอกจากนี้พอลิเมอร์ผสมยังมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่กว้างขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิดและพอลิโพรพิลีน ทั้งนี้การเกิดพันธะทางกายภาพและทางเคมีระหว่างพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์กับพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อน (stability) ของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น (Abdelwahab *et al.*, 2012; Chongprakobkit *et al.*, 2007) โดยกลไกการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารองค์ประกอบในพอลิเมอร์ผสมในภาพที่ 16 แสดงให้เห็นถึงพันธะเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอนิลของพอลิ

แลคติกแอซิดกับหมู่แอนไฮไดรด์ของพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Lee and Kim, 2012) ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นใหม่นี้มีความแข็งแรงมากขึ้นและส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตามไม่พบการเปลี่ยนแปลงของเสถียรภาพทางความร้อนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด



ภาพที่ 16 กลไกการเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างพอลิโพรพิลีน พอลิแลคติกแอซิด และพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

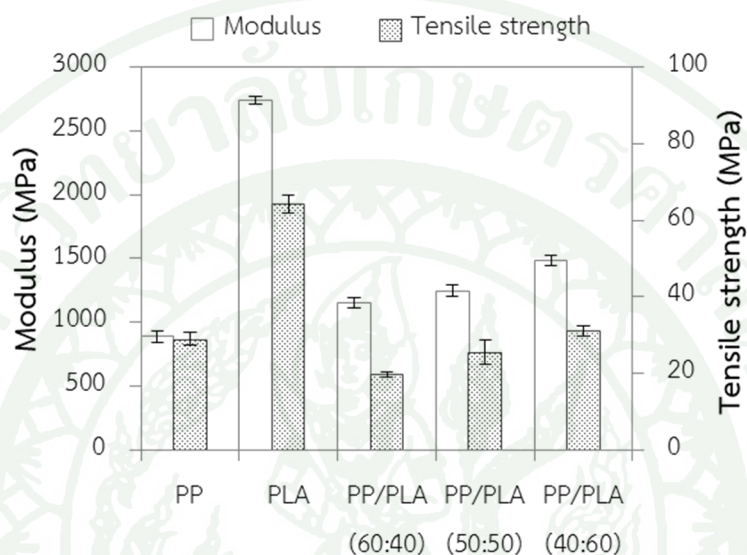
ตารางที่ 7 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

ชิ้นงานทดสอบ	$T_{d,onset}$ (°C)	$T_{d,endset}$ (°C)	Decomposition range(°C)
PP	318.54	438.36	119.82
PLA	331.51	380.54	49.03
PP/PLA (60:40)	330.73	476.05	145.83
PP/PLA (50:50)	330.17	476.15	145.98
PP/PLA (40:60)	330.24	475.93	145.69

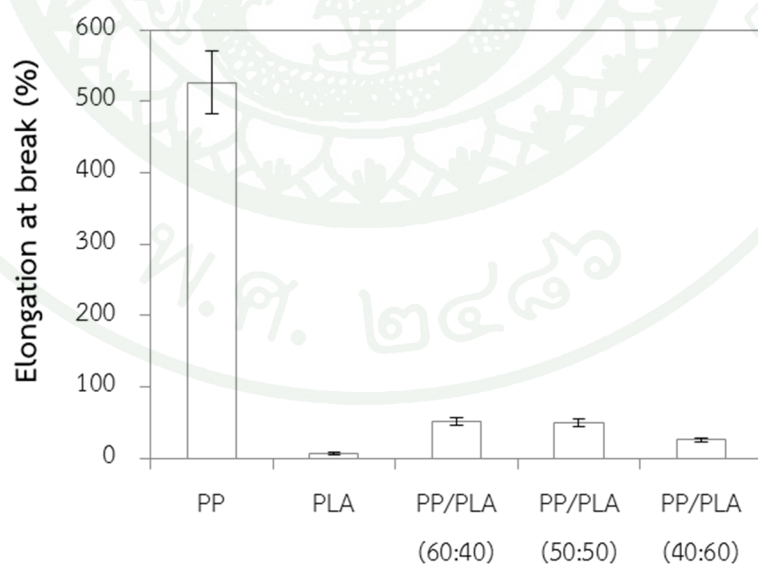
1.4 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด

จากภาพที่ 17 จะเห็นได้ว่าค่ามอดุลัสของยัง และค่าความต้านทานต่อแรงดึง มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของพอลิแลคติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมมีค่ามากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาที่ PP/PLA (60:40) พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ ซึ่งอาจเกิดจากความเข้ากันไม่ได้ที่เกิดจากลักษณะความมีขั้วที่แตกต่างกันของพอลิโพรพิลีน (nonpolar) และพอลิแลคติกแอซิด (polar) โดยการไม่เข้ากันระหว่างพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดก่อให้เกิด sharp boundaries ระหว่าง

ส่วนประกอบทั้งสองเป็นผลให้การถ่ายเทแรงที่บริเวณดังกล่าวเกิดขึ้นได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพ (Choudhary *et al.*, 2011; Yao *et al.*, 2011) ซึ่งลักษณะที่ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์แสดงให้เห็นว่าระบบพอลิเมอร์ผสมนี้เป็นพอลิเมอร์ผสมแบบเข้ากันไม่ได้ (Hamad *et al.*, 2011)



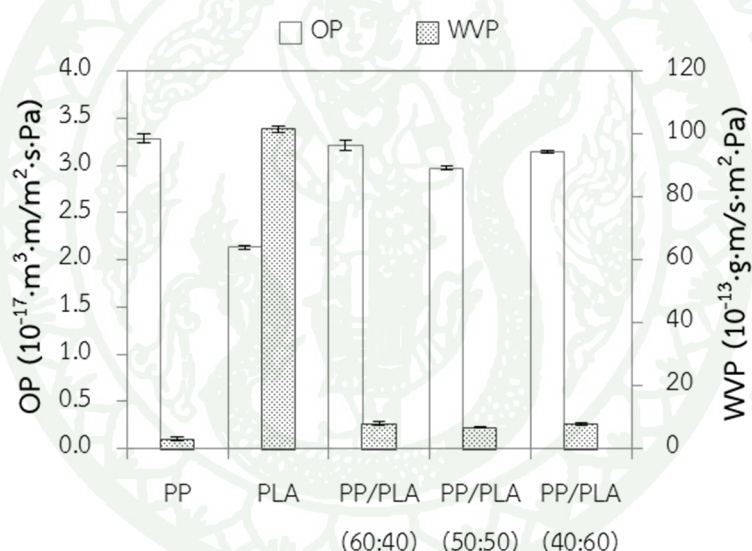
ภาพที่ 17 ค่ามอดุลัสของยัง และค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มตัวอย่าง



ภาพที่ 18 ค่าร้อยละในการยืดตัว ณ จุดขาด ของฟิล์มตัวอย่าง

ค่าร้อยละในการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มตัวอย่างในภาพที่ 18 มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของพอลิแลคติกแอซิดมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของการเปลี่ยนรูปของวัสดุจากการเสียหายแบบเหนียว (ductile) เป็นการเสียหายแบบเปราะ (brittle) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่พอลิแลคติกแอซิดมีค่าร้อยละในการยืดตัวก่อนขาดที่ต่ำกว่าพอลิโพรพิลีน และอาจเป็นผลมาจากความเข้ากันไม่ได้ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง ดังนั้นเฟสของพอลิโพรพิลีนในพอลิเมอร์ผสมจึงไม่สามารถเกิดการยืดออกได้อย่างสมบูรณ์ทำให้ค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของพอลิแลคติกแอซิดเพิ่มขึ้น (Raj *et al.*, 2001; Reddy *et al.*, 2008)

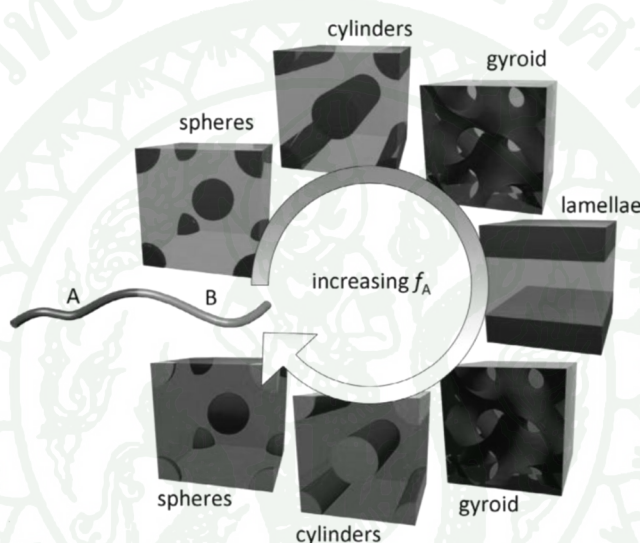
1.5 การศึกษาสมบัติการสกัดกั้นของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด



ภาพที่ 19 สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนและสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มตัวอย่าง

จากผลการศึกษาสมบัติการสกัดกั้นของฟิล์มตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของความสามารถในการสกัดกั้นแก๊สออกซิเจนและไอน้ำ โดยค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนและค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของพอลิเมอร์ผสมมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับพอลิโพรพิลีนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่ PP/PLA (50:50) พบว่าค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนและค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรอื่น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากโครงสร้างที่เป็นระเบียบ (well-dispersed structure) ของ PP/PLA (50:50) โดยโครงสร้างที่เป็น

ระเบียบในระบบพอลิเมอร์ผสมแบบเข้ากันไม่ได้สามารถเพิ่มสมบัติการสกัดกั้นโดยการเพิ่มระยะทาง (pathway length) ในการซึมผ่านของสาร (Utracki and Kamal, 2002) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของพอลิเมอร์องค์ประกอบในพอลิเมอร์ผสมจะทำให้ลักษณะโครงสร้างหรือการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ในระบบเปลี่ยนแปลงไป (ภาพที่ 20) หากอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดในระบบของพอลิเมอร์ผสมแบบเข้ากันไม่ได้อยู่ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันจะมีโอกาสทำให้เกิดโครงสร้างแบบลามลลา (lamellar structure) ที่สามารถปรับปรุงสมบัติด้านการสกัดกั้นของวัสดุ (Drobný, 2007) ในลักษณะที่คล้ายกับระบบของฟิล์มหลายชั้น (multilayer film)



ภาพที่ 20 เฟสไดอะแกรม (phase diagrams) ในระบบที่มีพอลิเมอร์ 2 ชนิด

ที่มา: Tseng and Darling (2010)

2. ผลของปริมาณนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อสมบัติของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสม

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมพบว่าอัตราส่วนระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดที่เหมาะสมคือ พอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดเท่ากับร้อยละ 50:50 โดยน้ำหนัก (PP/PLA 50:50) เนื่องจากฟิล์มที่ได้มีสมบัติการสกัดกั้นที่ดีที่สุด ซึ่งสมบัติดังกล่าวนี้อาจเข้าไปช่วยลดโอกาสในการปนเปื้อนและป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ดังนั้น PP/PLA 50:50 จึงมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานเชิงบรรจุกัมมันต์ทางการแพทย์ จากข้อสรุปดังกล่าวทาง

คณะผู้วิจัยจึงได้เลือกพอลิเมอร์ผสมสูตร PP/PLA 50:50 เป็นข้อมูลสำหรับการทดลองในขั้นต่อไป โดยได้แสดงปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ที่ใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไว้ในตารางที่ 8

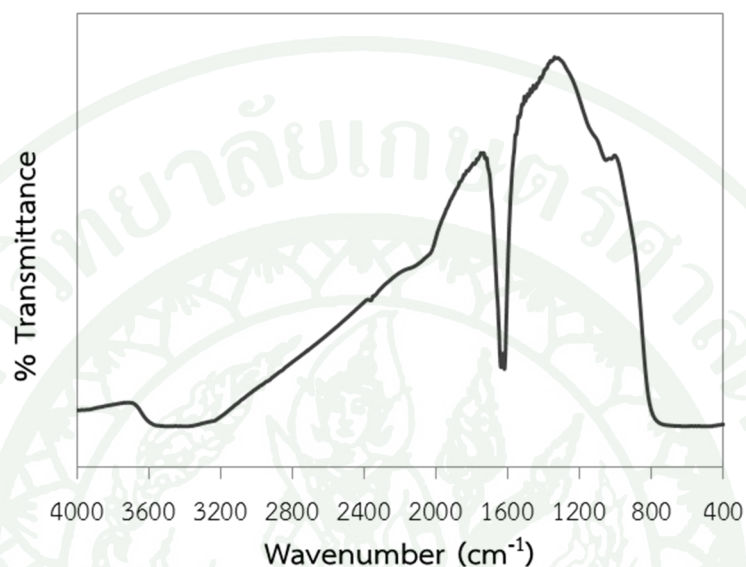
ตารางที่ 8 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ชิ้นงาน	องค์ประกอบ			
	PP (wt%)	PLA (wt%)	PP-g-MA (phr)	Nano TiO ₂ (phr)
0TiO ₂	50	50	3	0
0.25TiO ₂	50	50	3	0.25
0.5TiO ₂	50	50	3	0.5
1.0TiO ₂	50	50	3	1.0
1.5TiO ₂	50	50	3	1.5
2.0TiO ₂	50	50	3	2.0

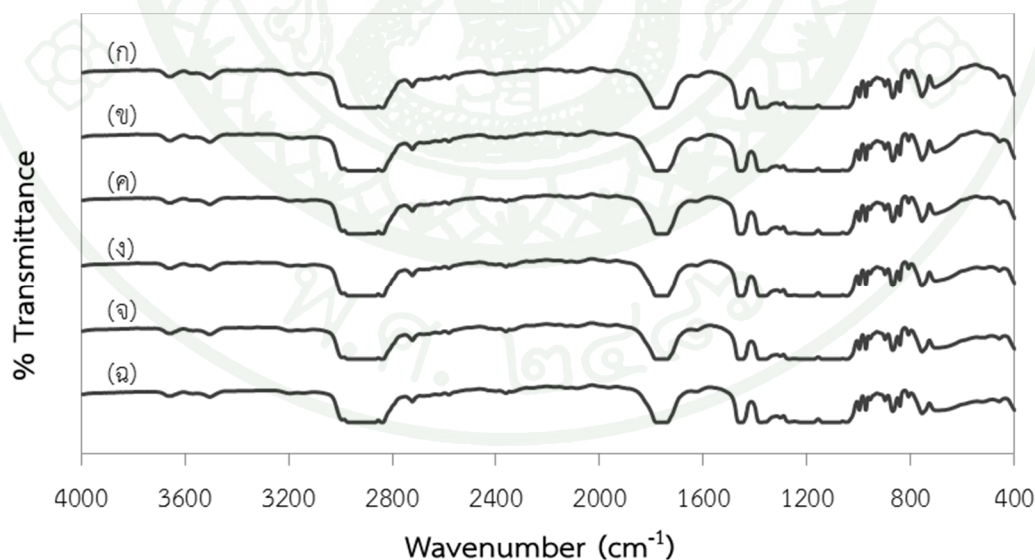
2.1 เอกลักษณะทางเคมีของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

สเปกตรัมของนาโนนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในภาพที่ 21 พบแถบทรานสมิตแดนซ์ที่มีลักษณะเป็นแถบกว้างในช่วงเลขคลื่น 400-500 ซม.⁻¹ ซึ่งแสดงถึงการสั่น (stretching vibrations) ของพันธะ Ti-O-Ti และ Ti-O (Eshaghi *et al.*, 2010) นอกจากนี้ยังพบพีกที่แสดงถึงการสั่นของของหมู่ไฮดรอกซิล (vibration of hydroxyl groups) ที่ตำแหน่งเลขคลื่นเท่ากับ 1638-1619 ซม.⁻¹ และพันธะไฮดรอกซิล (O-H bonds) ที่แถบทรานสมิตแดนซ์ในช่วงเลขคลื่น 3600-3200 ซม.⁻¹ ซึ่งแสดงถึงการดูดซึมน้ำ (absorbed water) ไว้ที่พื้นผิวของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (Gao *et al.*, 2004) เมื่อพิจารณาสเปกตรัมของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในภาพที่ 22 จะพบแถบทรานสมิตแดนซ์ที่แสดงลักษณะเฉพาะของพอลิโพรพิลีนและพอลิแลคติกแอซิด โดยที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2970-2830 ซม.⁻¹ (C-H stretching) 1454 ซม.⁻¹ (-CH₃ bending) และ 1377 ซม.⁻¹ (C-H bending) แสดงลักษณะเฉพาะของพอลิโพรพิลีน (Riga *et al.*, 1998) ส่วนพีกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1179 ซม.⁻¹ (symmetric C-O-C stretching) และ 1077 ซม.⁻¹ (asymmetric CH₃) แสดงถึงลักษณะเฉพาะของพอลิแลคติกแอซิด

(Hoidy *et al.*, 2010) รวมทั้งตำแหน่งของพันธะเอสเทอร์ที่เลขคลื่นเท่ากับ 1777 cm^{-1} แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบพอลิเมอร์ในนาโนคอมพอสิตผสม (Choudhary *et al.*, 2011)



ภาพที่ 21 พูรีเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

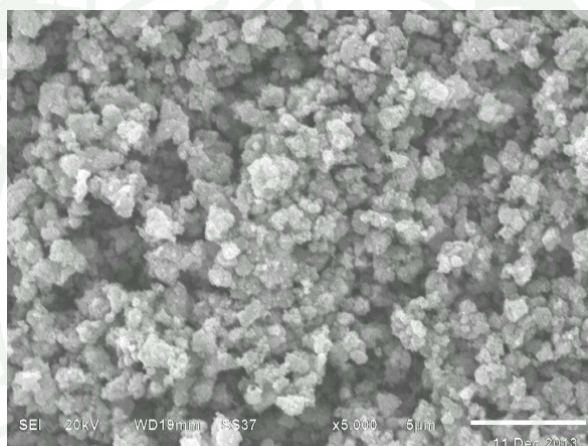


ภาพที่ 22 พูรีเยร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (ก) 0TiO_2 (ข) 0.25TiO_2 (ค) 0.5TiO_2 (ง) 1.0TiO_2 (จ) 1.5TiO_2 และ (ฉ) 2.0TiO_2

2.2 สมบัติทางกายภาพของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

2.2.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

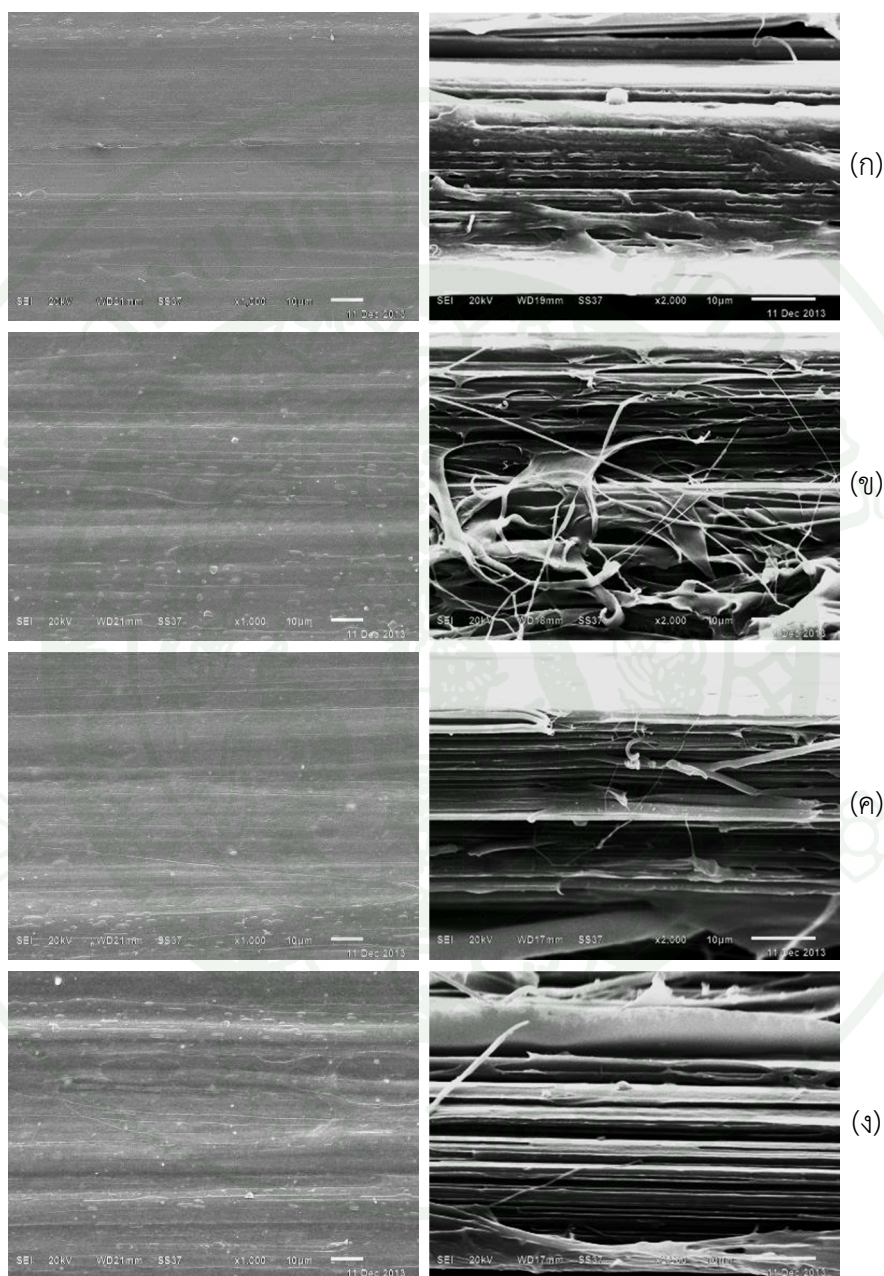
พื้นผิวของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในภาพที่ 23 แสดงให้เห็นถึงลักษณะที่เป็นทรงกลม (spherical) (Behbahani *et al.*, 2013) และมีการกระจายตัวของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในระดับนาโน



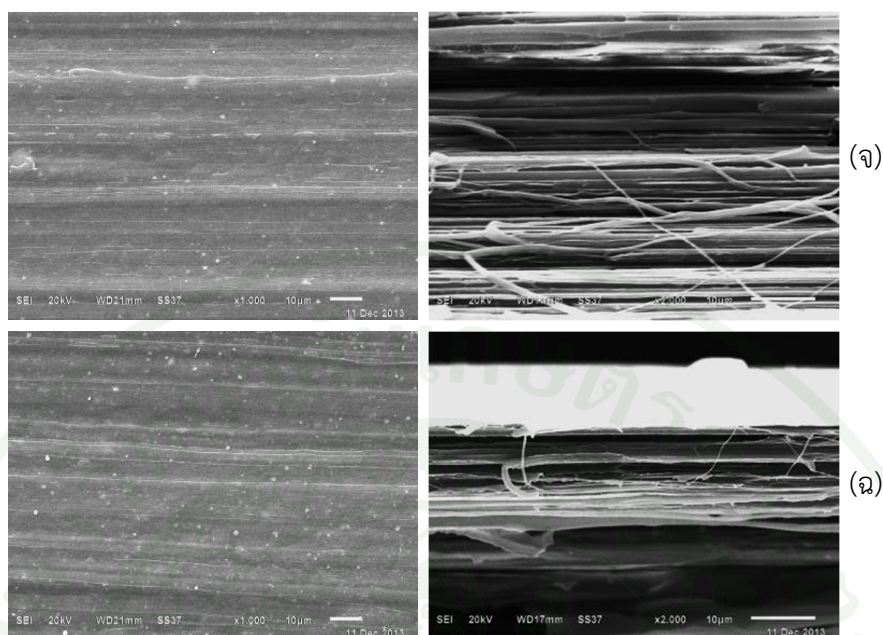
ภาพที่ 23 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

เมื่อพิจารณาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในภาพที่ 24 พบว่า มีแนวโน้มการเกาะกลุ่มของอนุภาคมากขึ้นเมื่อสัดส่วนของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในฟิล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคนาโนมีแนวโน้มที่จะเกิดการเกาะกลุ่มจากการเกิดพันธะเคมีระหว่างพื้นผิวของอนุภาค ซึ่งสำหรับไททาเนียมไดออกไซด์อาจเกิดการเกาะกลุ่มกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของอนุภาค (Titanium Dioxide Manufacturers Association, 2013) เป็นผลให้การเติมไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่มากมีโอกาที่ทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคได้สูงขึ้น (ภาพที่ 25) ซึ่งสามารถเห็นการเกาะกลุ่มของอนุภาคบนพื้นผิวของฟิล์มนาโนคอมพอสิตได้อย่างชัดเจนเมื่อทำการเติมไททาเนียมไดออกไซด์ตั้งแต่ 1.0 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซินขึ้นไป (ภาพที่ 24 (ง) (จ) และ (ฉ)) ส่วนภาพตัดตามยาวของฟิล์มจะเห็นเป็นลักษณะของการแยกเฟส

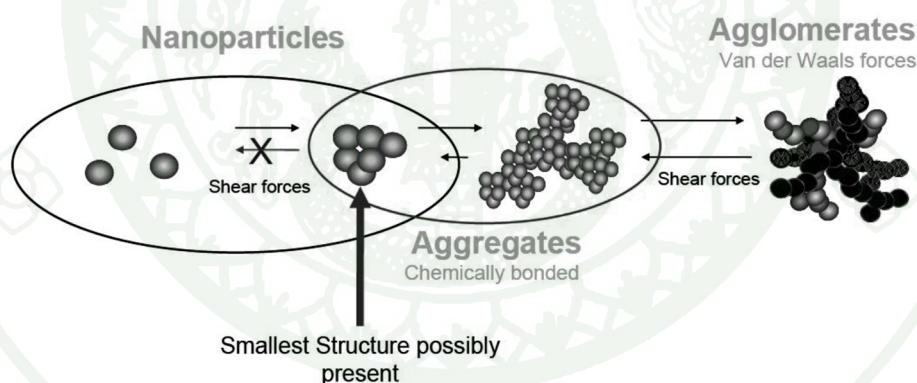
นอกจากกันอย่างชัดเจนระหว่างเฟสของพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดเกิดเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นชั้นๆ (multilayer)



ภาพที่ 24 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงลักษณะพื้นผิว (ภาพซ้าย) และภาคตัดตามยาว (ภาพขวา) ของฟิล์มนาโนคอมพอสิต (ก) 0TiO_2 (ข) 0.25TiO_2 (ค) 0.5TiO_2 (ง) 1.0TiO_2 (จ) 1.5TiO_2 และ (ฉ) 2.0TiO_2



ภาพที่ 24 (ต่อ)



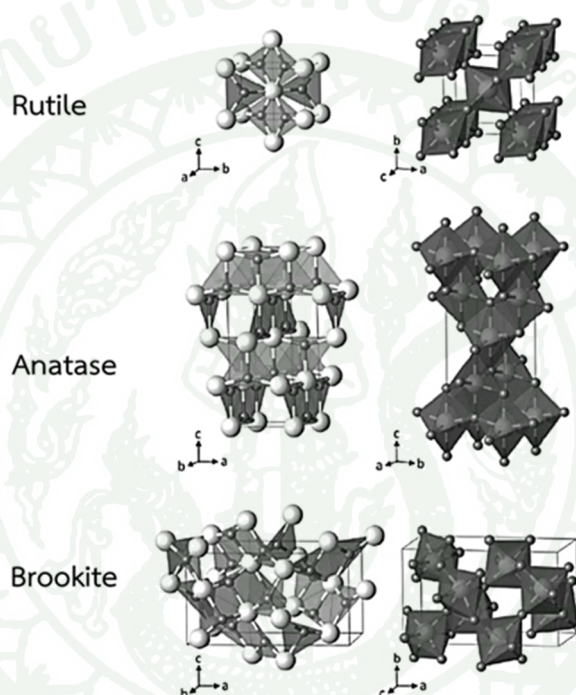
ภาพที่ 25 การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคนาโน

ที่มา: Titanium Dioxide Manufacturers Association (2013)

2.2.2 โครงสร้างผลึกของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิด
ฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

รูปผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 เฟสคืออะนาเทส (anatase) รูไทล์ (rutile) และบรูคไคท์ (brookite) โดยเฟสอะนาเทสกับรูไทล์จะมีโครงสร้างผลึก

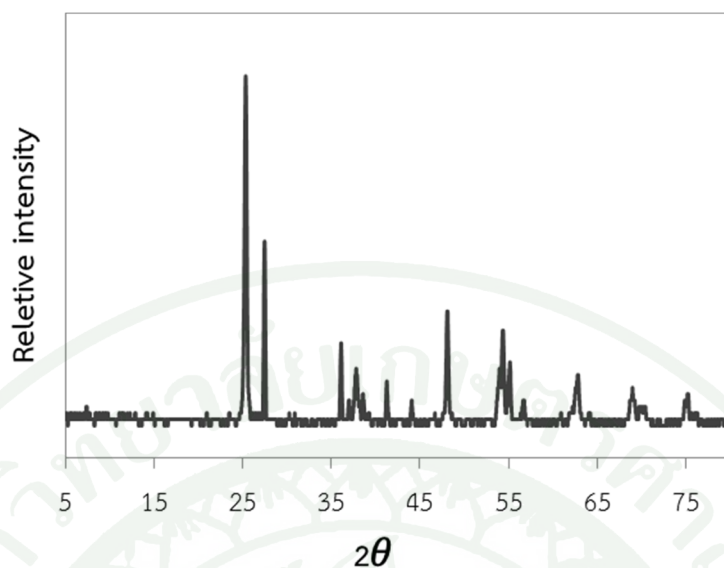
แบบเตตระโกนอล และเฟสบริคโคไท์จะมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (ภาพที่ 26) รูปผลึกทั้งสามของไททาเนียมไดออกไซด์มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งรูปผลึกอะนาเทสจะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ตำแหน่งมุม 2 เซตต้า เท่ากับ 25° และ 48° ส่วนรูปผลึกรูไทล์มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ตำแหน่งมุม 2 เซตต้า เท่ากับ 27° 36° และ 55° (Liu *et al.*, 2007; Thamaphat *et al.*, 2008) ในขณะที่รูปผลึกบริคโคไท์จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ตำแหน่งมุม 2 เซตต้า เท่ากับ 30° (Theivasanthi and Alagar, 2013)



ภาพที่ 26 โครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์

ที่มา: Landmann *et al.* (2012)

เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในภาพที่ 27 พบพิกที่แสดงถึงลักษณะเฉพาะของเฟสอะนาเทสกับรูไทล์ โดยที่ตำแหน่งมุม 2 เซตต้า เท่ากับ 25.34° และ 48.12° จะแสดงถึงรูปผลึกอะนาเทส ในขณะที่ตำแหน่งมุม 2 เซตต้า เท่ากับ 27.46° 36.10° และ 54.40° แสดงถึงรูปผลึกรูไทล์



ภาพที่ 27 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ตารางที่ 9 โครงสร้างผลึกขององค์ประกอบในฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

Characteristic peak	2θ	Crystalline form
Polypropylene	14°	α
	16°	β
	18.5°	α
	21.2°	β
	21.5°	α
Titanium dioxide	25°	anatase
	36°	rutile
	48°	anatase
	55°	rutile

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มนาโนคอมพอสิตปรากฏที่แสดงถึงไอโซเทคติกพอลิโพรพิลีนที่ตำแหน่งมุม 2 เซตต์ เท่ากับ 14.0° 18.5° และ 21.5° ที่แสดงถึงเฟสแอลฟา (alpha: α) กับ 18.5° และ 21.2° ที่แสดงถึงเฟสเบต้า (beta: β) (Türkçü, 2004.) ในขณะที่ไม่พบลักษณะเฉพาะของพอลิแลคติกแอซิด (2θ เท่ากับ 12.5° และ 17.0°) บนรูปแบบการเลี้ยวเบน

ของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มนาโนคอมพอสิต ซึ่งแสดงถึงลักษณะความเป็นออสัณฐานของพอลิแลคติกแอซิด (Kaczmarek *et al.*, 2003; Silverajah *et al.*, 2012) นอกจากนี้ยังพบพีคของไททาเนียมไดออกไซด์ (เฟสอะนาเทสและรูไทล์) ที่ตำแหน่งมุม 2 เซต่า เท่ากับ 25° 36° 48° และ 55° ในฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมที่มีการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

2.3 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรีพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวมีแนวโน้มลดต่ำลงและร้อยละความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในระบบเพิ่มขึ้นจนถึง 1.0 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน ซึ่งอาจเป็นผลจากการที่นาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก แต่เมื่อปริมาณของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มากกว่า 1.0 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและร้อยละความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคนาโนที่ใหญ่ขึ้น เป็นผลให้อนุภาคนั้นเข้าไปขัดขวางการเติบโตของผลึก (crystal growth) (Esthappan *et al.*, 2012a) นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณา ค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว และอุณหภูมิการเกิดผลึกพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อปริมาณการเติมนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนทำหน้าที่เป็นเพียงสารก่อผลึก แต่ไม่ส่งผลต่อน้ำหนักโมเลกุลและไม่ก่อให้เกิดการเกี่ยวพันของสายโซ่พอลิเมอร์ (Buzarovska and Grozdanov, 2012)

ตารางที่ 10 สมบัติทางความร้อนของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสม

ชิ้นงาน ทดสอบ	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH_{cc} (J/g)	ΔH_m (J/g)	$X_{c,blend}$ (%)
0TiO ₂	51.75	117.67	158.25	9.26	64.35	39.08
0.25TiO ₂	51.50	117.83	157.75	10.39	68.43	41.18
0.5TiO ₂	51.54	117.67	154.33	10.09	70.24	42.67
1.0TiO ₂	51.80	117.58	154.33	9.07	76.08	47.54
1.5TiO ₂	51.90	118.00	154.25	10.68	72.41	43.80
2.0TiO ₂	52.88	118.17	155.00	12.26	69.25	40.43

ตารางที่ 11 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสม

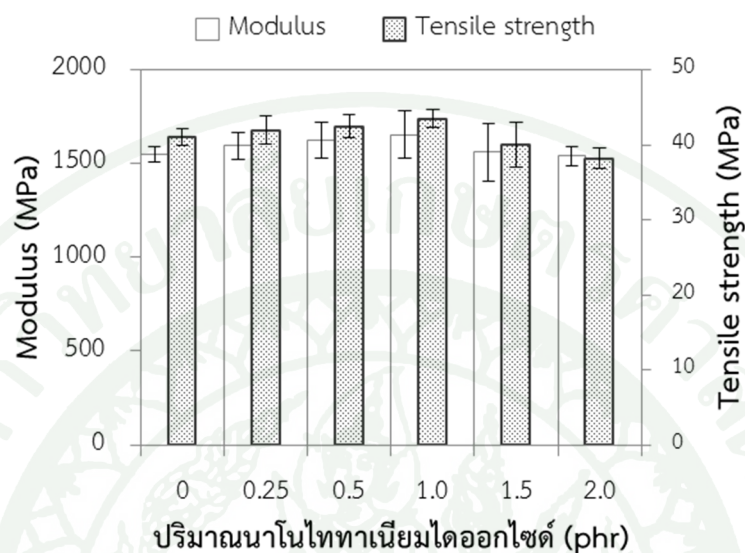
ชิ้นงาน ทดสอบ	T _{d,onset} (°C)	T _{d,endset} (°C)	Decomposition range(°C)	Residue (%)
0TiO ₂	333.09	480.82	147.73	0
0.25TiO ₂	331.47	482.83	151.36	0.61
0.5TiO ₂	334.75	484.42	149.67	1.18
1.0TiO ₂	335.77	483.90	148.13	1.21
1.5TiO ₂	338.67	485.01	146.34	1.77
2.0TiO ₂	339.22	486.22	147.00	2.20

ในกรณีของการสลายตัวทางความร้อนพบว่าช่วงอุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณนาโนไททาเนียมไดออกไซด์สูงขึ้น การปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้นของฟิล์มนาโนคอมพอสิตเกิดจากการที่อนุภาคนาโนเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนทำให้ฟิล์มนาโนคอมพอสิตเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น (Esthappan *et al.*, 2012b)

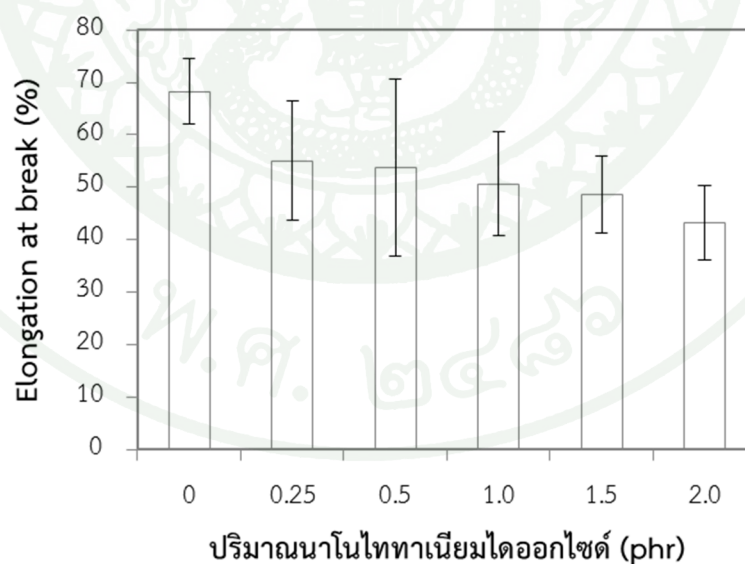
2.4 สมบัติเชิงกลของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของยัง ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (ภาพที่ 28) และค่าร้อยละในการยืดตัว ณ จุดขาด (ภาพที่ 29) กับปริมาณของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์พบว่า ค่าร้อยละในการยืดตัว ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนมากขึ้น ในขณะที่ค่ามอดุลัสของยังและความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนในระบบมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่อนุภาคนาโนทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงด้วยการเข้าไปช่วยถ่ายเทแรงที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์เมทริกซ์เป็นผลให้ฟิล์มนาโนคอมพอสิตมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น (Ali *et al.*, 2014) แต่ค่ามอดุลัสและค่าความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่มีการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มากกว่า 1.0 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน มีแนวโน้มลดลง โดยอาจเป็นผลมาจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเมื่อปริมาณของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มากขึ้นที่ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคนาโนและพอลิเมอร์เมทริกซ์ลดลง อีกทั้งยังก่อให้เกิดจุดบกพร่อง

ภายในชิ้นงานทำให้เกิดความเค้นรวมศูนย์ (stress concentration) ดังนั้นสมบัติเชิงกลของฟิล์มนาโนคอมพอสิตจึงลดต่ำลง (Lee *et al.*, 2013; Nguyen *et al.*, 2013)



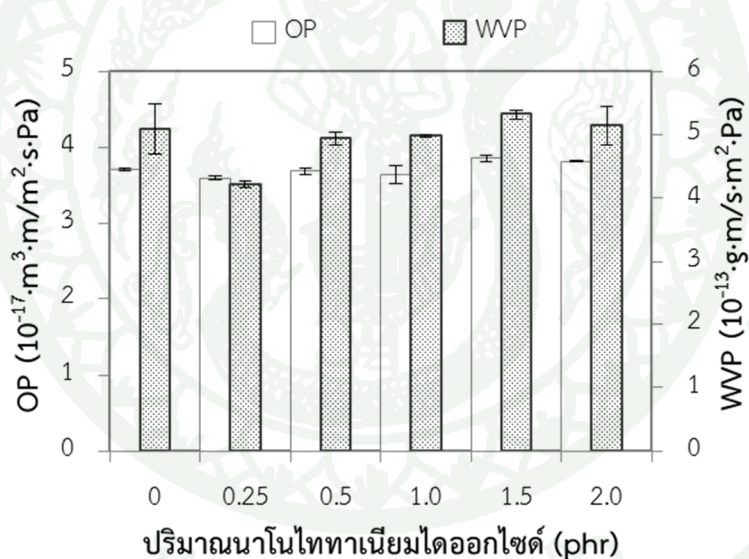
ภาพที่ 28 ค่ามอดุลัสของยังและความต้านทานต่อแรงดึงของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์



ภาพที่ 29 ค่าร้อยละในการยืดตัว ณ จุดขาด ของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

2.5 สมบัติการสกัดกั้นของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

จากภาพที่ 30 จะเห็นว่าปริมาณของอนุภาคนาโนที่เพิ่มขึ้นนั้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีค่าลดลงเมื่อทำการเติมไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ 0.25 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน โดยอนุภาคนาโนจะเข้าไปเพิ่มระยะเวลาที่แก๊สต้องใช้ในการซึมผ่านวัสดุด้วยการเพิ่มระยะทางหรือเพิ่มความคดเคี้ยวในการซึมผ่านของโมเลกุลแก๊ส (Ali *et al.*, 2014) แต่เมื่อเติมอนุภาคนาโนในปริมาณที่มากกว่า 0.25 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน พบว่าฟิล์มนาโนคอมพอสิตมีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณไอน้ำที่สามารถเกิดการดูดซึมโดยพื้นผิวของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (Xing *et al.*, 2012)

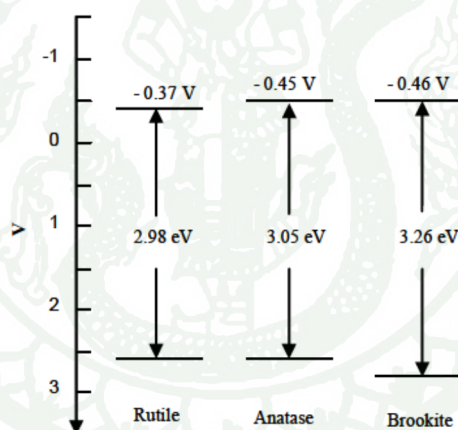


ภาพที่ 30 สมบัติการสกัดกั้นของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

2.6 สมบัติการต้านจุลินทรีย์ของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

โดยทั่วไปไททาเนียมไดออกไซด์เฟสอะนาเทสและรูไทล์เป็นรูปผลึกที่ถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมากกว่าเฟสแบบบรูก์ไคท์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาและมี

ความสามารถในการดูดซับแสงสูงกว่า (ชลดา, 2555) ซึ่งเฟสอะนาเทสมีแถบช่องว่างพลังงานที่สูงกว่า รูไทล์ (ภาพที่ 25) แต่อะนาเทสมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกได้ดีกว่าเฟสรูไทล์ เนื่องจากอิเล็กตรอน (electron: e^-) ที่ถูกกระตุ้นของเฟสรูไทล์มีแนวโน้มที่จะกลับมารวมตัวกับหลุมประจุบวก (hole: h^+) ที่มากกว่า เป็นผลให้ปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นและมีประสิทธิภาพต่ำ อีกทั้งอะนาเทสมีความเป็นผลึกสูงและมีพื้นที่ผิวมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเฟสอื่น (มาหามะสุโฮมึ และคณะ, 2557) แต่อย่างไรก็ตามในบางงานวิจัยพบว่าโครงสร้างผลึกผสมระหว่างเฟสอะนาเทสและรูไทล์จะให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาดีกว่าการใช้อะนาเทสเพียงอย่างเดียว (Muggli and Ding, 2001; Ohno *et al.*, 2001; Prasad *et al.*, 2009) เพราะอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกระตุ้นด้วยแสงจะถูกส่งผ่านจากรูไทล์ไปยังอะนาเทส จึงทำให้การรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับหลุมประจุบวกลดลง และจากการสร้างประจุโดยพลังงานจากแสงเกิดได้รวดเร็วขึ้นเนื่องจากแถบช่องว่างพลังงานของเฟสรูไทล์มีค่าต่ำกว่าแถบช่องว่างพลังงานของเฟสอะนาเทส (นิตดา, 2012)



ภาพที่ 31 แถบช่องว่างระหว่างชั้นพลังงานของรูปผลึกไททาเนียมไดออกไซด์ที่พีเอช (pH) เท่ากับ 7

ที่มา: Paola *et al.* (2013)

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ *Enterococcus faecalis* และ *Escherichia coli* พบว่าฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่มีการเติมไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.25 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน มีปริมาณการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์สูงที่สุด ในขณะที่ฟิล์มนาโนคอมพอสิตที่มีการเติมไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่มากกว่า 0.25 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน มีการลดลงของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่มีการเติมไททาเนียม

ไดออกไซด์ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์ผ่านการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคาตาไลติก และการกระตุ้นด้วยแสงลดต่ำลงเมื่อปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยผลดังกล่าว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Habibi *et al.* (2010) ที่ศึกษาการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ (disinfection) ของฟิล์มบางไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบบนแก้ว ซึ่งพบว่าแสงยูวีเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพในการ ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่สูงกว่าการใช้แสงยูวีร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์

ตารางที่ 12 การศึกษาสมบัติการต้าน *Enterococcus faecalis* ของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสม

ชิ้นงาน ทดสอบ	Starting cell numbers (log CFU/ml)	Cell numbers after 2 h (log CFU/ml)	Reduction of cell numbers after 2 h (log CFU/ml)
0TiO ₂	8.25	5.75	2.50
0.25TiO ₂		4.67	3.58
0.5TiO ₂		5.83	2.42
1.0TiO ₂		7.52	0.73
1.5TiO ₂		7.70	0.55
2.0TiO ₂		7.88	0.37

ตารางที่ 13 การศึกษาสมบัติการต้าน *Escherichia coli* ของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสม

ชิ้นงาน ทดสอบ	Starting cell numbers (log CFU/ml)	Cell numbers after 3 h (log CFU/ml)	Reduction of cell numbers after 3 h (log CFU/ml)
0TiO ₂	7.14	6.19	0.95
0.25TiO ₂		6.11	1.03
0.5TiO ₂		6.32	0.82
1.0TiO ₂		6.68	0.46
1.5TiO ₂		6.55	0.59
2.0TiO ₂		6.76	0.38

จากผลการทดสอบซึ่งพบว่าประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์ผ่านการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคาตาไลติกและการกระตุ้นด้วยแสงลดต่ำลงเมื่อปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นอาจเป็นเพราะการมีอยู่ของไททาเนียมไดออกไซด์เฟสรูไทล์ซึ่งเป็นรูปผลึกที่มีค่ารีแฟรคทีฟอินเดกซ์ (refractive index) สูง ทำให้มีสมบัติการกระเจิงของแสง (scattering) และการสะท้อนแสง (reflection) (Li *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2004) โดยหากมีความหนาแน่นและการเกาะกลุ่มของอนุภาคมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดการกระเจิงและการสะท้อนแสงเพิ่มขึ้น (ศุภรัตน์ และ สุลาวัลย์, 2555; Nussbaumer *et al.*, 2003) การกระเจิงและการสะท้อนแสงที่เกิดขึ้นอาจเข้าไปทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคาตาไลติกของไททาเนียมไดออกไซด์และการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยแสงลดลง หรืออาจกล่าวได้ว่าฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีสมบัติในการต้านแสงยูวี (anti UV)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ผลของอัตราส่วนระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

1.1 สมบัติทางเคมี

พอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด โดยทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างสารองค์ประกอบที่มีความเป็นขั้วแตกต่างกันผ่านการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่แอนไฮไดรด์ในพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์กับหมู่คาร์บอนิลในพอลิแลคติกแอซิด รวมทั้งพอลิโพรพิลีนในพอลิโพรพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เข้ากันได้กับสายโซ่ของพอลิโพรพิลีน

1.2 สมบัติทางกายภาพ

ลักษณะแบบแยกเฟสของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมในระบบนี้เป็นพอลิเมอร์ผสมแบบเข้ากันไม่ได้ และพบว่าพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความขรุขระมากกว่าฟิล์มพอลิเมอร์บริสุทธิ์

1.3 สมบัติทางความร้อน

เมื่อปริมาณพอลิแลคติกแอซิดสูงขึ้นส่งผลให้สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลวและความเป็นผลึกลดต่ำลง ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์บริสุทธิ์ แต่อย่างไรก็ตามไม่พบการเปลี่ยนแปลงของเสถียรภาพทางความร้อนเมื่อปริมาณพอลิแลคติกแอซิดเพิ่มขึ้น

1.4 สมบัติเชิงกล

ค่ามอดุลัสของยังและค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของ

พอลิแลคติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมมีค่ามากขึ้น ในขณะที่ค่าร้อยละในการยึดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มตัวอย่างมีค่าลดลง

1.5 สมบัติการสกัดกั้น

ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อสมบัติการสกัดกั้น โดยค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนและไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิโพรพิลีน แต่พอลิเมอร์ผสมในอัตราส่วนพอลิโพรพิลีนต่อพอลิแลคติกแอซิดเท่ากับ 50:50 มีค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนและค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรอื่น

เมื่อพิจารณาสมบัติโดยรวมพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงสมบัติไปตามสมบัติของสารองค์ประกอบที่มีสัดส่วนที่มากกว่าและเป็นไปตามสมบัติของของระบบพอลิเมอร์ผสมแบบเข้ากันไม่ได้ ซึ่งระบบที่มีอัตราส่วนระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกเท่ากับร้อยละ 50:50 โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปเตรียมฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างสมบัติด้านต่างๆ

2. ผลของปริมาณนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อสมบัติของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสม

2.1 สมบัติทางเคมี

ผลจากการทดสอบด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปียืนยันการเกิดตำแหน่งของพันธะเอสเทอร์ที่แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาสัมพันธระหว่างสารองค์ประกอบในนาโนคอมพอสิตผสม

2.2 สมบัติทางกายภาพ

เมื่อปริมาณนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มากขึ้นพบแนวโน้มการเกาะกลุ่มของอนุภาคพบพื้นผิวของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมที่สูงขึ้น เนื่องจากการเตรียมฟิล์มในระบบนี้เป็นการผสมอนุภาคลงในพอลิเมอร์เมทริกโดยตรง ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิว จึงทำให้อนุภาคเกิดการเกาะกลุ่มจากการเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของอนุภาคกันเอง

2.3 สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลวและความเป็นผลึกกล มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณนาโนไททาเนียมไดออกไซด์สูงขึ้นจนถึง 1 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน และมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อปริมาณนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มากกว่า 1 ส่วนโดยน้ำหนัก ในขณะที่เสถียรภาพทางความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณนาโนไททาเนียมไดออกไซด์สูงขึ้น

2.4 สมบัติเชิงกล

ค่ามอดุลัสของยังและค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนสูงขึ้นจนถึง 1 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน และมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อปริมาณนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มากกว่า 1 ส่วนโดยน้ำหนัก ในขณะที่ค่าร้อยละในการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของอนุภาคนาโนมากขึ้น

2.5 สมบัติการสกัดกัน

ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไปส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อสมบัติการสกัดกัน โดยค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนและไอน้ำมีค่าลดลงเมื่อทำการเติมไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ 0.25 ส่วนโดยน้ำหนักต่อหนึ่งร้อยละของเรซิน และมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์มากกว่า 0.25 ส่วนโดยน้ำหนัก

2.6 การต้านจุลินทรีย์

สำหรับสมบัติในการต้านเชื้อ *Enterococcus faecalis* และ *Escherichia coli* พบว่าฟิล์มนาโนคอมพอสิตมีประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์ต่ำ เนื่องจากเฟสรูโกลในอนุภาคนาโนมีสมบัติในการสะท้อนแสงที่อาจไปลดประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคาตาไลซิสจึงทำให้ประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์ของฟิล์มนาโนคอมพอสิตลดลง โดยการเติมไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ 0.25 ส่วนโดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อ *Enterococcus faecalis* และ *Escherichia coli* สูงกว่าฟิล์มนาโนคอมพอสิตสูตรอื่นๆ

ดังนั้นฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีปริมาณการเติมไททาเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.25 ส่วนโดยน้ำหนักความเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับต้นแบบถุงระบายปัสสาวะ

ข้อเสนอแนะ

ฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้สำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการการปกป้องจากแสงยูวี และในงานวิจัยนี้มีการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์เพื่อการประยุกต์ใช้สำหรับต้นแบบถุงระบายปัสสาวะ ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการศึกษาสมบัติการต้านจุลินทรีย์ชนิดอื่นที่มีความเกี่ยวข้องกับการติดเชื้อทางเดินปัสสาวะ อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่า ฟิล์มนาโนคอมพอสิตมีประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์ต่ำ ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์จึงเป็นอีกกรณีหนึ่งที่ต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม โดยการเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์ของไททาเนียมไดออกไซด์อาจทำได้หลายวิธีการ เช่น

1. การเปลี่ยนแปลงระบบการขึ้นรูป เช่น การเคลือบไททาเนียมที่ผิวของวัสดุ เพื่อให้เกิดการสัมผัสโดยตรงระหว่างพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์กับเซลล์จุลินทรีย์ ซึ่งพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาโฟโตคาตาไลติก
2. การดัดแปรพื้นผิวหรือการเติมสารช่วยกระจาย (dispersant) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคาตาไลติก
3. การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไทเทเนียมไดออกไซด์ผสม เช่น การเจือด้วยโลหะต่าง ๆ (เงิน เหล็ก และดีบุก) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ยกตัวอย่างเช่น การเจือด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเหล็ก (Fe^{3+}) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์ได้ โดยไอออนของโลหะทรานซิชันจะลดแถบพลังงานช่องว่างของไทเทเนียมไดออกไซด์ทำให้มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตคาตาไลติกมากขึ้น และยังทำให้ค่าการดูดกลืนแสงเลื่อนไปอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่สูงขึ้นหรือสามารถเกิดปฏิกิริยาในช่วงแสงที่ตามองเห็น (visible light)

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- งามทิพย์ ภู่วโรดม. 2554. การบรรจุอาหาร FOOD PACKAGING. พิมพ์ครั้งที่ 2. บริษัท เอส.พี. เอ็ม. จำกัด, กรุงเทพฯ.
- เจริญ นาคะสรรค์. 2547. กระบวนการแปรรูปพลาสติก. พิมพ์ครั้งที่ 3. โพรเพช, กรุงเทพฯ.
- ชลดา อีกรากุมวงศ์. 2555. วัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์: การสังเคราะห์ โครงสร้าง และการประยุกต์ใช้ (Titanium Dioxide Nanomaterials: Synthesis, Structures and Applications). วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 14 (1): 44-53.
- นิตดา เวชชากุล. 2555. การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานาโนไทเทเนียมไดออกไซด์. Technology Energy & Environment 38 (221): 53-55.
- พรพรรณ หนูสวัสดิ์ และจรรยา ตรีมงคล. 2554. ผลิตภัณฑ์พอลิพรพิลีนสำหรับบรรจุภัณฑ์ทางการแพทย์ “ชนิดใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง”. PLASTIC BI-WEEKLY NEWS 24: 1.
- มาหามะสุโฮมิ มะแซ, อรรถกร ประดับจันทร์ และ อานนท์ พิสุทธิพงศ์โชโต. ประสิทธิภาพของสารสังเคราะห์ไทเทเนียมไดออกไซด์ได้ทั้งสแตนท์ออกไซด์ในการยับยั้งแบคทีเรีย *Eschherichia coli* และยืดอายุการเก็บรักษาผักและผลไม้. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 22 (3): 327-336.
- วรางคณา วารีน้อยเจริญ. 2553. การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีในโภชนเภสัชภัณฑ์. วารสารคลินิกอาหารและโภชนาการ (วคอก.) 4 (2): 77-82.
- ศุภรัตน์ นาคสิทธิพันธ์ และ สุภาวัลย์ ขาวผ่อง. 2555. การสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโคลด์พลาสมา (Synthesis of Titanium Dioxide Thin Films by Cold Plasma Technique). รายงานผลการวิจัย, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

สถาบันพลาสติก. 2555. Plastics for the Medical Device industry. **Plastics Foresight** 5 (1): 1-55.

สมจิตต์ ตั้งชัยวัฒนา. 2548. พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend). **สารานุกรมวิทยาศาสตร์ บริการ (พ.ศ. 2548):** 1-4.

สมพล เพิ่มพงศ์โกศล. 2556. เอกสารประกอบการสอนหมายเลข 1 เรื่อง การติดเชื้อของระบบทางเดินปัสสาวะ (Urinary tract infection) รายวิชา RASU 406 ภาควิชาศัลยศาสตร์ รพ.รามาริบัติ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. ม.ป.ท.

สรรรค์ จิตรไคร์ครวญ. 2552. การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไททาเนียมไดออกไซด์. **วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ** 57 (179): 21-24.

อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน. 2554. พอลิแลกติกแอซิด: พอลิเอสเทอร์จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้. **วิศวกรรมสาร มก.** 24 (77): 99-110.

เอสซีจี เคมิคอลส์. 2554. Sterile Disposable Medical Packaging Products บรรจุภัณฑ์พลาสติกปลอดเชื้อทางการแพทย์ชนิดใช้ครั้งเดียวทิ้ง. **รอบรู้พลาสติก ALL AROUND PLASTICS** 23 (2): 4-9.

Abdelwahab, M.A., A. Flynn, B.S. Chiou, S. Imam, W. Orts and E. Chiellini. 2012. Thermal, mechanical and morphological characterization of plasticized PLA-PHB blends. **Polymer Degradation and Stability** 97 (9): 1822-1828.

Al-Rawajfeh, A.E., H.A. Al-Salah and I. Al-Rhael. 2006. Miscibility, crystallinity and morphology of polymer blends of polyamide-6/poly (β -hydroxybutyrate). **Jordan Journal of Chemistry** 1 (2): 155-170.

Ali, N.A. and F.T.M. Noori. 2014. Gas Barrier Properties of Biodegradable Polymer Nanocomposites Films. **Chemistry and Materials Research** 6 (1): 44-51.

Bard Medical. n.d. **Drainage Bags**. Available Source: <http://www.bardmedical.com/products/urological-drainage/urine-collection/drainage-bags/>, August 7, 2014.

Behbahani, M., M. Babapour, M.M. Amini, O. Sadeghi, A. Bagheri, M. Salarian and B. Rafiee. 2013. Separation/Enrichment of Copper and Silver Using Titanium Dioxide Nanoparticles Coated with Poly-Thiophene and Their Analysis by Flame Atomic Absorption Spectrophotometry. **American Journal of Analytical Chemistry** 4 (2): 90-98.

Bikiaris, D.N., A. Vassiliou, E. Pavlidou and G.P. Karayannidis. 2005. Compatibilisation effect of PP-g-MA copolymer on iPP/SiO₂ nanocomposites prepared by melt mixing. **European Polymer Journal** 41 (9): 1965-1978.

Bodaghi, H., Y. Mostofi, A. Oromiehie, Z. Zamani, B. Ghanbarzadeh, C. Costa, A. Conte and M.A.D. Nobile. 2013. Evaluation of the photocatalytic antimicrobial effects of a TiO₂ nanocomposite food packaging film by *in vitro* and *in vivo* tests. **LWT - Food Science and Technology** 50 (2): 702-706.

Buzarovska, A. and A. Grozdanov. 2012. Biodegradable Poly(L-lactic acid)/TiO₂ Nanocomposites: Thermal Properties and Degradation. **Journal of Applied Polymer Science** 123 (4): 2187-2193.

Calhoun, A. 2009. Polypropylene, pp. 32-36. In Wagner J.R. **Multilayer Flexible Packaging**. Elsevier Inc., USA.

Chawengkijwanich, C. and Y. Hayata. 2008. Development of TiO₂ powder-coated food packaging film and its ability to inactivate Escherichia coli in vitro and in actual tests. **International Journal of Food Microbiology** 123 (3): 288-292.

- Chongprakobkit, S., M. Opaparakasit and S. Chuayjuljit. 2007. Use of PP-g-MA Prepared by Solution Process as Compatibilizer in Polypropylene/Polyamide 6 Blends. **Journal of Metals, Materials and Minerals** 17 (1): 9-16.
- Choudhary, P., S. Mohanty, S. K. Nayak and L. Unnikrishnan. 2011. Poly(L-lactide)/Polypropylene Blends: Evaluation of Mechanical, Thermal, and Morphological Characteristics. **Journal of Applied Polymer Science** 121 (6): 3223–3237.
- Chung, C.J., H.I. Lin, C.M. Chou, P.Y. Hsieh, C.H. Hsiao, Z.Y. Shi and J.L. He. 2009. Inactivation of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* under various light sources on photocatalytic titanium dioxide thin film. **Surface & Coatings Technology** 203 (8): 1081-1085.
- Costaa, H.M. da., V.D. Ramosa and M.G. de Oliveira. 2007. Degradation of polypropylene (PP) during multiple extrusions: Thermal analysis, mechanical properties and analysis of variance. **Polymer Testing** 26 (5): 676–684.
- Drobny, J. 2007. Processing Methods Applicable to Thermoplastic Elastomers, pp. 33-173. In Drobny J. **Handbook of Thermoplastic Elastomers**. 2nd ed. Elsevier Inc., USA.
- Drumright, E.R., R.P. Gruber and E.D. Henton. 2000. Polylactic Acid Technology. **Advanced Materials** 12 (23): 1841-1846.
- Dastjerdi R. and M. Montazer. 2010. A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: Focus on anti-microbial properties. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces** 79 (1): 5–18.
- Eshaghi, A., M. Pakshir and R. Mozaffarinia. 2010. Photoinduced properties of nanocrystalline TiO₂ sol–gel derived thin films. **Bulletin of Materials Science** 33 (4): 365–369.

- Esthappan, S.K., S.K. Kuttappan and R. Joseph. 2012a. Effect of titanium dioxide on the thermal ageing of polypropylene. **Polymer Degradation and Stability** 97 (4): 615-620.
- _____, _____ and _____. 2012b. Thermal and mechanical properties of polypropylene/titanium dioxide nanocomposite fibers. **Materials and Design** 37: 537-542.
- Gao, Y., Y. Masuda, W.S. Seo, H. Ohta and K. Koumoto. 2004. TiO₂ nanoparticles prepared using an aqueous peroxotitanate solution. **Ceramics International** 30 (7): 1365-1368.
- Habibi, M.H., M. Nasr-Esfahani, G.i Emtiazi and B. Hosseinkhani. 2010. Nanostructure Thin Films of Titanium Dioxide Coated on Glass and Its Anti UV Effect for Living Organisms. **Current Nanoscience** 6 (3): 324-329.
- Hamad, K., M. Kaseem and F. Deri. 2011. Rheological and mechanical characterization of poly(lactic acid)/polypropylene polymer blends. **Journal of Polymer Research** 18 (6): 1799-1806.
- Hoidy, W.H., M.B. Ahmad, E.A. Jaffar Al-Mulla and N.A.B. Ibrahim. 2010. Preparation and characterization of polylactic acid/polycaprolactone clay nanocomposites. **Applied Sciences** 10 (2): 97-106.
- Kaczmarek, H., M. Nowicki, I. Vuković-Kwiatkowska and S. Nowakowska. 2013. Crosslinked blends of poly(lactic acid) and polyacrylates: AFM, DSC and XRD studies. **Journal of Polymer Research** 20 (91): 1-12.
- Kim, B., D. Kim, D. Cho and S. Cho. 2003. Bactericidal effect of TiO₂ photocatalyst on selected food-borne pathogenic bacteria. **Chemosphere** 52 (1): 277-281.

- Kim, Y.F., C.N. Choi, Y.D. Kim, K.Y. Lee and M.S. Lee. 2004. Compatibilization of Immiscible Poly(l-lactide) and Low Density Polyethylene Blends. **Fibers and Polymers** 5 (4): 270-274.
- Kim, J.Y., C. Park and J. Yoon. 2008. Developing a Testing Method for Antimicrobial Efficacy on TiO₂ Photocatalytic Products. **Environmental Engineering Research** 13 (3): 136-140.
- Landmann, M., E. Rauls and W.G. Schmidt. 2012. The electronic structure and optical response of rutile, anatase and brookite TiO₂. **Journal of Physics: Condensed Matter** 24 (19): 1-6.
- Lee, H.S. and J.D. Kim. 2012. Effect of Hybrid Compatibilizers on mechanical property of ternary blend with Polypropylene, Poly (lactic acid) and Toughening modifier. **Polymer Composites** 33 (7): 1154-1161.
- Lee, J.G., S.H. Kim, H.C. Kang and S.H. Park. 2013. Effect of TiO₂ on PVDF/PMMA Composite Films Prepared by Thermal Casting. **Macromolecular Research** 21 (4): 349-355.
- Li, H., H. Deng and J. Zhao. 2009. Performance Research of Polyester Fabric Treated by Nano Titanium Dioxide (Nano-TiO₂) Anti-ultraviolet Finishing. **International Journal of Chemistry** 1 (1): 57-62.
- Li, Q., C. Wu and P. Zhu. 2011. Effect of maleic-anhydride-grafted polypropylene as a compatibilizer on the properties of polypropylene/(modified carbon black) composites. **Journal of Vinyl and Additive Technology** 17 (4): 260-264.
- Liu, Z., X. Zhang, S. Nishimoto, M. Jin, D.A. Tryk, T. Murakami and A. Fujishima. 2007. Anatase TiO₂ Nanoparticles on Rutile TiO₂ Nanorods: A Heterogeneous Nanostructure via Layer-by-Layer Assembly. **Langmuir** 23 (22): 10916-10919.

- Llorensa, A., E. Lloret, P.A. Picouet, R. Trbojevichc and A. Fernandez. 2012. Metallic-based micro and nanocomposites in food contact materials and active food packaging. **Trends in Food Science and Technology** 24 (1): 19-29.
- Lorenzo, M.L.D. 2003. Spherulite growth rates in binary polymer blends. **Progress in Polymer Science** 28 (4): 663-689.
- Markowska-Szczupaka, A., K. Ulfigb and A.W. Morawska. 2011. The application of titanium dioxide for deactivation of bioparticulates: An overview. **Catalysis Today** 169 (1): 249–257.
- Marotta, D.C. 1990. Packaging materials, pp. 51-138. *In* O'brien D.J. **Medical device packaging handbook**. Marcel Dekker, New York.
- Massey, K.L. 2012. **Permeability Properties of Plastics and Elastomers**. 2nd ed. Elsevier Inc., USA.
- Morris, A.B. Polymer blending for packaging applications, pp. 137-162. *In* Wagner J.R. **Multilayer Flexible Packaging**. Elsevier Inc., USA.
- Muggli, D.S. and L. Ding. 2001. Photocatalytic performance of sulfated TiO₂ and Degussa P-25 TiO₂ during oxidation of organics. **Applied Catalysis B: Environmental** 32 (3): 181–194.
- Muranyi, P., C. Schraml and J. Wunderlich. 2010. Antimicrobial efficiency of titanium dioxide-coated surfaces. **Journal of Applied Microbiology** 108 (6): 1966-1973.

- Nussbaumer, R.J., W.R. Caseri, P. Smith and T. Tervoort. 2003. Polymer-TiO₂ Nano composites: A Route Towards Visually Transparent Broadband UV Filters and High Refractive Index Materials. **Macromolecular Materials and Engineering** 288 (1): 44-49.
- Ohno, T., K. Sarukawa, K. Tokieda and M. Matsumura. 2001. Morphology of a TiO₂ Photocatalyst (Degussa, P-25) Consisting of Anatase and Rutile Crystalline Phases. **Journal of Catalysis** 203 (1): 82-86.
- Paola, A.D., M. Bellardita and L. Palmisano. 2013. Brookite, the Least Known TiO₂ Photocatalyst. **Catalysts** 3 (1): 36-73.
- Prasad, G.K., G.S. Agarwal, B. Singh, G.P. Rai and R. Vijayaraghavan. 2009. Photocatalytic inactivation of Bacillus anthracis by titania nanomaterials. **Journal of Hazardous Materials** 165 (1-3): 506-510.
- Raj, B., V. Annadurai, Somashekar, M. Raj and Siddaramaiah. 2001. Structure-property relation in low-density polyethylene-starch immiscible blends. **European Polymer Journal** 37 (5): 943-948.
- Reddy, N., D. Nama and Y. Yang. 2008. Polylactic acid/polypropylene polyblend fibers for better resistance to degradation. **Polymer Degradation and Stability** 93 (1): 233-241.
- Riga, A., R. Collins, G. Mlachak. 1998. Oxidative behavior of polymers by thermogravimetric analysis, differential thermal analysis and pressure differential scanning calorimetry. **Thermochimica Acta** 324 (1-2): 135-149.
- Sastri, R.V. 2010. **Plastics in Medical Devices**. 1th ed. Elsevier Inc., USA.

Sclavons, M., V. Carlier, B. De Roover, P. Franquinet, J. Devaux and R. Lecras. 1996.

The anhydride content of some commercial PP-g-MA: FTIR and titration.

Journal of Applied Polymer Science 62 (8): 1205-1210.

Silverajah, V.S. Giita, N.A. Ibrahim, N. Zainuddin, W.M. Z.W. Yunus and H.A. Hassan.

2012. Mechanical, Thermal and Morphological Properties of Poly(lactic acid)/Epoxidized Palm Olein Blend. **Molecules** 17 (10): 11729-11747.

Thamaphat, K., P. Limsuwan and B. Ngotawornchai. 2008. Phase Characterization of

TiO₂ Powder by XRD and TEM. **Kasetsart Journal (Natural Science)** 42 (5): 357-361.

The Association for Professionals in Infection Control and Epidemiology (APIC). 2008.

An APIC Guide 2008 Guide to the Elimination of Catheter-Associated Urinary Tract Infections (CAUTIs). **ISBN: 1-933013-39-7**.

Theivasanthi, T. and M. Alagar. 2013. Titanium dioxide (TiO₂) Nanoparticles XRD

Analyses: An Insight. **arxiv Materials Science (cond-mat.mtrl-sci)**. arXiv: 1307.1091.

Titanium Dioxide Manufacturers Association (TDMA). 2013. **About Titanium Dioxide**

July 2013. 6.

Tseng, Y.C. and S.B. Darling. 2010. Block Copolymer Nanostructures for Technology.

Polymers 2 (4): 470-489.

Türkçü, H.N. 2004. **Investigation of the crystallinity and orientation of poly**

propylene with respect to temperature changes using FT-IR, XRD, and

RAMAN techniques. M.S. Thesis, Bilkent University.

- Xing, Y., X. Li , L. Zhang, Q. Xu, Z. Che, W. Li, Y. Bai and K. Li. 2012. Effect of TiO₂ nanoparticles on the antibacterial and physical properties of polyethylene-based film. **Progress in Organic Coatings** 73 (2-3): 219-224.
- Utracki, L.A. and M.R. Kamal. 2002. Chapter 7 the rheology of polymer alloys and blends. pp. 449-546. *In* L.A. Utracki, editor. **Polymer blends handbook**. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Yao, M., H. Deng, F. Mai, K. Wang, Q. Zhang, F. Chen and Q. Fu. 2011. Modification of poly(lactic acid)/poly(propylene carbonate) blends through melt compounding with maleic anhydride. **eXPRESS Polymer Letters** 5 (11): 937-949.
- Yang, H., S. Zhu and N. Pan. 2004. Studying the Mechanisms of Titanium Dioxide as Ultraviolet-Blocking Additive for Films and Fabrics by an Improved Scheme. **Journal of Applied Polymer Science** 92 (5): 3201-3210.
- Yoo, T.W., H.G. Yoon, S.J. Choi, M.S. Kim, Y.H. Kim and W.N. Kim. 2010. Effects of Compatibilizers on the Mechanical Properties and Interfacial Tension of Polypropylene and Poly(lactic acid) Blends. **Macromolecular Research** 18 (6): 583-588.
- Zhou, J.J., S.Y. Wang and S. Gunasekaran. 2009. Preparation and Characterization of Whey Protein Film Incorporated with TiO₂ Nanoparticles. **Journal of Food Science** 74 (7): 50-56.
- Zhou, S., Y. Chen, H. Zou and M. Liang. 2013. Thermally conductive composites obtained by flake graphite filling immiscible polyamide 6/polycarbonate blends. **Thermochimica Acta** 566: 84-91.





ภาคผนวก ก

การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดและฟิล์มนาโนคอมพอสิต
ผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

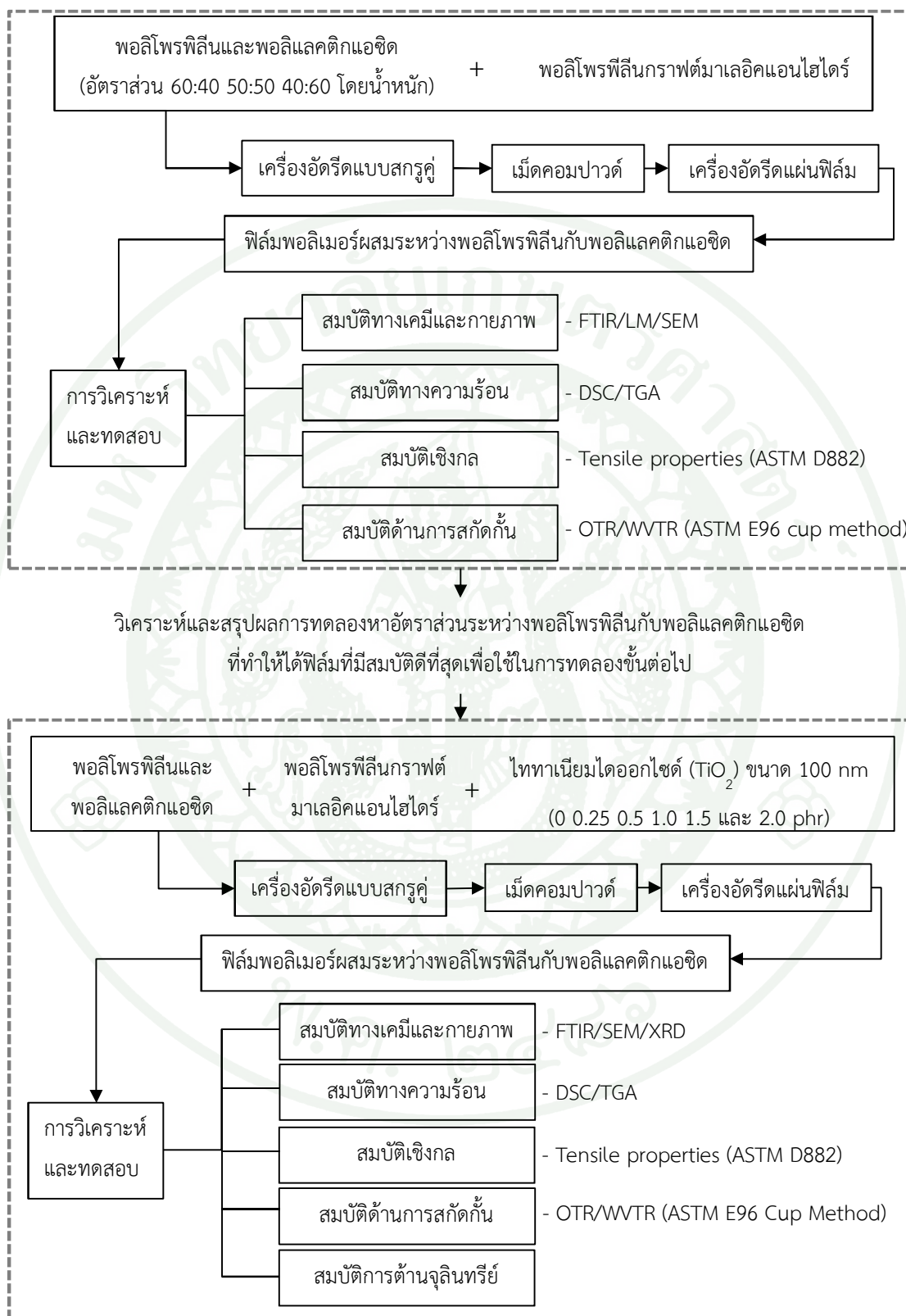
การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดและฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

1. การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด

ในขั้นแรกนำสารองค์ประกอบทั้งหมดมาทำการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ก่อนการใช้งาน จากนั้นทำการผสมขั้นต้นด้วยเครื่องผสมสีพลาสติกเป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของสารองค์ประกอบอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอซึ่งสถานะของการเตรียมเป็นเม็ดคอมปาวด์หรือการผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่คือ อุณหภูมิเท่ากับ 210 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 25 รอบต่อนาที (rpm) ซึ่งจะต้องนำเม็ดคอมปาวด์ที่ได้ไปทำการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ก่อนการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์ม โดยสถานะในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มคือ อุณหภูมิที่หัวดายเท่ากับ 170 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ลูกกกิ้งหล่อเย็น (chill roll) เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบของสกรู 50 รอบต่อนาที

2. การเตรียมฟิล์มฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

อุณหภูมิในการอบไล่ความชื้นก่อนการใช้งานของเม็ดพลาสติกเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส แต่จะใช้อุณหภูมิในการอบไล่ความชื้นสำหรับไททาเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นทำการผสมส่วนประกอบขั้นต้นด้วยเครื่องผสมสีพลาสติกเป็นเวลา 15 นาที ซึ่งสถานะในการเตรียมเป็นเม็ดคอมปาวด์หรือการผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่คือ อุณหภูมิเท่ากับ 210 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบของสกรูเท่ากับ 40 รอบต่อนาที ซึ่งจะต้องนำเม็ดคอมปาวด์ที่ได้ไปอบไล่ความชื้นก่อนการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดแผ่นฟิล์มโดยสถานะในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มคือ อุณหภูมิที่หัวดายเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ลูกกกิ้งหล่อเย็นเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบของสกรู 50 รอบต่อนาที



ภาพผนวกที่ ก1 แผนผังแสดงขั้นตอนการวิจัย



ภาคผนวก ข

การทดสอบและวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ พิล์มพอลิเมอร์ผสม
ระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดและฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/
พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

การทดสอบและวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ พิล์มพอลิเมอร์
ผสมระหว่างพอลิพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดและฟิล์มนาโนคอมพอลิผสมพอลิพรพิลีน/
พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

1. ขั้นตอนในการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

1.1 เตรียมตัวอย่างโดยผสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์กับผงโพแทสเซียมโบไมด์ (KBr) โดยใช้อัตราส่วนอนุภาคนาโนต่อผงโพแทสเซียมโบไมด์เท่ากับ 1:100

1.2 บดตัวอย่างให้ละเอียดแล้วนำไปอัดให้เป็นแผ่นโดยใช้ความดัน 10 ตันต่อตารางนิ้ว

1.3 นำตัวอย่างใส่ในแผ่นใส่ตัวอย่างแล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ โดยวัดที่ช่วงคลื่น $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ ใช้ความเร็วในการสแกน (scan) 16 ครั้ง และความละเอียด 4.0 cm^{-1} โดยใช้โหมดแบบส่องผ่าน (transmittance, T)

1.4 ได้ผลการทดสอบเป็นสเปกตรัมของตัวอย่างที่ทดสอบ โดยรายงานค่าเป็นร้อยละการส่องผ่าน (% transmittance) และเลขคลื่น (wave number)

2. ขั้นตอนในการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดและฟิล์มนาโนคอมพอลิผสมพอลิพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

2.1 เตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มให้มีขนาด 5×5 เซนติเมตร

2.2 นำฟิล์มตัวอย่างไปใส่ในแผ่นใส่ตัวอย่างแล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์โดยวัดที่ช่วงคลื่น $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ ใช้ความเร็วในการสแกน (scan) 16 ครั้ง และความละเอียด 4.0 cm^{-1} โดยใช้โหมดแบบส่องผ่าน (transmittance, T)

2.3 ได้ผลการทดสอบเป็นสเปกตรัมของตัวอย่างที่ทดสอบ โดยรายงานค่าเป็นร้อยละการส่องผ่าน (% transmittance) และเลขคลื่น (wave number)



ภาคผนวก ค

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของอนุภาคนาโนไททานเนียมไดออกไซด์ ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง
พอลิพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด และฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิด
ฐานนาโนไททานเนียมไดออกไซด์

**การทดสอบสมบัติทางกายภาพของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม
ระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด และฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/
พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์**

1. การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1.1 เตรียมตัวอย่างทดสอบสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและภาพตัดตามยาวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิดและฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์สำหรับการนำไปวิเคราะห์ภาพตัดตามยาวให้ตัดตัวอย่างให้มีขนาด 10 มิลลิเมตร × 20 มิลลิเมตร จากนั้นนำฟิล์มไปจุ่มในไนโตรเจนเหลวแล้วทำการฉีกตามแนวยาวของฟิล์ม ส่วนการนำไปวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวให้ตัวอย่างให้มีขนาดประมาณ 5 มิลลิเมตร × 5 มิลลิเมตร

1.2 นำเทปกาวยาคาร์บอนติดที่ด้านบนของฐานวางตัวอย่าง (specimen stub) จากนั้นนำฟิล์มตัวอย่างติดลงบนเทปกาวยาคาร์บอน

1.3 นำฐานวางตัวอย่างที่ทำการติดตัวอย่างเสร็จแล้วไปผ่านการฉาบผิวด้วยทองคำภายใต้ภาวะสุญญากาศและการให้กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อให้ทองคำเปลี่ยนสภาพเป็นโมเลกุลและตกลงบนผิวตัวอย่างได้เป็นเนื้อเดียวกันซึ่งจะทำให้พื้นผิวของตัวอย่างมีความสามารถในการนำไฟฟ้าก่อนนำไปวิเคราะห์

1.4 นำตัวอย่างเข้ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อมทำการบันทึกภาพตัวอย่างและข้อมูลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์

2. การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาทางผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด

2.1 เตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มพอลิเมอร์ผสมให้มีขนาดประมาณ 10 มิลลิเมตร × 10 มิลลิเมตร จากนั้นให้ความร้อน 200 องศาเซลเซียส พร้อมกับกดแผ่นฟิล์มเป็นเวลา 20 วินาที เพื่อให้ฟิล์มบางลง

2.2 นำฟิล์มที่ผ่านการให้ความร้อนวางบนสไลด์และปิดผนึกด้วยกระจกปิดสไลด์ นำตัวอย่างที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยใช้กำลังขยาย 40 เท่า ทำการบันทึกภาพและข้อมูลที่ได้

3. การวิเคราะห์ลักษณะความเป็นผลึกด้วยเทคนิคเอ็กซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรสโกปีของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และฟิล์มนาโนคอมพอลิทีพผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

3.1 ใส่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ประมาณ 2 กรัม ในแผ่นแก้วสำหรับใส่ตัวอย่างสำหรับฟิล์มตัวอย่างให้ทำการตัดโดยทำการตัดให้มีขนาด 20 มิลลิเมตร x 20 มิลลิเมตร จากนั้นนำเข้าเครื่องเอ็กซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรสโกปีและสแกนในช่วง 5 ถึง 80 องศา ระดับการสแกน (step scan) 0.02 องศา

3.2 บันทึกผลการทดสอบและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง



ภาคผนวก ง

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด
และฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

**การทดสอบสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับ
พอลิแลคติกแอซิด และฟิล์มนาโนคอมพอสิตพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโน
ไททาเนียมไดออกไซด์**

1. การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

1.1 นำตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 8 มิลลิกรัมใส่ในถ้วยอลูมิเนียม (aluminium crucible) ขนาด 10 ไมโครลิตร แล้วทำการปิดผนึกฝาถ้วย

1.2 ใส่ถ้วยตัวอย่างในเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์จากนั้นปรับตั้งค่าข้อมูลที่ต้องการตามสภาวะที่แสดงไว้ในตารางที่ตารางผนวกที่ 1 ซึ่งทำการวิเคราะห์ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจนและบันทึกค่า โดยพิจารณาค่าที่ได้จากการทดสอบในขั้นตอน 2nd Heat

ตารางผนวกที่ 1 สภาวะการทดสอบด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี

ขั้นตอน	Temperature (°C)	Heating rate (°C/min)
1 st Heat	40-200	5
Hold	200	Hold 10 min.
Cool	200-(-30)	-5
2 nd Heat	(-30)-200	5

1.3 การคำนวณหาร้อยละความเป็นผลึก

$$X_c = \left(\frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{w_{PP} \Delta H_{m,PP}^* + w_{PLA} \Delta H_{m,PLA}^*} \right) \times 100 \quad (\text{สมการที่ 2})$$

โดย X_c = ร้อยละความเป็นผลึก

ΔH_m = ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (melting enthalpy)

ΔH_{cc} = ความร้อนแฝงของการตกผลึก (cold crystallization enthalpy)

$\Delta H_{m,PP}^*$ = ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวสำหรับพอลิโพรพิลีนที่ระดับความ

เป็นผลึกร้อยละ 100 (188.9 จูลต่อกรัม)

$\Delta H^*_{m,PLA}$ = ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวสำหรับพอลิแลคติกแอซิดที่ระดับ
ความเป็นผลึกร้อยละ 100 (93 จูลต่อกรัม)

W_{PP} = สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิโพรพิลีน

W_{PLA} = สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิแลคติกแอซิด

2. การวิเคราะห์อุณหภูมิการสลายตัวด้วยเครื่องวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน

2.1 นำตัวอย่างน้ำหนักประมาณ 8 มิลลิกรัมใส่ในถ้วยอลูมิเนียม (aluminium crucible) ขนาด 10 ไมโครลิตรแล้วทำการปิดผนึกฝาถ้วย

2.2 ใส่ถ้วยตัวอย่างในเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนนาไลเซอร์จากนั้นปรับตั้งค่าข้อมูลตามสภาวะการทดสอบที่ต้องการ โดยทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 40-600 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) ภายใต้สภาวะไนโตรเจนที่มีอัตราการไหลเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที (mL/min .)



ภาคผนวก จ

การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด
และฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททานเนียมไดออกไซด์

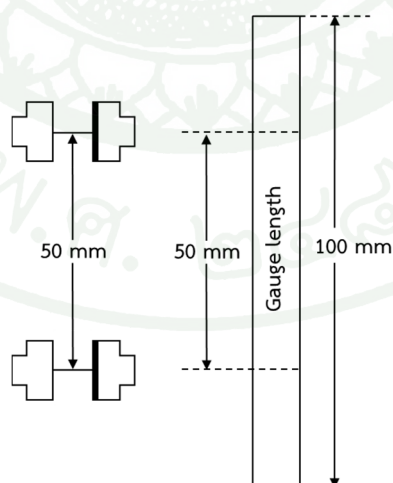
การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด และ ฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

1. การทดสอบสมบัติเชิงกล

1.1 เตรียมตัวอย่างโดยตัดฟิล์มตัวอย่างขนาดเท่ากับ 10 มิลลิเมตร × 100 มิลลิเมตร จากนั้นทำการวัดความหนาของตัวอย่าง ตัวอย่างละ 5 จุด และหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบต่อไป โดยก่อนการทดสอบจะต้องนำตัวอย่างเก็บในตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ 50) เป็นเวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมง

1.2 ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องอินสตรอนยูนิเวอร์ซอลเทสติงแมชชีนมาตรฐาน ASTM D882 โดยสภาวะในการทดสอบคือ ใช้โหลดเซลล์ (load cell) ขนาด 5 กิโลนิวตัน และหัวทดสอบแบบแรงดึง (tension) ที่มีลักษณะเป็นหัวหนีบ 2 หัว ทำการติดตั้งเครื่องให้พร้อมสำหรับการใช้งาน จากนั้นทำการตั้งระยะห่างระหว่างหัวหนีบให้ได้ 5 มิลลิเมตร เริ่มการทดสอบด้วยการการยึดปลายข้างหนึ่งของชิ้นงานให้แน่นแล้วจึงยึดปลายอีกด้านหนึ่งและความเร็วในการดึงที่ใช้คือ 50 มิลลิเมตรต่อนาที

1.3 บันทึกผลการทดสอบและข้อมูลที่ได้จากเครื่อง



ภาพผนวกที่ จ1 ตัวอย่างชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกล



ภาคผนวก ฉ

การทดสอบสมบัติการสกัดกันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด
และฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

การทดสอบสมบัติการสกัดกั้นของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด และฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

1. การทดสอบสภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน

1.1 เตรียมตัวอย่างโดยตัดตัวอย่างให้มีขนาด 60 มิลลิเมตร x 60 มิลลิเมตร จากนั้นวัดความหนาชิ้นงาน 5 จุด เพื่อทำการหาค่าเฉลี่ย จากนั้นใส่ตัวอย่างในแผ่นสติ๊กเกอร์อลูมิเนียมที่มีการเจาะรูตรงกลางเป็นวงกลมขนาดมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5 เซนติเมตร โดยก่อนการทดสอบจะต้องนำตัวอย่างเก็บในตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ 50) เป็นเวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมง

1.2 กดปุ่ม start ที่เครื่องทดสอบโดยระยะเวลาในการทดสอบประมาณ 1 ชั่วโมง 15 นาที ต่อการทดสอบหนึ่งครั้ง

1.3 บันทึกผลการทดสอบ (อัตราการซึมผ่านออกแก๊สออกซิเจน) และข้อมูลที่ได้จากเครื่อง

1.4 นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาสภาพการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนตามสมการที่ 3

$$OP = OTR \cdot (\Delta X / \Delta P) \quad (\text{สมการที่ 3})$$

โดย OP = สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจน

OTR = อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (oxygen transmission rate)

ΔX = ความหนาของแผ่นฟิล์ม

ΔP = ความแตกต่างของความดันระหว่าง 2 ด้านของแผ่นฟิล์ม

2. การทดสอบสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ

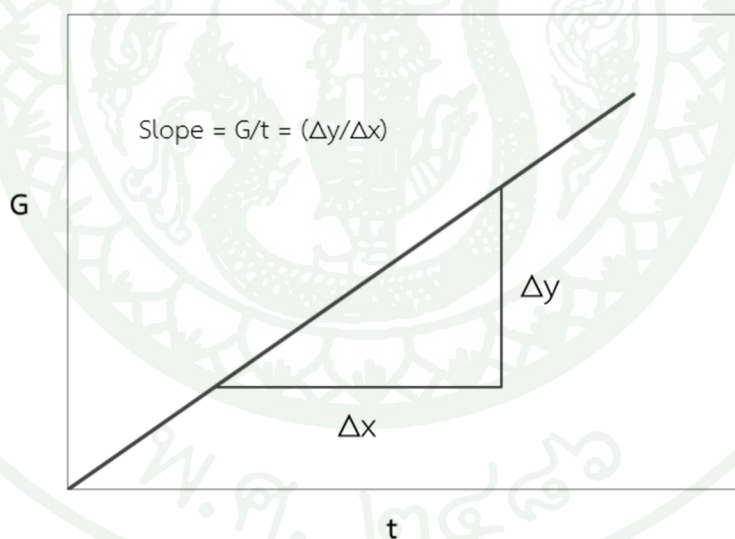
2.1 เตรียมตัวอย่างโดยตัดตัวอย่างให้มีขนาด 70 มิลลิเมตร x 70 มิลลิเมตร จากนั้นวัดความหนาชิ้นงาน 5 จุด เพื่อทำการหาค่าเฉลี่ย จากนั้นใส่ตัวอย่างในตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ 50) เป็นเวลาอย่างน้อย 48 ชั่วโมง

2.2 อบเม็ดซิลิกาด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นเทซิลิกาประมาณ 80 กรัม ลงในถ้วยอะลูมิเนียม และปิดผนึกฟิล์มลงบนถ้วยอะลูมิเนียมด้วยพาราฟิน

2.3 ชั่งน้ำหนักถ้วยอะลูมิเนียมที่มีฟิล์มตัวอย่างด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง เพื่อบันทึกน้ำหนักเริ่มต้น

2.4 หลังการชั่งน้ำหนักที่เวลาเริ่มต้น ให้เก็บถ้วยอะลูมิเนียมในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 23 องศาเซลเซียส และควบคุมความชื้นที่ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 โดยให้ทำการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงที่เวลาเดิมของทุกวันจนน้ำหนักมีค่าคงที่

2.5 นำข้อมูลที่ได้มาทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นกับเวลาเพื่อหาค่าความชัน (slope) และทำการคำนวณหาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำตามสมการที่ 4



ภาพผนวกที่ ๑1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นกับเวลา

$$WVTR = G/(t \cdot A) = \text{Slope}/A = (\Delta y/\Delta x)/A \quad (\text{สมการที่ 4})$$

โดย WVTR = อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission rate)
G = น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น

t = เวลา

$\Delta y/\Delta x$ = ค่าความชันกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นกับเวลา

A = พื้นที่ของแผ่นฟิล์มบริเวณที่มีการซึมผ่านของไอน้ำ

2.6 คำนวณสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำตามสมการด้านล่าง

$$WVP = WVTR \cdot (\Delta X / \Delta P) \quad (\text{สมการที่ 5})$$

$$\Delta P = S \Delta R \quad (\text{สมการที่ 6})$$

โดย WVP = สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ

ΔX = ความหนาของแผ่นฟิล์ม

ΔP = ความแตกต่างของความดันระหว่าง 2 ด้านของแผ่นฟิล์ม

S = ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่ $23\text{ }^{\circ}\text{C} = 2.808\text{ kPa}$

ΔR = ความแตกต่างของค่าความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 2 ด้านของแผ่นฟิล์ม



ภาคผนวก ข

การทดสอบสมบัติการต้านจุลินทรีย์ของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิด
ฐานนาโนไททานเนียมไดออกไซด์

การทดสอบสมบัติการต้านจุลินทรีย์ของฟิล์มนาโนคอมพอลิผสมพอลิโพรพิลีน/
พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

อุปกรณ์

1. วัสดุและสารเคมี

- 1.1 เชื้อจุลินทรีย์ *Enterococcus faecalis* ATCC 29212
- 1.2 อาหารเลี้ยงจุลินทรีย์ (nutrient broth: Himedia M002, India)
- 1.3 วุ้น (agar: วุ้นผง พี ซี เอ)
- 1.4 สารละลายเอทานอล (ethanol)
- 1.5 น้ำกลั่น (distilled water)
- 1.6 น้ำปราศจากไอออน (deionized water)

2. วัสดุและอุปกรณ์

- 2.1 กล่องพลาสติกอะคริลิก
- 2.2 หลอดแบคไลท์ (TL-D blacklight blue: TL-D 18W BLB 1SL, Philips)
- 2.3 หม้อนึ่งฆ่าเชื้อด้วยความดันไอน้ำ (autoclave: Model HVA-85, HIRAYAMA, Japan)
- 2.4 ตู้ปลอดเชื้อ (laminar flow cabinet: Heal Force[®] Model 7BZ-HF1500CA2-001, Nison Instrument (Shanghai) Co., Ltd., China)
- 2.5 ตู้บ่มเพาะเลี้ยงเชื้อ (incubator:)
- 2.6 เครื่องปั่นเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifuge: Hettich zentrifugen Model EBA 20, Germany)
- 2.7 จานเพาะเชื้อพลาสติก (plastic petri dish: 633180, Greiner Bio-One GmbH)

วิธีการ

1. เชื้อจุลินทรีย์ทดสอบ

ทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการต้านจุลินทรีย์ *Enterococcus faecalis* ATCC 29212 จากศูนย์เก็บรักษาและรวบรวมสายพันธุ์จุลินทรีย์ทางการแพทย์ ฝ่ายทรัพยากรกลางทางห้องปฏิบัติการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สาธารณสุข กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ โดยทำการแยกเชื้อบริสุทธิ์และเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อ (nutrient agar) ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

2. การเตรียมสารละลายจุลินทรีย์ทดสอบ

ทำการถ่ายเชื้อจุลินทรีย์ลงในอาหารเชื้อเหลวปริมาตร 10 มิลลิลิตร และนำไปปั่นในตู้ปั่นเพาะเชื้อที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นนำมาผ่านการปั่นเหวี่ยงที่ 5,000 $\times g$ เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์ตกตะกอนและแยกอาหารเหลวออกจากเชื้อจุลินทรีย์ที่ตกตะกอน พร้อมทั้งทำการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 10 มิลลิลิตร เป็นจำนวน 2 ครั้ง แล้วนำไปแขวนลอย (resuspending) ในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 10 มิลลิลิตรเพื่อให้ได้สารละลายจุลินทรีย์ทดสอบ โดยปริมาณเชื้อเริ่มต้นของสารละลายจุลินทรีย์ที่ใช้จะมีค่าประมาณ $10^7 - 10^8$ ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร

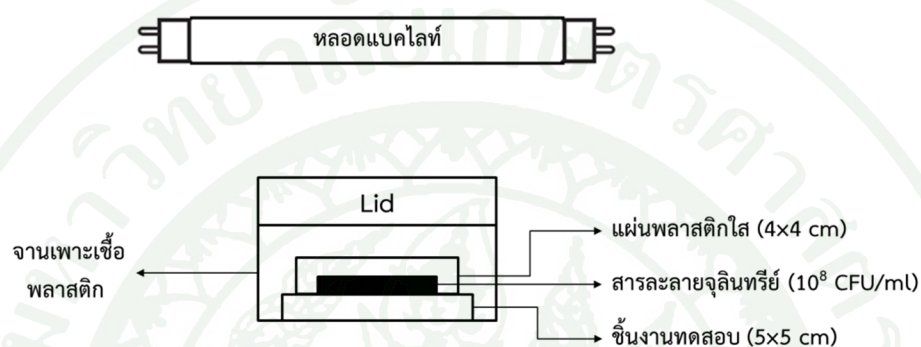
3. การทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการต้านเชื้อจุลินทรีย์

3.1 ทำการเตรียมฟิล์มตัวอย่างโดยการตัดให้มีขนาดเท่ากับ 5 เซนติเมตร $\times$ 5 เซนติเมตร และตัดแผ่นพลาสติกใสให้มีขนาดเท่ากับ 4 เซนติเมตร $\times$ 4 เซนติเมตร โดยก่อนการทดสอบฟิล์มดังกล่าวจะถูกทำให้ปราศจากเชื้อด้วยการจุ่มในสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70

3.2 วางฟิล์มตัวอย่างในเพลทพลาสติกภายใต้สภาวะที่ปราศจากเชื้อ จากนั้นหยดสารละลายจุลินทรีย์ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงบนฟิล์มตัวอย่างและวางแผ่นพลาสติกใสลงไปเพื่อให้สารละลายจุลินทรีย์แนบกับฟิล์มตัวอย่างแล้วทำการปิดเพลทด้วยฝาเพลท จากนั้นนำเพลทที่ได้ไปวางภายใต้หลอดแบคไลท์ที่มีความเข้มของแสงยูวีที่ตกกระทบบนพื้นผิวของตัวอย่างประมาณ 1 มิลลิวัตต์

ต่อตารางเซนติเมตรเป็นเวลา 2 ชั่วโมงสำหรับเชื้อ *Enterococcus faecalis* และ 3 ชั่วโมงสำหรับเชื้อ *Escherichia coli*

3.3 นำตัวอย่างออกจากแสงยูวีแล้วทำการล้างทันทีด้วยน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 99 มิลลิลิตร และนำไปนับจำนวนเชื้อด้วยเทคนิค serial dilution spread plate



ภาพผนวกที่ ข1 แสดงวิธีการทดสอบประสิทธิภาพของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการต้านเชื้อจุลินทรีย์

ที่มา: ดัดแปลงจาก Chawengkijwanich and Hayata (2008)



ภาคผนวก ซ
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

1. พิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด

1.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด

ตารางผนวกที่ ข1 ค่ามอดูลัส ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าร้อยละในการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด

ชิ้นงานทดสอบ	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
PP	888.79 ^a ±44.52	28.93 ^c ±1.64	525.76 ^c ±44.04
PLA	2739.85 ^e ±32.62	64.25 ^d ±2.34	7.11 ^a ±1.97
PP/PLA (60:40)	1151.01 ^b ±40.54	19.72 ^a ±0.71	51.02 ^b ±5.28
PP/PLA (50:50)	1246.56 ^c ±41.27	25.59 ^b ±3.25	49.21 ^b ±5.25
PP/PLA (40:60)	1484.26 ^d ±39.82	31.12 ^c ±1.31	26.04 ^{ab} ±2.82

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-e} ที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

1.2 สมบัติการสกัดกันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด

ตารางผนวกที่ ข2 สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนและสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนกับพอลิแลคติกแอซิด

ชิ้นงานทดสอบ	OP ($10^{-17} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{m/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$)	WVP ($10^{-13} \cdot \text{g} \cdot \text{m/s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}$)
PP	3.29 ^e ±0.05	3.17 ^b ±0.43
PLA	2.13 ^a ±0.02	101.69 ^a ±1.03
PP/PLA (60:40)	3.21 ^d ±0.06	8.10 ^d ±0.51
PP/PLA (50:50)	2.97 ^b ±0.02	6.95 ^c ±0.19
PP/PLA (40:60)	3.14 ^c ±0.02	7.86 ^d ±0.34

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-e} ที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

2. ฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

2.1 สมบัติเชิงกลของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ตารางผนวกที่ ข3 ค่ามอดุลัส ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าร้อยละในการยืดตัว ณ จุดขาดของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ชิ้นงานทดสอบ	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
0TiO ₂	1550.94 ^a ±40.14	41.05 ^{bc} ±1.16	68.23 ^b ±6.23
0.25TiO ₂	1594.29 ^{ab} ±69.53	41.95 ^{bc} ±1.93	55.08 ^{ab} ±11.36
0.5TiO ₂	1624.99 ^{ab} ±93.19	42.52 ^{bc} ±1.49	53.74 ^{ab} ±16.79
1.0TiO ₂	1654.19 ^b ±125.93	43.52 ^c ±1.24	50.65 ^a ±9.92
1.5TiO ₂	1559.63 ^{ab} ±153.12	40.03 ^{ab} ±2.93	48.62 ^a ±7.23
2.0TiO ₂	1540.92 ^{ab} ±51.78	38.17 ^a ±1.33	43.18 ^a ±7.11

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-c} ที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (p< 0.05)

2.2 สมบัติการสกัดกั้นของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ตารางผนวกที่ ข4 สภาพให้ซึมผ่านได้ของแก๊สออกซิเจนและสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มนาโนคอมพอสิตผสมพอลิโพรพิลีน/พอลิแลคติกแอซิดฐานนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ชิ้นงานทดสอบ	OP (10 ⁻¹⁷ ·m ³ ·m/m ² ·s·Pa)	WVP (10 ⁻¹³ ·g·m/s·m ² ·Pa)
0TiO ₂	3.72 ^{bc} ±0.02	5.08 ^b ±0.40
0.25TiO ₂	3.60 ^a ±0.03	4.21 ^a ±0.05
0.5TiO ₂	3.69 ^{ab} ±0.04	4.94 ^b ±0.10
1.0TiO ₂	3.64 ^{ab} ±0.12	4.98 ^b ±0.02

ตารางผนวกที่ ซ4 (ต่อ)

ชิ้นงานทดสอบ	OP ($10^{-17} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$)	WVP ($10^{-13} \cdot \text{g} \cdot \text{m}/\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}$)
1.5TiO ₂	3.86 ^d ± 0.04	5.32 ^b ± 0.07
2.0TiO ₂	3.82 ^{cd} ± 0.00	5.14 ^b ± 0.30

หมายเหตุ ตัวอักษร ^{a-d} ที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวนลิน พลอยเพชร
เกิดวันที่	7 มิถุนายน 2533
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์) มหาวิทยาลัยศิลปากร
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	1. Ploypetchara, N., K. Juljerm, C. Wiphanurat, D. Atong and C. Pechyen.2013. Sterilization Effect of γ -Radiation Dose on Polypropylene/Poly(Lactic Acid) Blend Film: Physicochemical and Mechanical Properties, pp. 596-601. <i>In Proceedings of 2nd Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science</i> . Chek Lap Kok, Hong Kong. 2. Ploypetchra, N., P. Suppakul, D. Atong and C. Pechyen. 2014. Blend of Polypropylene/Poly(Lactic Acid) for Medical Packaging Application: Physicochemical, Thermal, Mechanical and Barrier Properties. <i>Energy Procedia</i> XX: 201-210.
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	1. ทุนสนับสนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา โครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรมสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ประจำปี 2555 2. ทุนวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาเพื่อการตีพิมพ์ผลงาน ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ ประจำปี งบประมาณ 2555สำหรับนิสิตที่เข้าศึกษาภาคต้น ปี

การศึกษา 2555

3. ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา
ประจำปี 2557 จากสำนักงานคณะกรรมการ
วิจัยแห่งชาติ (วช.)

