



การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารที่ต้านทานแบคทีเรียจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิ
เนตและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท

โดย

นางสาวณัฐกานต์ ยังชีพยืนอยู่ดี



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารที่ต้านทานแบคทีเรียจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิবিທີ
ลีนซ์ซินเนตและพอลิবিທີลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

DEVELOPMENT OF ANTIBACTERIAL FOOD PACKAGING FILMS FROM POLYMER
BLEND BETWEEN POLY(BUTYLENE SUCCINATE) AND POLY(BUTYLENE
ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE)



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

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2017

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

58402204 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต, พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลต, ไคโตซาน, ซิงค์ออกไซด์

นางสาว ณัฐกานต์ ยังชีพยืนอยู่ดี: การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารที่ต้านทานแบคทีเรียจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกานต์ หงส์ศรีพันธ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารที่ต้านทานแบคทีเรียจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติมเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และนำไปเคลือบผิวด้วยไคโตซานหรืออนุภาคซิงค์ออกไซด์ ในส่วนที่ 1 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติม DCP พบว่าการเติม DCP สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ และทำให้ elongation at break สูงขึ้น เนื่องจากการเชื่อมขวาง แต่ลดความแข็งแรงของฟิล์ม เนื่องจากการขาดของสายโซ่ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิการเกิดผลึกที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเติม DCP มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาอย่างมาก ทำให้ไม่สามารถควบคุมกระบวนการขึ้นรูปได้ จึงมีการเปลี่ยนชนิดของเปอร์ออกไซด์จาก DCP เป็น Perkadox พบว่าสามารถขึ้นรูปได้ดีกว่า โดย Perkadox สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ ทำให้พื้นผิวฟิล์มเรียบมากขึ้น สำหรับสัดส่วนที่เหมาะสมในส่วนที่ 2 คือ 80/20/Perkadox เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดี อย่างไรก็ตามการเติม Perkadox ทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีค่ามุมสัมผัสน้ำลดลง เนื่องจากมีหมู่ปลายสายโซ่ที่มีขั้วมากขึ้น เกิดจากการขาดของสายโซ่ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิการเกิดผลึกที่สูงขึ้น ดังนั้นอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สออกซิเจนจึงเพิ่มขึ้น ในส่วนที่ 3 นำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ไปปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยไคโตรนา พบว่าการใช้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ มีอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอนมากที่สุด เมื่อนำไปเคลือบผิวด้วยไคโตซานหรืออนุภาคซิงค์ออกไซด์ พบว่าการเคลือบผิวส่งผลต่อสมบัติเชิงกลเพียงเล็กน้อย ยกเว้นการเคลือบผิวด้วยไคโตซาน 2 %w/v ทำให้ค่า elongation at break ลดลงอย่างมาก จากความแข็งแรงของไคโตซาน โดยสารเคลือบไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน แต่ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนลดลง สำหรับการเคลือบผิวด้วยไคโตซานจะมีค่ามุมสัมผัสน้ำเพิ่มขึ้น จึงทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำลดลง ในทางกลับการเคลือบผิวด้วยอนุภาคซิงค์ออกไซด์มีค่ามุมสัมผัสน้ำลดลง จึงทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้น และการเคลือบผิวป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนได้ดี นอกจากนี้ฟิล์มที่เคลือบผิวสามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรีย ชนิด *E.coli* และ *S.aureus* ได้ดี รวมถึงสามารถนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารได้อีกด้วย

58402204 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : Poly(butylene succinate), Poly(butylene adipate-co-terephthalate),
Chitosan, Zinc oxide

MISS NATTAKARN YANGCHEEPUENYOODEE : DEVELOPMENT OF
ANTIBACTERIAL FOOD PACKAGING FILMS FROM POLYMER BLEND BETWEEN
POLY(BUTYLENE SUCCINATE) AND POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE)
THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR NATTAKARN HONGSRIPHAN, D.Eng.

This research aimed to study the preparation of antibacterial food packaging films from polymer blends between PBS/PBAT with and without peroxide as a reaction initiator then coated with chitosan or zinc oxide. In part 1, preparation of PBS/PBAT blend films with and without DCP showed that the compatibility and elongation at break were improved after added DCP. However, using DCP reduced film strength, and it was highly reactive thus the casting film process could not be controlled. After changing DCP to Perkadox, it could improve the compatibility by smoothing its surface. The optimal ratio in part 2 was 80/20/Perkadox due to the good mechanical properties. However, adding Perkadox reduced the water contact angle of the films because chain scission increased the polar chain ends. Therefore, the water vapor transmission rate (WVTR) and oxygen permeability (OP) were increased. In part 3, the surface of 80/20/Perkadox polymer blended films was improved by corona treatment, it turned out that the electrical input of 3 ampere had a higher O/C percentage. When coated with chitosan or zinc oxide, it slightly affected mechanical properties. In contrast, coating with 2% w/v chitosan reduced elongation at break significantly. The coating did not affect thermal properties but reduce thermal stability. For chitosan coating, the water contact angle was increased. As a result, the WVTR was decreased. On the other hand, the zinc oxide coating lowered contact angle; and the WVTR was thus increased. The coating prevented the OP very well. The coated films also had antibacterial activity against *E.coli* and *S.aureus*, and could be used as a biodegradable food packaging.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของ รองศาสตราจารย์ ดร. ญัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้คอยให้คำปรึกษาและเสียสละเวลาในการชี้แนะ แนวทางการวิจัย การวิเคราะห์ผลการวิจัย ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องอย่างถี่ถ้วน อีกทั้งยัง ช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองวิจัยอีกด้วย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศรินทร์ เขมชะปะบุตร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุตศิริ เหมศรี และรองศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร ที่ให้ข้อเสนอแนะ ตรวจสอบ แก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ และสละในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่คอยอบรมสั่งสอน ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้ง ปวง และขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้โอกาสในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ ทั้งการสนับสนุนด้านสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ ขอขอบคุณคุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชา สำหรับการอำนวยความสะดวกทางด้านการจัดหาวัสดุอุปกรณ์และสารเคมี ขอขอบคุณคุณไพโรจน์ ตั้งสุภธวัช วิศวกรประจำภาควิชา สำหรับความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือและเครื่องจักร ขอขอบคุณคุณทิพาภรณ์ ทรัพย์สมบูรณ์ นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำ และคอยให้ความช่วยเหลือ ในการทดสอบการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย และขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชา สำหรับการอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานทุก ๆ ด้าน จนกระทั่งงานวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ บริษัท พีทีที เอ็มซีซี ไปโอเคม จำกัด (ประเทศไทย) สำหรับความอนุเคราะห์เม็ด พลาสติก พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ สำหรับ ความอนุเคราะห์สารเคมี คือ เปอร์กาต็อกซ์ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ และน้อง นักศึกษาภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกคน สำหรับความ ห่วงใย ความมีน้ำใจ และความช่วยเหลือตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดาและมารดาที่คอยสนับสนุนด้านการเรียน คอยให้กำลังใจเสมอมา และสำหรับทุกสิ่งทุกอย่างที่มีให้อย่างไม่สิ้นสุด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ญัฐกานต์ ยังชีพยืนอยู่ดี

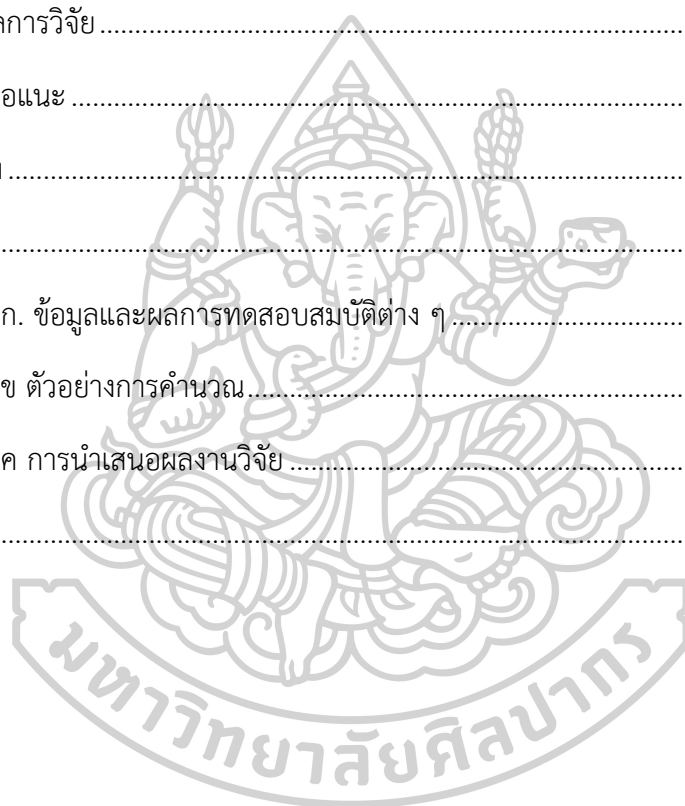
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญตาราง.....	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 แนวทางของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย.....	5
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	5
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับและการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ	7
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	9
2.2 การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้.....	11
2.3 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate) หรือ PBS).....	12
2.4 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท(Poly(butylene adipate-co-terephthalate) หรือ PBAT)	16
2.5 พอลิเมอร์ผสมและการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม.....	17
2.6 สารประกอบอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ (Organic peroxide).....	22

2.7 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide).....	24
2.8 ไคโตซาน (Chitosan)	26
2.9 การปรับสภาพพื้นผิว (surface modification)	29
2.10 การบรรจุอาหารแบบต่อต้านจุลินทรีย์	34
2.11 แบบคิที่เรีย.....	37
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	40
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	57
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	57
3.2 เครื่องมือที่ใช้ดำเนินการวิจัย	58
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	59
3.3.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP	59
3.3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox.....	60
3.3.3 การขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยกระบวนการหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์ม (Cast film extrusion).....	61
3.3.4 การปรับปรุงสภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยโคโรนา (Corona treatment)	62
3.3.5 การเตรียมสารต้านทานแบคทีเรียสำหรับเคลือบผิวฟิล์มพอลิเมอร์.....	62
3.3.6 การเคลือบฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยสารละลายไคโตซานหรือสารแขวนลอยอนุภาคซิงค์ออกไซด์.....	64
3.3.7 ขั้นตอนการทดสอบและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม.....	65
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	81
4.1 การศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา.....	82
4.1.1 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	82
4.1.2 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC).....	85

4.1.3 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM).....	88
4.2 การศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา	91
4.2.1 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM).....	91
4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	94
4.2.3 ผลการศึกษาค่ามุมสัมผัสผิวน้ำ (Water contact angle).....	98
4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC).....	100
4.2.5 ผลการศึกษาเสถียรภาพความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)	104
4.2.6 ผลการศึกษ้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR)	106
4.2.7 ผลการศึกษ้อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Oxygen Permeability, OP)....	108
4.3 การศึกษาผลของการเคลือบผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย	110
4.3.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบเคมีที่พื้นผิวด้วยเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS).....	110
4.3.2 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM).....	113
4.3.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	115
4.3.4 ผลการศึกษาค่ามุมสัมผัสผิวน้ำ (Water contact angle).....	118
4.3.5 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC).....	119
4.3.6 ผลการศึกษาเสถียรภาพความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)	121

4.3.7 ผลการศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR)	124
4.3.8 ผลการศึกษาอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Oxygen Permeability, OP)....	125
4.3.9 ผลการศึกษาสมบัติการต้านทานแบคทีเรีย (Antibacteria Activity).....	128
4.3.10 การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร.....	132
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	136
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	136
5.2 ข้อเสนอแนะ	138
รายการอ้างอิง	139
ภาคผนวก.....	145
ภาคผนวก ก. ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ.....	146
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	180
ภาคผนวก ค การนำเสนอผลงานวิจัย.....	184
ประวัติผู้เขียน.....	193



สารบัญภาพ

หน้า

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	13
ภาพที่ 2.2 แหล่งสารตั้งต้นจากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมี ที่ใช้ในกระบวนการผลิตพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	13
ภาพที่ 2.3 แผนผังกระบวนการผลิตสารตั้งต้น Bio-succinic Acid (BSA) และเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด Polybutylene Succinate (PBS).....	15
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท	17
ภาพที่ 2.5 แสดงผลกระทบของสัดส่วนการผสมที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม	19
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างเคมีของ Dicumul peroxide	22
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของ Perkadox® 14s	23
ภาพที่ 2.8 กราฟระหว่างครึ่งชีวิตการแตกตัวของเปอร์ออกไซด์และอุณหภูมิ	24
ภาพที่ 2.9 โครงสร้างของโคติน และโคโตซาน.....	26
ภาพที่ 2.10 วิธีการเตรียมผิวหน้าวัสดุด้วย Corona Discharge Treatment	30
ภาพที่ 2.11 a) อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองโคโรนาดิสชาร์จ b) ลักษณะโคโรนาดิสชาร์จ	31
ภาพที่ 2.12 ลักษณะฉนวนที่ทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวและการเกิดดิสชาร์จ บางส่วนตามผิว	32
ภาพที่ 2.13 วิธีการเตรียมผิวหน้าวัสดุด้วย Flame treatment	34
ภาพที่ 2.14 วิธีการเตรียมผิวหน้าวัสดุด้วย Plasma treatment	34
ภาพที่ 2.15 โครงสร้างเซลล์ของแบคทีเรีย	38
ภาพที่ 2.16 แสดงผลของเวลาในการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมา (A) สมบัติเชิงกล และ (B) ค่ามุมสัมผัสน้ำของฟิล์ม PE	42

ภาพที่ 2.17 แสดงภาพ AFM ใน 3 มิติของฟิล์ม PE ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วย พลาสมา (หลังจากการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมาเป็นเวลา 10 วินาที).....	42
ภาพที่ 2.18 (A) ATR-FTIR และ (B) XPS สเปกตรัมของฟิล์ม PE ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุง สภาพผิวด้วยพลาสมาเป็นเวลา 10 วินาที.....	43
ภาพที่ 2.19 จำนวนโคโลนีของฟิล์ม PE และฟิล์ม PE ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมา และ เคลือบผิวด้วยโคโตซานความเข้มข้น 0.25, 0.75 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	45
ภาพที่ 2.20 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากเทคนิค ATR-FTIR ของฟิล์ม PP (a) ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพ ผิว และผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาที่เวลา (b) 2 วินาที (c) 10 วินาที (d) 30 วินาที.....	46
ภาพที่ 2.21 ค่าดัชนีหักเหของฟิล์ม PP ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาที่เวลาต่าง ๆ	46
ภาพที่ 2.22 แสดงภาพ AFM ของฟิล์ม PP (a) ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว และผ่านการปรับปรุง สภาพผิวด้วยพลาสมาที่เวลา (b) 2 วินาที (c) 30 วินาที.....	47
ภาพที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสน้ำกับเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสภาพผิว	48
ภาพที่ 2.24 แสดงผลของเวลาและปริมาณการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อความสามารถในการ ด้านต้านแบคทีเรียชนิด <i>E.coli</i> ของฟิล์ม PLA/ZnO biocomposite	49
ภาพที่ 2.25 ภาพที่ได้จากเทคนิค SEM แสดงพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBS ที่ไม่ ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว (a) และผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยกระแสไฟฟ้า 4 (b).....	50
ภาพที่ 2.26 XPS survey spectrum ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS	51
ภาพที่ 2.27 ค่ามุมสัมผัสน้ำที่ผิว (water contact angle) ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ ที่ไม่ผ่านการ ปรับปรุงสภาพผิว (a) และผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยกระแสไฟฟ้าที่ 4 (b).....	53
ภาพที่ 2.28 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วย โคโร นา รวมไปถึงฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่ถูกเคลือบผิวด้วยสารละลายโคโตซานที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยที่ ความแตกต่างทางนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ได้ดำเนินการตามการทดสอบ Duncan's test	54
ภาพที่ 2.29 เปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรีย (%Reduction) ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่เคลือบ ผิวด้วยสารละลายโคโตซานที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อแบคทีเรียชนิด <i>S.aureus</i>	55
ภาพที่ 2.30 เปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรีย (%Reduction) ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์	56

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ภาพที่ 3.1 แสดงภาพจำลองและสภาวะที่ใช้ในการหลอมผสมด้วยเครื่อง twin screw extruder .	61
ภาพที่ 3.2 เครื่องหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์มที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วนต่าง ๆ	61
ภาพที่ 3.3 เครื่องระเบิดผิวพลาสติกด้วยประจุไฟฟ้าโคโรนา (Corona treatment)	62
ภาพที่ 3.4 สารละลายไคโตซานความเข้มข้น a) 1% w/v ก่อนละลาย b) 1 % w/v หลังละลาย c) 2 % w/v ก่อนละลาย d) 2 % w/v หลังละลาย.....	63
ภาพที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการล้างฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบด้วยสารละลายไคโตซาน และการวัดค่า pH ด้วยเครื่อง pH meter	65
ภาพที่ 3.6 เครื่อง Universal testing machine	66
ภาพที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM).....	67
ภาพที่ 3.8 เครื่องมือทดสอบสมบัติทางความร้อน Differential scanning calorimeter (DSC).....	68
ภาพที่ 3.9 เครื่องมือทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน Thermogravimetric Analyzer (TGA).....	68
ภาพที่ 3.10 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ติดบนปากขวดทดสอบ (ภาพซ้าย) และนำขวดทดสอบไปวางไว้ใน Desiccator ภายใต้สภาวะที่ทดสอบ (ภาพขวา).....	70
ภาพที่ 3.11 แสดงภาพจำลองหลักการทำงานของเครื่องทดสอบการซึมผ่านของแก๊ส.....	71
ภาพที่ 3.12 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน ของบริษัท Brugger feinmechanik จำกัด ประเทศเยอรมัน	71
ภาพที่ 3.13 เครื่องทดสอบค่ามุมสัมผัสผิวน้ำ (Water contact angle tester).....	72
ภาพที่ 3.14 เครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)	73
ภาพที่ 3.15 การเตรียม Nutrient Agar สำหรับเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย.....	74
ภาพที่ 3.16 การเตรียม Nutrient Broth สำหรับเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย.....	74
ภาพที่ 3.17 การเตรียมสารละลายเจือจางโซเดียมคลอไรด์	75
ภาพที่ 3.18 การสนไฟห้วงถ่ายเชื้อในตะเกียงแอลกอฮอล์ และการใช้ห้วงลากเชื้อจาก stock เชื้อแบคทีเรีย	75

ภาพที่ 3.19 การเปรียบเทียบความขุ่นของการเพาะเชื้อแบคทีเรีย โดยใช้วิธี McFARLAND SCALE ลำดับที่ 1	76
ภาพที่ 3.20 การบ่มเชื้อแบคทีเรียในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส.....	77
ภาพที่ 3.21 วิธีการทำให้เชื้อแบคทีเรียเจือจางลงครึ่งละ 10 เท่า (10 fold serial dilutions).....	77
ภาพที่ 3.22 ขั้นตอนการเตรียมมะเขือเทศใส่ลงในบรรจุภัณฑ์และปิดผนึก	79
ภาพที่ 3.23 ขั้นตอนการเตรียมขนมปังแบ่งขาวใส่ลงในบรรจุภัณฑ์และปิดผนึก	80
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	
ภาพที่ 4.1 ความแข็งแรงต่อการดึงยึดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติมและไม่เติม DCP	83
ภาพที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การยึดตัวก่อนการแตกหักของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่ เติมและเติม DCP	83
ภาพที่ 4.3 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและ เติม DCP.....	84
ภาพที่ 4.4 DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT a) ไม่เติม DCP b) เติม DCP.....	86
ภาพที่ 4.5 DSC thermogram ในขั้นตอนการทำให้เย็นตัว ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT a) ไม่เติม DCP b) เติม DCP.....	87
ภาพที่ 4.6 ภาพถ่ายที่ได้จากเทคนิค SEM แสดงภาคตัดขวาง (cross section) ของฟิล์มพอลิเมอร์ ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติมและไม่เติม DCP ที่กำลังขยาย 1500 เท่า.....	89
ภาพที่ 4.7 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติม DCP ในระหว่าง กระบวนการ cast film extrusion	90
ภาพที่ 4.8 ปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่ PBS.....	92
ภาพที่ 4.9 ปฏิกิริยาการรวมกันของสายโซ่ PBS กับ PBS ผ่านปฏิกิริยา free radical	92
ภาพที่ 4.10 ปฏิกิริยาการรวมกันของสายโซ่ PBS กับ PBAT ผ่านปฏิกิริยา free radical	92
ภาพที่ 4.11 ภาพถ่ายที่ได้จากเทคนิค SEM แสดงภาคตัดขวาง (cross section) ของฟิล์มพอลิเมอร์ ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติมและไม่เติม Perkadox ที่กำลังขยาย 1500 เท่า	93

ภาพที่ 4.12 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox.....	95
ภาพที่ 4.13 ความแข็งแรงต่อการดึงยึดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox.....	96
ภาพที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์การยึดตัวก่อนการแตกหักของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox.....	96
ภาพที่ 4.15 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox.....	97
ภาพที่ 4.16 ค่ามุมสัมผัสน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox.....	99
ภาพที่ 4.17 DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT a) ไม่เติม Perkadox b) เติม Perkadox.....	101
ภาพที่ 4.18 DSC thermogram ในขั้นตอนการให้เย็นตัว ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT a) ไม่เติม Perkadox b) เติม Perkadox.....	102
ภาพที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนักที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค TGA a) ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PBS/PBAT b) ฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PBS/PBAT/Perkadox.....	105
ภาพที่ 4.20 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติมและไม่เติม Perkadox.....	107
ภาพที่ 4.21 อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox.....	109
ภาพที่ 4.22 XPS Survey spectrum ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา โดยใช้กระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน	111
ภาพที่ 4.23 กระบวนการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนาและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น	111
ภาพที่ 4.24 ภาพถ่ายที่ได้จากเทคนิค SEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ...	115
ภาพที่ 4.25 ความแข็งแรงต่อการดึงยึดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา และเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย	116

ภาพที่ 4.26 เเปอร์เซ็นต์การยึดตัวก่อนการแตกหักของของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย	117
ภาพที่ 4.27 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย	117
ภาพที่ 4.28 ค่ามุมสัมผัสน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Prkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย	119
ภาพที่ 4.29 DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม.....	120
ภาพที่ 4.30 การสลายตัวทางความร้อนของ PVA	121
ภาพที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนักที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค TGA ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิว ด้วยโคโรนา และฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย.....	122
ภาพที่ 4.32 กราฟ DTG ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิว ด้วยโคโรนา และฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย.....	123
ภาพที่ 4.33 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่าน การปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย	125
ภาพที่ 4.34 จำลองเส้นทางการซึมผ่านของแก๊สที่คดเคี้ยว (tortuous pathway) ในบริเวณชั้นเคลือบ	126
ภาพที่ 4.35 อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย.....	127
ภาพที่ 4.36 จำลองการต้านแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบ ด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย	128
ภาพที่ 4.37 การเข้าทำปฏิกิริยาของอนุภาคซิงค์ออกไซด์กับแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ	130
ภาพที่ 4.38 จำนวนโคโลนีที่นับได้ต่อมิลลิลิตร (CFU/ml) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เคลือบ และเคลือบด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย ต่อแบคทีเรียชนิด a) <i>E.coli</i> b) <i>S.aureus</i>	131
ภาพที่ 4.39 แสดงลักษณะทางกายภาพของมะเขือเทศราชินี (cherry tomato) ก่อนและหลังจากเก็บรักษาในฟิล์มบรรจุภัณฑ์เป็นเวลา 7 และ 25 วัน.....	134

ภาพที่ 4.40 แสดงลักษณะทางกายภาพของขนมปังแผ่นขาวหลังจากเก็บรักษาใน फिल्मบรรจุภัณฑ์ เป็นเวลา 35 วัน..... 134

ภาพผนวก ก.

ภาพผนวก ก.1 DSC thermogram ของฟิล์ม Neat PBS 148

ภาพผนวก ก.2 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 97/3..... 148

ภาพผนวก ก.3 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 95/5..... 149

ภาพผนวก ก.4 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 93/7..... 149

ภาพผนวก ก.5 DSC thermogram ของฟิล์ม PBS/DCP 150

ภาพผนวก ก.6 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 97/3/DCP..... 150

ภาพผนวก ก.7 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 97/3/DCP..... 151

ภาพผนวก ก.8 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 95/5/DCP..... 151

ภาพผนวก ก.9 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง Internal mixer ของพอลิเมอร์ผสม PBS/DCP สัดส่วน 100/0.001..... 152

ภาพผนวก ก.10 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง Internal mixer ของพอลิเมอร์ผสม PBAT/DCP สัดส่วน 100/0.001..... 153

ภาพผนวก ก.11 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง Internal mixer ของพอลิเมอร์ผสม PBS/PBAT/DCP สัดส่วน 95/5/0.001 154

ภาพผนวก ก.12 DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติม Perkdaox 156

ภาพผนวก ก.13 DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติม Perkdaox 157

ภาพผนวก ก.14 15 DSC thermogram ในขั้นตอนการทำให้เย็นตัวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติม Perkdaox 158

ภาพผนวก ก.16 DSC thermogram ในขั้นตอนการทำให้เย็นตัวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติม Perkdaox 159

ภาพผนวก ก.17 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์ม Neat PBS 160

ภาพผนวก ก.18	เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 95/5	160
ภาพผนวก ก.19	เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 90/10	161
ภาพผนวก ก.20	เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 85/15	161
ภาพผนวก ก.21	เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20	162
ภาพผนวก ก.22	เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์ม PBS/Perkadox.....	162
ภาพผนวก ก.23	เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 95/5/Perkaodox.....	163
ภาพผนวก ก.24	เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 90/10/Perkaodox....	163
ภาพผนวก ก.25	เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 85/15/Perkaodox....	164
ภาพผนวก ก.26	เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkaodox....	164
ภาพผนวก ก.27	ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง Internal mixer ของพอลิเมอร์ผสม PBS/Perkadox สัดส่วน 100/0.001.....	168
ภาพผนวก ก.28	ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง Internal mixer ของพอลิเมอร์ผสม PBAT/Perkadox สัดส่วน 100/0.001.....	169
ภาพผนวก ก.29	ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง Internal mixer ของพอลิเมอร์ผสม PBS/PBAT/Perkadox สัดส่วน 80/20/0.001.....	170
ภาพผนวก ก.30	DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม	172
ภาพผนวก ก.31	เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มสูตร untreated.....	173
ภาพผนวก ก.32	เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มสูตร treated 3 A	173
ภาพผนวก ก.33	เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มที่เคลือบด้วย Chitosan 1 %w/v.....	174
ภาพผนวก ก.34	เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มที่เคลือบด้วย Chitosan 2 %w/v.....	174
ภาพผนวก ก.35	เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มที่เคลือบด้วย ZnO 1 %w/v	175
ภาพผนวก ก.36	เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มที่เคลือบด้วย ZnO 2 %w/v	175

ภาคผนวก ข.

ภาพผนวก ข.1 ภาพประกอบการคำนวณเปอร์เซ็นต์ผลึกของ PBS ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม 181

ภาพผนวก ข.2 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปต่อพื้นที่แลกเปลี่ยนไอน้ำ (Q/A) กับเวลา (t)..... 182



สารบัญตาราง

หน้า

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 2.1 การบรรจุอาหารแบบต่อต้านจุลินทรีย์โดยใช้สารต้านจุลินทรีย์จากธรรมชาติ	35
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีและอัตราส่วนอะตอมของฟิล์ม PE ที่ได้จากเทคนิค XPS	44
ตารางที่ 2.3 การลดทอน (%R) ของ <i>E.coli</i> เมื่อสัมผัสกับฟิล์ม PLA และ PLA/ZnO biocomposite ที่เวลา 1, 24, 48 และ 5 วัน	49
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมี อัตราส่วนอะตอมบนพื้นผิว และเปอร์เซ็นต์ของพันธะทางเคมีที่แตกต่างกันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพผิวด้วยโคโรนา	52

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อย่อและสัดส่วนการผสมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา	59
ตารางที่ 3.2 แสดงข้อย่อและสัดส่วนการผสมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา	60
ตารางที่ 3.3 แสดง dilution factor ของแต่ละหลอดทดลองที่มีการเจือจางเชื้อแบคทีเรีย	78

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP สัดส่วนต่างๆ	88
ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox สัดส่วนต่างๆ	103
ตารางที่ 4.3 แสดงอุณหภูมิที่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมและเติม Perkadox สัดส่วนต่าง ๆ เริ่มเกิดการสลายตัวทางความร้อน (T_{onset}) และอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนสูงสุด (T_d)	106
ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สออกซิเจนเฉลี่ยที่ผ่านการ normalised และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox .	109

ตารางที่ 4.5 แสดงองค์ประกอบทางเคมี และอัตราส่วนอะตอมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา โดยใช้กระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน.....	112
ตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย.....	120
ตารางที่ 4.7 แสดงอุณหภูมิที่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรียเริ่มเกิดการสลายตัวทางความร้อน (T_{onset}) อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนสูงสุด (T_d) และเปอร์เซ็นต์ตกค้าง (%Residue)	123
ตารางที่ 4.8 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สออกซิเจนเฉลี่ยที่ผ่านการ normalised และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย.....	127
ตารางที่ 4.9 แสดงจำนวนโคโลนีที่นับได้ต่อมิลลิเมตร และเปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านและไม่ผ่านการเคลือบด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย ต่อแบคทีเรียชนิด <i>E.coli</i> และ <i>S.aureus</i>	130
ตารางผนวก	
ตารางผนวก ก.1 สรุปค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน Tensile strength, Elongation at break และ Tear strength ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP สกัดส่วนต่างๆ.....	147
ตารางผนวก ก.2 สรุปค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Young's modulus, Tensile strength Elongation at break และ Tear strength ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox สกัดส่วนต่างๆ.....	155
ตารางผนวก ก.3 แสดงข้อมูลดิบของอัตราการซึมผ่านของไอน้ำเฉลี่ยที่ผ่านการ normalised และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox.	165
ตารางผนวก ก.4 แสดงข้อมูลดิบของอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox.....	166
ตารางผนวก ก.5 สรุปค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Tensile strength, Elongation at break และ Tear strength ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย	171

ตารางผนวก ก.6 แสดงข้อมูลดิบของอัตราการซึมผ่านของไอน้ำเฉลี่ยที่ผ่านการ normalised และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย..... 176

ตารางผนวก ก.7 แสดงข้อมูลดิบของอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox 177

ตารางผนวก ก.8 แสดงข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ ต่อเชื้อแบคทีเรียชนิด E.Coli 178

ตารางผนวก ก.9 แสดงข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ ต่อเชื้อแบคทีเรียชนิด S.aureus 179



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

ในปัจจุบันพลาสติกบรรจุภัณฑ์ทางด้านอาหารเข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์ ทำให้การใช้งานพลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น และเนื่องจากพฤติกรรมของมนุษย์ในปัจจุบันที่เน้นความสะดวกสบายและความรวดเร็ว โดยส่วนใหญ่พลาสติกบรรจุภัณฑ์จะทำจากพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น พอลิพรอพิลีน (Polypropylene) พอลิเอทิลีน (Polyethylene) พอลิสไตรีน (Polystyrene) พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride)) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly(ethylene terephthalate)) เป็นต้น เมื่อถูกทิ้งจะกลายเป็นขยะพลาสติก ซึ่งย่อยสลายยากและใช้ระยะเวลาในการย่อยสลาย ทำให้เกิดการสะสมของขยะและเกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม หากต้องการกำจัดขยะด้วยวิธีการเผาไหม้จะทำให้เกิดมลพิษทางอากาศและเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลอยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ก๊าซเรือนกระจก ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ดังนั้นการเลือกใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) จึงได้รับความสนใจอย่างมาก โดยพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดวัตถุดิบได้เป็น 2 ประเภท คือ พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (Petroleum-based biodegradable plastics) และพลาสติกที่ย่อยสลายได้จากชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบมวลชีวภาพ (Bio-based biodegradable plastics) ซึ่งการใช้พลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพนอกจากจะช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกแล้ว ยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate), PBS) จัดเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จัดอยู่ในกลุ่มของพอลิเอสเทอร์สายโซ่ตรง (Aliphatic polyester) ที่กำลังได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานมากขึ้น เนื่องจากสามารถขึ้นรูปได้ง่ายด้วยกระบวนการผลิตพลาสติกทั่วไป มีสมบัติคล้ายกับพอลิเมอร์ในกลุ่มของพอลิโอเลฟินส์ โดยส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในการผลิตฟิล์มรูปแบบต่าง ๆ และในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการเปิดโรงงานเม็ดพลาสติก PBS ภายใต้ชื่อทางการค้า BioPBS ซึ่งถือเป็นโรงงานผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS เชิงพาณิชย์แห่งแรกของโลกที่ใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติและผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ถือเป็น การสร้างนวัตกรรมและผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ภายใต้การร่วมทุนระหว่างบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) และบริษัท มิตรชูบิซิ เคมิคอล คอร์ปอเรชัน (MCC) ประเทศญี่ปุ่น [1] นอกจากนี้ยังเป็นการสนับสนุนการใช้เม็ดพลาสติกของประเทศไทยและลดการนำเข้าเม็ดพลาสติกจากต่างประเทศได้อีกด้วย ซึ่งคาดว่าในอนาคต

อันใกล้นี้ PBS จะมีบทบาทในการใช้เป็นพลาสติกบรรจุภัณฑ์เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการนำ PBS มาทำเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารจะต้องมีการปรับปรุงสมบัติให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน โดยในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยสนใจที่จะนำ PBS มาหลอมผสมกับพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลต (Poly(butylene adipate-co-terephthalate, PBAT) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี จัดอยู่ในกลุ่มของพอลิเอสเตอร์ร่วมระหว่างสายโซ่ตรงและวงอะโรมาติก (Aliphatic-aromatic copolyester) จัดว่าเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง จึงจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ PBS ให้มีความสามารถในการดึงยืดและความต้านทานต่อการฉีกขาดที่สูงขึ้น นอกจากนี้ การเติม PBAT ยังสามารถปรับปรุงความแข็งแรงขณะหลอมเหลว (Melt strength) ให้กับ PBS ทำให้สามารถขึ้นรูปได้ดีขึ้นอีกด้วย

โดยปกติบรรจุภัณฑ์อาหารจำพวกฟิล์มพลาสติกมีการใช้งานอย่างมาก เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูง ย่อยสลายได้ง่าย และราคาถูก ซึ่งฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารมีหน้าที่ห่อหุ้มสิ่งที่อยู่ภายในและปกป้องอาหารจากสภาพแวดล้อมภายนอกเท่านั้น จึงไม่สามารถป้องกันจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเน่าเสียของอาหารได้ ซึ่งส่งผลให้อาหารเสื่อมคุณภาพเร็ว และมีอายุการเก็บรักษาที่สั้น นอกจากนี้ จุลินทรีย์ที่มักพบปนเปื้อนในอาหาร เช่น *Bacillus cereus*, *Clostridium perfringens*, *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella typhimurium*, *Staphylococcus aureus* และ *Vibrio vulnificus* เป็นต้น [2] ทำให้ผู้บริโภคเกิดอาการอาเจียน ท้องร่วง และอาจส่งผลต่อชีวิตได้ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสนใจพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารที่ต้านทานแบคทีเรีย โดยใช้สารต้านทานแบคทีเรียสองชนิด คือ อนุภาคซิงค์ออกไซด์ และไคโตซานมาเคลือบที่ผิวฟิล์ม เนื่องจากสารทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ดี ทำให้ชะลอการเสื่อมสภาพและยืดอายุการเก็บรักษาของเนื้อสด อาหาร ผัก และผลไม้ให้นานขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถสร้างความปลอดภัยให้กับผู้บริโภคได้

อย่างไรก็ตาม การเคลือบผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยสารต้านทานแบคทีเรียจะไม่สามารถยึดติดกันได้ดีนัก เนื่องจากพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ไม่มีขั้วหรือไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ฉะนั้นสารเคมีผิวไม่มีรูพรุน และแรงดึงผิวต่ำ จึงต้องมีการปรับปรุงสภาพพื้นผิวให้มีการยึดติดที่ดีขึ้น โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้การปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา (Corona treatment) ซึ่งเป็นวิธีที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในด้านอุตสาหกรรม เพราะไม่ส่งผลต่อเนื้อพอลิเมอร์ภายใน (Bulk polymer) และหลังจากการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนาจะทำให้มีความชอบน้ำ (Hydrophilic) มากขึ้น จึงสามารถปรับปรุงการยึดติดระหว่างสารต้านทานแบคทีเรียและพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ฟิล์มมีประสิทธิภาพในการต้านทานแบคทีเรียดีขึ้น

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารที่ต้านทานแบคทีเรีย ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยเตรียมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง

PBS/PBAT ในแบบที่มีการเติมและแบบไม่เติมเปอร์ออกไซด์ 2 ชนิด คือ ไดคิวมีล เปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide) หรือเปอร์กาต็อกซ์ (Perkadox) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) แล้วนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมไปปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา (Corona treatment) เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะของสารต้านทานแบคทีเรีย ฟิล์มที่ปรับปรุงพื้นผิวจะถูกเคลือบด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย ได้แก่ สารแขวนลอยของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ หรือสารละลายโคโตซานที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน แล้วจึงศึกษาสมบัติในการต้านทานแบคทีเรีย และสมบัติอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ขึ้นรูปได้ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารที่ต้านทานแบคทีเรียจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (PBAT) ที่เคลือบผิวด้วยอนุภาคซิงค์ออกไซด์หรือโคโตซาน

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติการกันผ่านของออกซิเจน อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ค่ามุมสัมผัส น้ำ สมบัติเคมีที่พื้นผิว สมบัติทางความร้อน และลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวฟิล์มโดยใช้โคโรนา (corona treatment)

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณสารต้านทานเชื้อแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพในการต้านทานแบคทีเรียชนิด *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus*

1.3 แนวทางของงานวิจัย

งานวิจัยมีจุดมุ่งหมายในการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารที่ต้านทานแบคทีเรีย จากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ซึ่งพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นการลดปัญหาขยะพลาสติก โดยใช้ PBS เป็นเมทริกซ์หลัก ซึ่งเม็ดพลาสติกที่ใช้สามารถผลิตได้ในประเทศไทย จากแหล่งทรัพยากรชีวภาพ (bioresources) ฟิล์ม PBS จะมีความยืดหยุ่นเหมือนฟิล์มในกลุ่มโอเลฟินส์ แต่อย่างไรก็ตามยังมีปัญหาในด้านกระบวนการขึ้นรูป เนื่องจากมีความแข็งแรงขณะหลอมเหลว (melt strength) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) ไม่ดีนัก ผู้วิจัยจึงทำการปรับปรุงปัญหาดังกล่าวโดยการเติม PBAT ซึ่งจะช่วยให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความแข็งแรงขณะหลอมเหลว ความสามารถในการดึงยึด และความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มที่ดีขึ้น อย่างไรก็ตามการผสมพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดอาจเกิดความไม่เข้ากัน ดังนั้นจึงมีการเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) คือ Dicumyl peroxide (DCP) หรือ Perkadox ร่วมด้วย เพื่อช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้ฟิล์ม

บรรจุภัณฑ์อาหารควรมีสมบัติในการต้านทานการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เพื่อป้องกันการเน่าเสีย และยืดอายุการเก็บรักษาของอาหาร โดยจะมีการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วย โครโมนาก่อนทำการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย ซึ่งจะช่วยให้สารต้านทานแบคทีเรียมีประสิทธิภาพในการเคลือบผิวฟิล์มดียิ่งขึ้น โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่

ส่วนที่ 1 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT โดยปรับเปลี่ยนปริมาณการเติม PBAT เป็น 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีการเติมและไม่เติม Dicumyl peroxide (DCP) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ในอัตราส่วนคงที่ ทำการหลอมเหลวส่วนผสมทั้งหมดโดยใช้กระบวนการหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์ม (Cast film extrusion) ตั้งค่าอุณหภูมิกระบอกหลอมถึงหัวตายที่ 150 – 190 องศาเซลเซียส ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ขึ้นรูปได้จะถูกนำมาศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะสัณฐานวิทยา

ส่วนที่ 2 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT โดยปรับเปลี่ยนปริมาณการเติม PBAT เป็น 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีการเติมและไม่เติม Perkadox ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ในอัตราส่วนคงที่ ทำการหลอมเหลวส่วนผสมทั้งหมดในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder) ที่อุณหภูมิ 140-180 องศาเซลเซียส และนำไปตัดเม็ดด้วยเครื่อง Pelletizer จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบางโดยใช้กระบวนการหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์ม (Cast film extrusion) ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ขึ้นรูปได้จะถูกนำมาศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติการกั้นผ่านของออกซิเจน อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ค่ามุมสัมผัสน้ำ สมบัติทางความร้อน และลักษณะสัณฐานวิทยา

ส่วนที่ 3 เลือกฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่มีลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมเพียง 1 สูตร มาทำการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโครโมนา (corona treatment) โดยใช้สภาวะในการปรับปรุงสภาพพื้นผิวคงที่ เทียบกับสูตรที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโครโมนา จากนั้นศึกษาองค์ประกอบเคมีที่พื้นผิวด้วยเครื่อง X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิว ลำดับถัดไป คือ นำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมไปเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย 2 ชนิดแตกต่างกัน คือ อนุภาคซิงค์ออกไซด์ หรือโคโตซาน ในปริมาณ 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านและไม่ผ่านการเคลือบผิวจะถูกนำมาศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติกั้นผ่านของออกซิเจน อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ค่ามุมสัมผัสน้ำ สมบัติทางความร้อน ลักษณะสัณฐานวิทยา และสมบัติการต้านทานแบคทีเรีย

1.4 ขอบเขตการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย

1.4.1 PBS ชื่อทางการค้า BioPBS เกรด FZ91PM ผลิตโดยบริษัท PTT MCC Biochem Company Limited ประเทศไทย

1.4.2 PBAT ชื่อทางการค้า Ecoflex® เกรด F Mulch C1201 ผลิตโดยบริษัท BASF ประเทศเยอรมัน

1.4.3 กำหนดให้ PBS เป็นเมทริกซ์หลัก และปรับเปลี่ยนปริมาณการเติม PBAT เป็น 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับกรณีที่ใช้ Dicumyl Peroxide (DCP) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และปรับเปลี่ยนปริมาณการเติม PBAT เป็น 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับกรณีที่ใช้ Perkadox เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยทำการศึกษาทั้งแนวทางที่มีการเติมและไม่เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยา ในอัตราส่วนคงที่ที่ 0.001 phr

1.4.4 การปรับปรุงสภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจะใช้วิธีการปรับสภาพผิวฟิล์มด้วย โคโรนา (Corona treatment)

1.4.5 สารต้านทานเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ อนุภาคซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) และไคโตซาน (Poly(D-glucosamine) Deacetylated Chitin)

1.4.6 ศึกษาการต้านทานเชื้อแบคทีเรียด้วยแบคทีเรียสองชนิดคือ *Escherichia coli* (*E. coli*) และ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*)

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดลอง

1.5.3 ดำเนินงานวิจัย

ส่วนที่ 1 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT โดยปรับเปลี่ยนปริมาณการเติม PBAT เป็น 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยจะแบ่งออกเป็น 2 แนวทาง คือแนวทางที่มีการเติมและไม่เติม DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

- ก่อนการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มบางจะต้องนำเม็ดพลาสติก PBS และ PBAT ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และไล่ความชื้นออกจาก DCP โดยการนำไปไว้ใน Desiccator ที่มีซิลิกาเจล
- แนวทางที่ 1 เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT อัตราส่วน 100/0, 97/3, 95/5 และ 93/7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยไม่มีการเติม DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

- แนวทางที่ 2 เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT อัตราส่วน 100/0, 97/3, 95/5 และ 93/7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีการเติม DCP ในปริมาณคงที่ที่ 0.001 phr
- ทำการหลอมเหลวส่วนผสมทั้งหมดโดยใช้กระบวนการหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์ม (Cast film extrusion) ตั้งค่าอุณหภูมิกระบอบกลอมและหัวตายที่ 150 – 190 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบของสกรู 40 รอบต่อนาที ปรับแรงดึงยึดฟิล์มที่ทำให้ได้ฟิล์มมีความหนาประมาณ 100 – 150 ไมครอน
- ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ขึ้นรูปได้ทั้งสองแนวทาง ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะสัณฐานวิทยา

ส่วนที่ 2 การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT โดยปรับเปลี่ยนปริมาณการเติมการเติม PBAT เป็น 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยจะแบ่งออกเป็น 2 แนวทาง คือ แนวทางที่มีการเติมและไม่เติม Perkadox เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

- นำพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด คือ PBS และ PBAT ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อเป็นการกำจัดความชื้น
- แนวทางที่ 1 เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT อัตราส่วน 100/0, 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยไม่มีการเติม Perkadox เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา
- แนวทางที่ 2 เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT อัตราส่วน 100/0, 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีการเติม Perkadox ปริมาณคงที่ที่ 0.001 phr
- หลอมเหลวส่วนผสมทั้งหมดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) ที่อุณหภูมิ 140 - 180 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบของสกรู 80 รอบต่อนาที นำไปตัดเม็ดด้วยเครื่อง Pelletizer
- นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการตัดเม็ดไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบางโดยใช้กระบวนการหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์ม (Cast film extrusion) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ hopper ถึง die เป็น 150 - 190 องศาเซลเซียส และใช้แรงดันหัวตายคงที่ ความเร็วรอบในการหมุนสกรูเป็น 60 รอบต่อนาที โดยปรับแรงดึงยึดฟิล์มที่ทำให้ได้ฟิล์มมีความหนา 80 - 120 ไมครอน
- ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ขึ้นรูปได้ทั้งสองแนวทาง ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติการกันผ่านของออกซิเจน อัตราการการซึมผ่านของไอน้ำ ค่ามอดุลัสสัมผัสน้ำ สมบัติทางความร้อน และลักษณะสัณฐานวิทยา

ส่วนที่ 3 การเลือกฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่มีลักษณะทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมเพียง 1 สูตร มาทำการปรับปรุงสภาพพื้นผิวโดยใช้โคโรนา (corona treatment) และเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย

- ทำการตั้งสภาวะในการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมให้คงที่
- นำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมไปผ่านลูกกลิ้งเพื่อเริ่มกระบวนการปรับปรุงสภาพพื้นผิว
- เตรียมสารละลายจากสารต้านทานแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ อนุภาคซิงค์ออกไซด์ และไคโตซาน โดยการนำอนุภาคซิงค์ออกไซด์มาแขวนลอยในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol (PVA)) และนำไคโตซานมาละลายในกรดอะซิติกที่มีความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เพื่อให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 2 ความเข้มข้น คือ 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
- กวนโดยใช้เครื่องกวนสารละลายด้วยแรงแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารละลายสำหรับการเคลือบผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสม
- นำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยใช้โคโรนามาทำการเคลือบผิวด้วยวิธี Doctor blade coating
- ศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติเคมีที่พื้นผิว สมบัติการกันผ่านของออกซิเจน อัตราการการซึมผ่านของไอน้ำ ค่ามุมสัมผัสน้ำ สมบัติทางความร้อน ลักษณะสัณฐานวิทยา สมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย และความเป็นไปได้ในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร

1.5.4 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

1.5.5 นำเสนอส่วนหนึ่งของงานวิจัยในที่ประชุมวิชาการ

1.5.6 จัดทำรายงานผลการวิจัย

1.5.7 การสอบโครงการวิจัย

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับและการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ

1.6.1 สามารถเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิবিวทีลีนซัคซิเนตและพอลิবিวทีลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลต และเคลือบด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้

1.6.2 สามารถเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยการเติม DCP หรือ Perkadox เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

1.6.3 สามารถหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ผสม รวมถึงชนิดและปริมาณของสารต้านทานเชื้อแบคทีเรียที่เหมาะสมได้

1.6.4 การปรับปรุงสภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมโดยใช้โคโรนา (Corona treatment) จะช่วยปรับปรุงสมบัติเคมีที่พื้นผิวของฟิล์มให้ดีขึ้น โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลมากนัก

1.6.5 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้จะสามารถต้านทานการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้ดี จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้านทานแบคทีเรีย โดยจะช่วยยับยั้งการเน่าเสียของอาหาร ในขณะที่เดียวกันจะช่วยยืดอายุของผลิตภัณฑ์อาหารให้เก็บรักษาได้นานขึ้น

1.6.6 ได้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารชนิดใหม่ ซึ่งทำจากพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เพื่อทดแทนฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารชนิดเดิม ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

1.6.7 สามารถเผยแพร่ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยสู่สาธารณะชน และนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่ต้านทานแบคทีเรียในอุตสาหกรรมต่อไป



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ในปัจจุบันปริมาณการใช้พลาสติกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้มีสาเหตุเนื่องมาจากพลาสติกมีสมบัติเด่นมากมายจึงเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากพลาสติกมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้เป็นระยะเวลานานนับร้อย ๆ ปี จึงก่อให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสภาพแวดล้อม

สาเหตุที่พลาสติกที่สังเคราะห์จากพอลิเมอร์สังเคราะห์ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้มี 2 ประการคือ

1. พลาสติกที่ผลิตจากสารพอลิเมอร์สังเคราะห์มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ทำให้มีความทนทานต่อการย่อยสลายโดยเชื้อจุลินทรีย์
2. พลาสติกที่ผลิตจากสารพอลิเมอร์สังเคราะห์มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) มีลักษณะไม่เป็นรูพรุนและมีพื้นที่ผิวน้อย ส่งผลให้เอนไซม์ที่ปลดปล่อยออกมาจากจุลินทรีย์ซึมผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำไปสัมผัสกับผิวของพลาสติกน้อยลง จึงเป็นการยากที่จะทำให้พลาสติกย่อยสลายได้

เนื่องจากพลาสติกที่ผลิตสารพอลิเมอร์สังเคราะห์ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ดังกล่าวไปแล้ว ดังนั้นด้วยความตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมโลก ในหลายประเทศจึงมีความตื่นตัวด้านพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) ทั้งด้านนโยบายการวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมและการสร้างผลิตภัณฑ์ เพื่อเร่งรัดให้เกิดการทดแทนพลาสติกสังเคราะห์จากพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน สหรัฐอเมริกา ได้พยายามทำการวิจัยพลาสติกที่ย่อยสลายทางชีวภาพ และมีการนำมาใช้ในทางการค้าแล้ว ซึ่งขณะนี้ประสบความสำเร็จในระดับหนึ่ง [3]

2.1.1 คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [3, 4]

พลาสติกย่อยสลายได้ชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งสามารถแบ่งตามวัตถุดิบที่ใช้ได้ออกเป็น 2 ประเภท คือพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (petroleum-based biodegradable plastics) และพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบมวลชีวภาพ (bio-based biodegradable plastics) ซึ่งปัจจุบันเป็นพลาสติกที่ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากผลิตจากพืชหรือวัตถุดิบที่สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ (renewable resources) โดยอาศัยกระบวนการหมัก (fermentation) ซึ่งใช้พลังงานต่ำ สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติเมื่อฝังกลบภายหลังการใช้งาน ด้วยคุณลักษณะและคุณสมบัติที่เป็นมิตร

กับสิ่งแวดล้อมของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพตั้งแต่กระบวนการผลิตจนถึงการกำจัดนี้เองที่ทำให้พลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้กลายเป็นวัสดุแห่งอนาคต ซึ่งหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนได้ตระหนักถึงประโยชน์ของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงเริ่มนำมาใช้และวางจำหน่ายในประเทศไทย

ในอนาคตการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการค้นพบและพัฒนากระบวนการผลิตใหม่ ๆ ทำให้พลาสติกมีราคาต่ำลงและมีสมบัติต่าง ๆ ดีขึ้น มีกฎข้อบังคับรวมถึงการที่มีค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะที่สูงขึ้น ทำให้บริษัทต่าง ๆ ผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ที่มีสมบัติหลากหลายแตกต่างกัน บางครั้งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ไม่เกิดการย่อยสลายผ่านกระบวนการทางชีวภาพอย่างแท้จริง เพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว ปัจจุบันมีหลายองค์กรทั่วโลกได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics) ขึ้น และให้คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยไว้ ดังนี้

- ASTM D6400-99 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ย่อยสลายได้เนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย ราและสาหร่าย
- ISO 472:1998 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะ เป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่าง ๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่งซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งาน ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น
- BPS Japan (1994) พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ วัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลงได้ โดยมีอย่างน้อย 1 ขั้นตอนในกระบวนการย่อยสลายนี้เกิดผ่านกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ
- DIN FNK103.2 (1993) วัสดุพลาสติกจะได้อธิบายว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพก็ต่อเมื่อสารประกอบอินทรีย์ทั้งหมดถูกย่อยสลายอย่างสมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ ที่มีอยู่ในสภาพแวดล้อม และมีอัตราการย่อยสลายอยู่ภายใต้ข้อกำหนดในการทดสอบตามมาตรฐาน
- CEN (1993) วัสดุย่อยสลายได้ คือ วัสดุที่การย่อยสลายเป็นผลมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ/หรือ แก๊สมีเทน และมวลชีวภาพใหม่ เป็นผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย

สำหรับคำว่า biodegradation (หรือการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ) ย่อมาจาก biotic degradation ในมาตรฐานต่าง ๆ มีคำจำกัดความที่ใช้พื้นฐานแนวคิดเดียวกัน คือ เป็นการทำงานของ

จุลินทรีย์ที่มีต่อชั้นวัสดุ เป็นผลให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือแก๊สมีเทนและน้ำ

2.2 การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกแบ่งไปใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังนี้ [5]

2.2.1 การใช้งานทางการแพทย์

พลาสติกย่อยสลายได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตวัสดุทางการแพทย์ เช่น ผิวนั่งเทียม ยาที่ถูกออกแบบมาให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยตัวยาวอย่างช้า ๆ ภายในร่างกายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง หรือไหมละลาย อุปกรณ์ประเภทสกรู และแผ่นตามกระดูกที่ได้รับการผ่าตัดและฝังอยู่ในร่างกายที่สามารถย่อยสลายได้เองภายหลังจากการทำหน้าที่ตามที่ได้รับการออกแบบไว้แล้วเสร็จสิ้น ทำให้ไม่ต้องทำการผ่าตัดซ้ำเพื่อนำวัสดุที่ใช้ในการรักษาเสร็จแล้วออกจากร่างกายผู้ป่วย

2.2.2 สารเคลือบกระดาษ หรือโฟม

ปัจจุบันมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้งานเป็นสารเคลือบกระดาษสำหรับห่อแอมเบอร์เกอร์ หรือถ้วยน้ำชนิดใช้แล้วทิ้ง

2.2.3 फिल्मคลุมดิน และวัสดุสำหรับการเกษตร

ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตรเป็นอุปกรณ์ทางการเกษตรที่สำคัญในการเพาะปลูกพืชบางชนิด เช่น มะเขือเทศ ซึ่งแผ่นฟิล์มจะช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืช และรักษาความชื้นในดิน การใช้ฟิล์มที่สามารถผลิตได้จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะช่วยลดขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์มภายหลังจากเสร็จสิ้นการใช้งาน เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการไถพรวนลงดินได้โดยตรง ช่วยป้องกันการสูญเสียแร่ธาตุและสารอาหารบริเวณหน้าดิน ซึ่งมักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์ม นอกจากนี้ยังมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญ เช่น ตัวยาปุ๋ย สารเคมีสำหรับการเกษตร วัสดุกักเก็บน้ำสำหรับการเพาะปลูกพืชในทะเลทราย รวมถึงถุงหรือกระถางสำหรับเพาะต้นกล้า

2.2.4 ถุงสำหรับใส่ของ (shopping bag)

ถุงพลาสติกและฟิล์มพลาสติกสำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้นในปัจจุบัน ส่งผลให้มีสัดส่วนอยู่ในขยะในปริมาณสูงและยังไม่ได้ได้รับความนิยมนำกลับมารีไซเคิลมากนัก เนื่องจากมีความยุ่งยากในขั้นตอนการคัดแยกและทำความสะอาด รวมถึงมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง ทำให้ไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ พลาสติกย่อยสลายได้จึงเป็นพลาสติกที่มีศักยภาพในการนำมาใช้แทนพลาสติกทั่วไป เพื่อผลิตเป็นถุงและฟิล์มในบางโอกาส

2.2.5 พลาสติกและถุงสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร (Food Waste Film and Bags)

พลาสติกและถุงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหาร เหมาะสำหรับสถานที่ที่มีระบบการกำจัดขยะอินทรีย์ด้วยวิธีการคอมโพสท์ กำลังได้รับความนิยมในต่างประเทศ เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการนำมาทำคอมโพสท์พร้อมขยะอินทรีย์อื่น ๆ ทำให้เกิดความสะอาดไม่ต้องแยกทิ้ง ปัจจุบันมีความต้องการใช้พลาสติกย่อยสลายได้สูงขึ้นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ในหลายเมืองของประเทศอิตาลี ได้ใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใส่ขยะเศษอาหารตั้งแต่ปี ค.ศ. 1998 โดยมีบริษัท Novamont ซึ่งเป็นผู้ผลิตหลักให้กับประเทศในสหภาพยุโรป ทำการผลิตถุงย่อยสลายได้ในสภาวะคอมโพสท์ 10,000 ต้นต่อปี ถุงที่ผลิตขึ้นนี้สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 8-10 สัปดาห์ภายใต้สภาวะการหมักในโรงงานคอมโพสท์เชิงอุตสาหกรรม

2.2.6 บรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค (Consumer Packaging Materials)

ศักยภาพหนึ่งในการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ การใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ ซึ่งตามปกติการใช้บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากพลาสติกทั่วไปมักไม่ได้รับความนิยมมากนัก เนื่องจากมีการปนเปื้อนสูง ทำให้ไม่สะดวกต่อการเก็บและทำความสะอาด การนำพลาสติกย่อยสลายได้มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร เช่น ถาดย่อยสลายได้สำหรับอาหารสำเร็จรูปและอาหารจานด่วน จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาด้านการจัดการขยะบรรจุภัณฑ์ลงได้

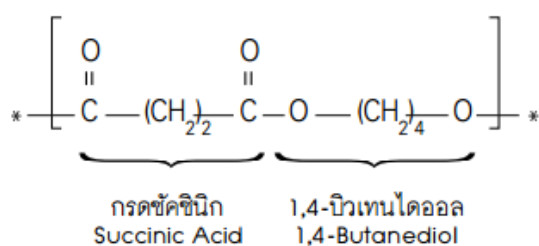
2.2.7 โฟมเม็ดกันกระแทก (Loose fill)

โฟมเม็ดกันกระแทก (loose fill) โดยทั่วไปผลิตจากพอลิสไตรีน (PS) เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านการขนส่งสินค้า มีข้อดีคือ มีความยืดหยุ่นสามารถป้องกันสินค้าจากแรงกระแทกระหว่างการเคลื่อนย้ายและขนส่งได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีน้ำหนักเบาทำให้การขนส่งสินค้าเป็นไปได้สะดวกและประหยัดเชื้อเพลิง แต่ปัญหาคือ พอลิสไตรีน เป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ยากและใช้เนื้อที่ในการจัดเก็บเพื่อการกำจัดสูง ในกรณีที่ต้องกำจัดด้วยการฝังกลบต้องใช้เนื้อที่ในบ่อฝังกลบมาก แม้ว่าจะนำมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้แต่ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากนัก ปัจจุบันมีการพัฒนาการผลิตโฟมเม็ดกันกระแทกจากแป้งและพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ละลายน้ำและย่อยสลายได้ทางชีวภาพขึ้น ทำให้ง่ายต่อการใช้งานและสะดวกในการกำจัดเมื่อสิ้นสุดการใช้งานแล้ว

2.3 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate) หรือ PBS)

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [6] เป็นพอลิเอสเตอร์สังเคราะห์ที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีสมบัติคล้ายกับพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตและสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่ายด้วยกระบวนการหลอมเหลวที่ใช้กับพลาสติกทั่วไป สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านการผลิตเป็นฟิล์มคลุมดิน ถุงหรือฟิล์มที่เป็นบรรจุภัณฑ์ผลิตภัณฑ์อาหารที่ผู้ใช้

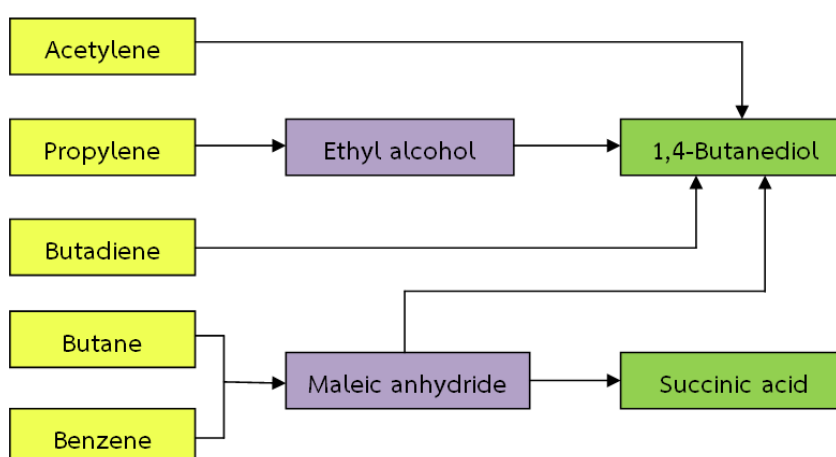
แล้วทั้ง เป็นต้น นอกจากนี้ยังนิยมนำพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตมาผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นเพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานมากขึ้น เช่น การผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาเรช และพอลิเมอร์ร่วมอะดิเปต



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต [7]

2.3.1 กระบวนการผลิตพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต [7]

พอลิบิวทีลีนซัคซิเนตเป็นพอลิเอสเทอร์ที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยาควบนั่นระหว่างกรดซัคซินิก (Succinic acid) และ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-Butanediol) ซึ่งในปัจจุบันมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดนี้เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมีโดยเริ่มจากก๊าซบิวเทนถูกเปลี่ยนไปเป็นมาเลอิกแอนไฮไดรด์ จากนั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดซัคซินิก และ 1,4-บิวเทนไดออล ต่อไปที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 °C โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น Tetra-n-butyl-titanate และ Tetra-isopropyl titanate แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แหล่งสารตั้งต้นจากผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต [7]

2.3.2 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [7, 8]

PBS เป็นพอลิเมอร์สีขาวมีความหนาแน่น 1.23 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับพอลิแลคติกแอซิด มีอุณหภูมิหลอมประมาณ 112 - 116 °C มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วตั้งแต่ -33 °C ถึง -37 °C และอุณหภูมิการสลายตัวเท่ากับ 353 °C โดยทั่วไปแล้ว PBS ทนความร้อนได้ถึง 200 °C โดยไม่เสียสภาพ อีกทั้งสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่าง ๆ และยังสามารถขึ้นรูปได้ดีอีกด้วย เนื่องจาก PBS เป็นพอลิเอสเทอร์ที่ย่อยสลายของ PBS เกิดขึ้นที่พันธะเอสเทอร์ โดยเริ่มจากการย่อยสลายตามธรรมชาติผ่านกลไกของปฏิกิริยาการสลายด้วยน้ำ ซึ่งส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์สั้นลงหรือน้ำหนักโมเลกุลของ PBS ลดลง และจากนั้นสามารถย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์อื่น ๆ ต่อไป มีงานวิจัย ระบุว่าแผ่นฟิล์ม PBS ที่มีความหนา 40 ไมโครเมตร สามารถถูกย่อยสลายได้ถึงร้อยละ 50 ภายใน 1 เดือนในดินที่ใส่เพาะปลูกทั่วไป PBS มีสมบัติเชิงกลที่ดี กล่าวคือมีค่ามอดุลัสของยัง ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด และความทนแรงดึงเท่ากับ 268 MPa, 175% และ 25 MPa ตามลำดับ

2.3.3 การนำพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตไปใช้ประโยชน์ [8]

PBS จัดว่าเป็นพอลิเมอร์ที่ยืดหยุ่นและแข็งแรงพอสมควรสามารถนำไปใช้แทนที่ PET , PP และพอลิโอลิฟินส์ได้ โดยเฉพาะ LDPE, HDPE, PS และ PLA นอกจากนี้ PBS ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น หลอดฉีดยา ฟิล์มบรรจุอาหาร ขวดน้ำ ผลิตภัณฑ์อนามัย เบาะโพนี ฟิล์มคลุมดิน กระถางต้นไม้ สารเสริมสร้างพลาสติกแบบ non-migrating สำหรับ PVC และพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพประเภทอื่น ๆ วัสดุห่อหุ้มและปลดปล่อยยาฆ่าแมลง ยากำจัดวัชพืช หรือปุ๋ย รวมไปถึงวัสดุที่ใช้งานทางด้านวิศวกรรมต่าง ๆ เช่น ส่วนประกอบและชิ้นส่วนตกแต่งภายในยานยนต์

2.3.4 พลาสติกชีวภาพและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [9]

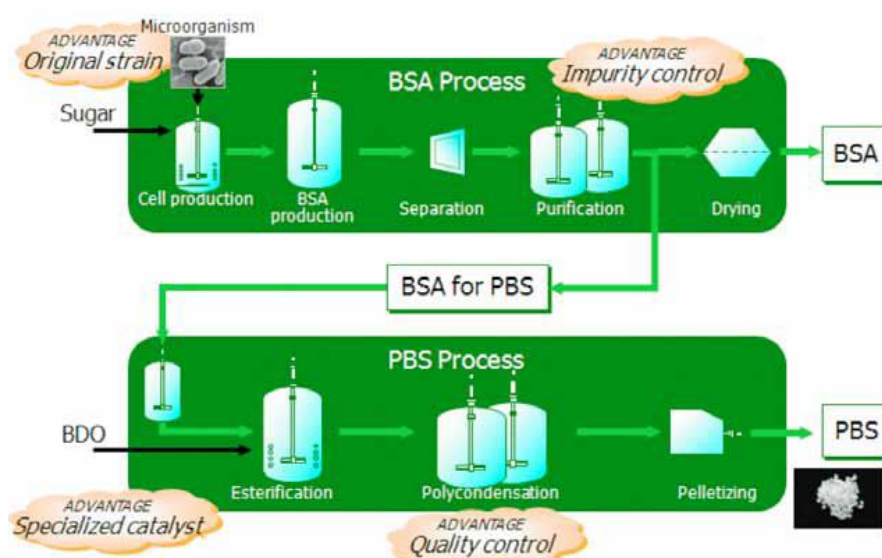
พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่มีแหล่งกำเนิดทั้งจากวัตถุดิบชีวมวล (biomass) หรือวัตถุดิบทางการเกษตร ที่สามารถสร้างขึ้นจากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ (renewable resources) หรือปิโตรเคมี (non-renewable resources) ขยะจากผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปจากพลาสติกชีวภาพจะสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม เช่น ถูกย่อยสลายทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์จะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และสารประกอบอินทรีย์รวมอยู่กับดินในธรรมชาติ ย้อนกลับมาเป็นวัตถุดิบสำคัญในการเพาะปลูกพืช เกิดเป็นวัฏจักรของธรรมชาติอย่างครบวงจร โดยไม่จำเป็นต้องมีการจัดการปัญหาขยะล้นเมือง หรือกระบวนการกำจัดขยะที่มีค่าใช้จ่ายสูงเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงไม่ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม

สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ PBS ผลิตได้จากโครงการ PBS เป็น Biobased Biodegradable Plastics ผลิตจากวัตถุดิบ 2 ชนิด คือ Saccinic Acid และ 1, 4 Butanediol โดยทั้งสองวัตถุดิบสามารถผลิตได้จากสารตั้งต้น คือ น้ำตาลดิบ โดย PBS มีคุณลักษณะเป็นเกล็ดของแข็งสีขาว มีคุณสมบัติคล้ายกับ PET และด้วยคุณสมบัติที่สามารถขึ้นรูปได้ดี จึงมีการนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบ

การขึ้นรูปพลาสติก (applications) ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Injection Moulding, Extrusion Moulding, Blown Film Extrusion ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ อาทิเช่น Mulch Film, Packaging Film, Bags and Flushable Hygiene Products หรือนำไปผสมกับ Starch และ Adipate Copolymers ผลิตเป็น Polybutylene Succinate (PBSA) เพื่อปรับคุณสมบัติให้เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์

2.3.5 แนวโน้มการตลาดที่จะเกิดขึ้นในอนาคต [9]

จากความร่วมมือของ 2 ยักษ์ใหญ่ในวงการอุตสาหกรรมนั้น มาจากการที่ ปตท. ตระหนักถึงความสำคัญของการแสวงหาพลังงานทดแทนที่ยั่งยืน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพื่อผลักดันอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพให้เกิดขึ้นอย่างเป็นรูปธรรมในประเทศไทยอย่างยั่งยืน ในขณะที่ฝั่งของบริษัท มิตรชูบิซิ เคมิคอล คอร์ปอเรชั่น จำกัด (MCC) เอง ซึ่งถือเป็นผู้นำที่เชี่ยวชาญในอุตสาหกรรมเคมี และมีเทคโนโลยีการผลิตที่ทันสมัยระดับโลกในการผลิตพลาสติกชีวภาพนั้น ก็ให้ความสนใจในประเทศไทย เนื่องจากเป็นแหล่งผลิตวัตถุดิบที่สำคัญ คือ อ้อย จึงนำมาสู่การก่อตั้งบริษัท PTT MCC BioChem ถือหุ้นโดย บมจ. ปตท. (PTT) และบริษัท มิตรชูบิซิ เคมิคอล คอร์ปอเรชั่น จำกัด (MCC) ในสัดส่วน 50 : 50 เป้าหมายเพื่อพัฒนาโครงการสร้างโรงงานผลิตสารตั้งต้น Bio-succinic Acid (BSA) และโรงงานผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด Polybutylene Succinate (PBS) โดยใช้น้ำตาลเป็นวัตถุดิบตั้งต้น



ภาพที่ 2.3 แผนผังกระบวนการผลิตสารตั้งต้น Bio-succinic Acid (BSA) และเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด Polybutylene Succinate (PBS) [9]

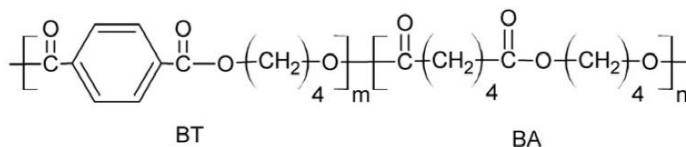
สำหรับการดำเนินการของ พีทีที เอ็มซีซี ไบโอเคม นั้น ถือว่าเป็นการผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิด PBS จากพืชเป็นรายแรกของโลก เนื่องจากในปัจจุบันการผลิตเม็ดพลาสติก PBS จะใช้ปิโตรเลียมทั้งสิ้น และการลงทุนดังกล่าวจะเป็นส่วนสำคัญในการสนับสนุนให้ไทยก้าวสู่การเป็น Bio Hub ของเอเชียได้

ที่ปรึกษาทางการตลาด (CMAI, 2553) ได้วิเคราะห์สถานการณ์ตลาด Bioplastics สรุปได้ว่าในช่วงปี พ.ศ.2553-2563 อัตราการเติบโตของความต้องการใช้ Bioplastics มีแนวโน้มขยายตัวสูงมากที่ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ต่อปี เมื่อเทียบกับ Conventional Plastic ซึ่งมีอัตราการเติบโตเพียง 5 เปอร์เซ็นต์ต่อปีเท่านั้น โดยปี พ.ศ.2553 ความต้องการใช้ Bioplastics โดยรวมประมาณ 200,000 ตันต่อปี และคาดว่าความต้องการจะเพิ่มขึ้นประมาณ 1.2 ล้านตันต่อปี ภายในปี พ.ศ.2563 เนื่องจากประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก ได้ให้ความสำคัญกับการอนุรักษ์พลังงานและแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยแสวงหาพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ตลาดหลักของ Bioplastics อยู่ในประเทศในแถบยุโรปและสหรัฐอเมริกา ปัจจุบันประเทศทั้งหลายในภูมิภาคดังกล่าว ได้ออกกฎหมายเพื่อบังคับการใช้ Conventional Plastics อาทิเช่น ประเทศฝรั่งเศส ผ่านกฎข้อบังคับห้ามใช้ Conventional Plastics Carrier Bag ในปี พ.ศ.2549 และถุงพลาสติกที่จะทิ้งต้องย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ในปี พ.ศ.2553 ประเทศเดนมาร์กห้ามใช้ภาชนะบรรจุเครื่องดื่มที่ผลิตจากพลาสติกที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นต้น ส่งผลให้ปัจจุบันมีความต้องการใช้ PBS ปริมาณ 12,000 ตันต่อปี และคาดว่าจะมีอัตราเติบโตเพิ่มขึ้นประมาณ 33 เปอร์เซ็นต์ และความต้องการจะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 260,000 ตันต่อปี ในปี พ.ศ.2563 (Nexant, 2009) สำหรับผู้ผลิต PBS ในปัจจุบัน ยังเป็นผู้ผลิตรายย่อยกระจายตัวอยู่ในประเทศจีน และญี่ปุ่น แต่ผลิตจากวัตถุดิบตั้งต้นที่เป็นปิโตรเลียมแทบทั้งสิ้น ซึ่งแตกต่างกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากโครงการ PBS ของบริษัทฯ ที่เป็นการก่อสร้างโรงงานผลิต PBSเชิงพาณิชย์ (commercial scale) จากวัตถุดิบที่มาจากพืชรายแรกของโลก ถือเป็น Bio-based and Biodegradable PBS ที่ผลิตและย่อยสลายได้จากธรรมชาติ สอดคล้องกับแนวโน้มการอนุรักษ์พลังงาน การแก้ปัญหาภาวะโลกร้อนที่แต่ละประเทศให้ความสำคัญ และมีแนวโน้มที่จะขยายมาตรการและนโยบายที่จะแสวงหาการค้ารังสีของมนุษยชาติอย่างยั่งยืน

2.4 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท(Poly(butylene adipate-co-terephthalate) หรือ PBAT)

พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท [10] เป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี จัดอยู่ในกลุ่มของพอลิเอสเตอร์ร่วมระหว่างสายโซ่ตรงและวงอะโรมาติก (Aliphatic-aromatic copolyester) ส่วนใหญ่จะได้รับการสังเคราะห์จาก 1,4-Butanediol,

Adipic acid, และ Terephthalic acid โดยจะอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 110 - 130 องศาเซลเซียส อุณหภูมิคล้ายแก้วประมาณ -30 องศาเซลเซียส มีคุณสมบัติการย่อยสลาย คุณสมบัติทางกายภาพเป็นที่น่าพอใจในงานอุตสาหกรรม และได้มีการเติมตัวเสริมแรงเพื่อนำมาใช้งานทางด้านการแพทย์



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบีวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท [10]

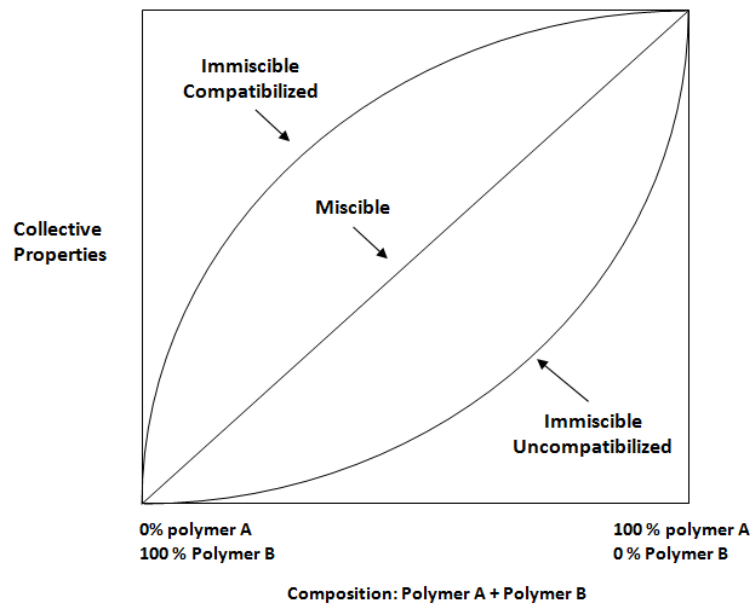
PBAT จะประกอบไปด้วยความแข็งแรงจากส่วนที่เป็นบีวทิลีนทาเรฟทาเลท (BT) ซึ่งเกิดจาก 1,4-butanediol, terephthalic monomer และความยืดหยุ่นจากส่วนของบีวทิลีนอะดิเพท (BA) ซึ่งเกิดจาก 1,4-butanediol, adipic acid monomer ซึ่งจะส่งผลให้โคพอลิเมอร์มีความสามารถในการดึงยืดที่สูง มีมอดูลัสที่ค่อนข้างต่ำ มีคุณสมบัติเชิงกลคล้ายกับพอลิเอทิลีนโพรพิลีน แต่มีคุณสมบัติในการย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

2.5 พอลิเมอร์ผสมและการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสมและการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม [8] เทอร์โมพลาสติกที่มีการสังเคราะห์ขึ้นในปัจจุบันสามารถแบ่งได้ สามกลุ่มหลัก ๆ คือ 1.) พลาสติกที่ใช้งานทั่วไปซึ่งถือเป็นพลาสติกกลุ่มใหญ่ที่สุด โดยมีสัดส่วนมากถึงประมาณ 79 % ของพลาสติกทั้งหมด พลาสติกที่นิยมใช้ในกลุ่มนี้ ได้แก่ พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) 2.) พลาสติกวิศวกรรม เป็นพลาสติกที่มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนสูง มีสัดส่วนการใช้ประมาณ 11 % ตัวอย่างพอลิเมอร์กลุ่มนี้ได้แก่ พอลิเอไมด์ (PA) เทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเตอร์ (PEST) พอลิคาร์บอเนต (PC) พอลิเมทซีเมทิลีน (POM) พอลิฟีนิลีนอีเทอร์ (PPE) 3.) พลาสติกที่มีสมบัติพิเศษเหมาะสมกับการใช้งานเฉพาะทาง ซึ่งเป็นพลาสติกที่มีสมบัติเชิงกลสูงและสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิในช่วง 150 - 500 องศาเซลเซียส ซึ่งในปัจจุบันอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ได้มีการใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัย เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุ เช่น การค้นคว้าหาวิธีการที่เหมาะสมในการทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน การใช้เทคโนโลยีขั้นสูงเข้ามาช่วยในกระบวนการผลิต การเสริมแรงหรือการเตรียมพอลิเมอร์อัลลอยด์ การเสริมแรง การเติมสารเติมแต่ง และการเตรียมพอลิเมอร์ผสมหลาย

องค์ประกอบ โดยในปี 2000 พบว่าพอลิเมอร์สังเคราะห์ถูกใช้สำหรับเตรียมวัสดุคอมพอสิต 39 % และถูกใช้ไปในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม 36 % ซึ่งตลาดหลักของการใช้งานพอลิเมอร์ผสม ได้แก่ การนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมยานยนต์แทนการใช้โลหะ เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมซึ่งมีน้ำหนักเบากว่าจะช่วยในเรื่องของการประหยัดพลังงาน นอกจากนี้ยังมีการนำพอลิเมอร์ผสมไปใช้งานในด้านอื่นๆ เช่น การทำกรอบเครื่องจักรหรือคอมพิวเตอร์ ชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ งานโครงสร้าง และการใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น สาเหตุดังกล่าวเนื่องจากการเตรียมพอลิเมอร์ผสมมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ ทำให้ได้วัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานโดยมีต้นทุนการผลิตต่ำ ช่วยปรับปรุงสมบัติพิเศษหรือข้อดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิด เช่น ความแข็งแรงต้านทานการกระแทก ความทนทานต่อตัวทำละลาย เป็นต้น นอกจากนี้ยังส่งผลดีต่อภาคการผลิตในแง่ของการปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูป ทำให้เกิดของเสียระหว่างกระบวนการผลิตลดลง

พอลิเมอร์ผสม คือ ของผสมที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ หรือพอลิเมอร์รวมอย่างน้อย 2 ชนิด โดยพอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งตามเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ พอลิเมอร์ผสมที่สามารถผสมเข้ากันได้ดี (miscible blends) พอลิเมอร์ที่สามารถผสมเข้ากันได้บางส่วน (partial miscible blend) และพอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ดี (immiscible blends) อย่างไรก็ตาม พบว่าพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ จัดเป็นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ดี ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ได้ ภาพที่ 2.5 แสดงสมบัติพอลิเมอร์ที่ทำนายได้ เมื่อผสมพอลิเมอร์องค์ประกอบสองชนิดเข้าด้วยกัน ทั้งแบบที่สามารถเข้ากันได้ดี แบบที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ดี และไม่ผ่านการทำให้เข้ากัน (uncompatibilized) และแบบที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้แต่ผ่านการทำให้เข้ากัน (compatibilized) ซึ่งจะเห็นว่า กรณีที่พอลิเมอร์ผสมสามารถเข้ากันได้ดี สมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะอยู่ระหว่างสมบัติของพอลิเมอร์องค์ประกอบแต่ละชนิด โดยจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนในการผสม กรณีพอลิเมอร์ผสมไม่สามารถผสมเข้ากันได้ดีและไม่ผ่านการทำให้เข้ากัน สมบัติด้านใดด้านหนึ่งของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะต่ำกว่าสมบัติขององค์ประกอบแต่ละชนิด เนื่องจากขาดกลไกในการเสถียรการกระจายตัวขององค์ประกอบหนึ่งในองค์ประกอบหลัก ทำให้เกิดการผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือในกรณีที่รุนแรงขึ้นอาจเกิดการหลุดของออกของแต่ละเฟส (delaminated) ส่วนในกรณีที่พอลิเมอร์ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ดีแต่ผ่านการทำให้เข้ากัน จะทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติเหมาะสมมากขึ้น ดังนั้นการเชื่อมประสานจึงเป็นสิ่งสำคัญในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมให้มีสมบัติที่ดีตามต้องการ



ภาพที่ 2.5 แสดงผลกระทบบของสัดส่วนการผสมที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม [8]

เนื่องจากสมบัติของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นอยู่กับสมบัติขององค์ประกอบของแต่ละชนิด สัดส่วนการผสม และโครงสร้างพื้นฐานของพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นการใช้สารเชื่อมประสานในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสม กระบวนการเชื่อมประสานดังกล่าวจะต้องสามารถ 1.) ลดแรงดึงผิวระหว่างเฟส ทำให้อนุภาคที่กระจายตัวมีขนาดเล็กลง 2.) ทำให้เกิดเสถียรภาพทางโครงสร้างพื้นฐานในระหว่างการได้รับความร้อนและแรงเฉือนในการนำพอลิเมอร์ผสมไปผ่านกระบวนการผลิตในลำดับต่อไป 3.) คงไว้ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟส แม้ว่าพอลิเมอร์ผสมจะอยู่ในสถานะของแข็ง

การเพิ่มเข้ากันได้ในพอลิเมอร์ผสม (Compatibilization) คือ กระบวนการในการปรับปรุงรอยต่อระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถขึ้นได้ดี โดยการลดแรงดึงผิวบริเวณรอยต่อระหว่างเฟส ปรับปรุงและเพิ่มเสถียรภาพทางโครงสร้างพื้นฐานของพอลิเมอร์ผสม ทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมรรถนะสูงขึ้น การเพิ่มความเข้ากันได้ในพอลิเมอร์ผสมสามารถทำได้ด้วยกันหลายวิธี ได้แก่ การเติมองค์ประกอบที่สามปริมาณเล็กน้อย ซึ่งสามารถเข้ากันได้ดีกับทั้งสองเฟสของพอลิเมอร์ผสม การเติมพอลิเมอร์ร่วมที่มีส่วนซึ่งสามารถผสมเข้ากันได้ดีกับองค์ประกอบหนึ่ง และมีอีกส่วนที่สามารถผสมเข้ากันได้ดีกับอีกองค์ประกอบหนึ่ง การเติมพอลิเมอร์ร่วมแบบ core-shell ในปริมาณสูง และการผสมแบบว่องไว (reactive compounding) ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ในพอลิเมอร์ผสมอย่างน้อยหนึ่งชนิดได้รับการปรับปรุง ทำให้มีส่วนที่สามารถผสมเข้ากันได้ดีกับองค์ประกอบอื่นเกิดขึ้น เป็นต้น

2.5.1 การเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมแบบว่องไว (Reactive compatibilizer) [8]

Reactive compatibilizer คือ กระบวนการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยการทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างพอลิเมอร์องค์ประกอบแต่ละชนิดในระหว่างกระบวนการผสม ซึ่งการเพิ่มขึ้นของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสที่เกิดขึ้น จะส่งผลให้อนุภาคที่กระจายตัวมีขนาดเล็กลง วิธีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ การเติมพอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟของพอลิเมอร์องค์ประกอบชนิดใดชนิดหนึ่งลงในพอลิเมอร์ผสม หรือการทำให้เกิดพอลิเมอร์ร่วมบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสที่มีการยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์หรือพันธะไอออนิก ในระหว่างกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากสามารถทำได้ในขั้นตอนการผลิตหรือการผสมด้วยเครื่องอัดรีด (Reactive extrusion) ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ ตัวอย่างของกระบวนการ Reactive compatibilizer ที่น่าสนใจมีดังนี้

การทำให้เกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟ หรือบล็อกด้วยปฏิกิริยา redistribution ปฏิกิริยา redistribution หรือเรียกอีกอย่างว่า transreactions เป็นปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนส่วนของสายโซ่โมเลกุลขององค์ประกอบหนึ่ง กับส่วนของสายโซ่โมเลกุลขององค์ประกอบที่สองที่มีความเหมาะสมกัน ตัวอย่างหนึ่งของการเกิดปฏิกิริยา redistribution ของพอลิเมอร์ผสม เช่น ผสมพอลิเมอร์องค์ประกอบที่หนึ่งซึ่งมีหมู่ปลายสายโซ่ที่มีความเป็น nucleophile กับพอลิเมอร์องค์ประกอบที่สองซึ่งสายโซ่หลักมีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะที่มีความเป็น electrophile บนสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์องค์ประกอบที่สอง ทำให้เกิดการตัดสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์องค์ประกอบที่สอง ตามด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่มของพอลิเมอร์องค์ประกอบแต่ละชนิด

ปฏิกิริยา redistribution สามารถเกิดขึ้นได้เองในระหว่างกระบวนการผลิตที่มีการให้ความร้อน สำหรับพอลิเมอร์แบบควบแน่น ที่มีหมู่ปลายสายโซ่โมเลกุลเป็นหมู่เอมีน และหมู่ไฮดรอกซิลที่มีความเป็น nucleophile เช่น พันธะเอสเทอร์ เอไมด์ คาร์บอเนต บนสายโซ่โมเลกุล ตัวอย่างพอลิเมอร์ผสมที่พบว่าสามารถเกิดปฏิกิริยา redistribution ในระหว่างกระบวนการหลอมเหลวผสม ได้แก่ 1) พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอไมด์กับพอลิเอไมด์ 2) พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอไมด์กับพอลิเอสเทอร์ 3) พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอสเทอร์กับพอลิเอสเทอร์ เช่น พอลิบิวทิลีนเทรฟทาเรต/พอลิเอทิลีนเทรฟทาเรต พอลิบิวทิลีนเทรฟทาเรต/พอลิคาร์บอเนต พอลิคาร์บอเนต/พอลิเอทิลีนเทรฟทาเรต เป็นต้น

การทำให้พอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟ การเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม โดยการทำให้เกิดพอลิเมอร์ โดยการทำให้เกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟระหว่างพอลิเมอร์สององค์ประกอบที่ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ดี นับเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสูงสุด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีทั้งปฏิกิริยาที่สามารถ

เกิดได้โดยตรงระหว่างพอลิเมอร์องค์ประกอบแต่ละชนิด เช่น การผสมพอลิเมอร์องค์ประกอบที่หนึ่ง ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันในการทำปฏิกิริยาอยู่ที่ปลายสายโซ่โมเลกุล หรือบนหมู่แทนที่ (pendent group) และการเกิดปฏิกิริยาโดยการเติมองค์ประกอบที่สาม ซึ่งสามารถสนับสนุนให้เกิดพอลิเมอร์ร่วมของพอลิเมอร์องค์ประกอบได้

ตัวอย่างความเข้ากันได้โดยการทำให้เกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟ เช่น การผสมพอลิเอสเทอร์กับพอลิพรอพิลีนที่มีการปรับปรุงให้มีหมู่อีพอกซี โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างกรด และอีพอกไซด์ในการทำให้เกิดพอลิเมอร์ร่วม พอลิเมอร์ร่วมที่ได้จากการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเอสเทอร์ระหว่างหมู่กรดที่ปลายสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอสเทอร์ และหมู่อีพอกไซด์ซึ่งเป็นหมู่แทนที่ของพอลิพรอพิลีน ในกรณีที่หมู่อีพอกซีบนโครงสร้างของพอลิพรอพิลีนจำนวนมาก อาจทำให้เกิดการเชื่อมขวางของพอลิเมอร์ร่วมได้ เมื่อหมู่ปลายสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอสเทอร์ สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่อีพอกไซด์ได้ทั้งสองด้าน ซึ่งสัดส่วนในการเกิดพอลิเมอร์ร่วมที่ถูกต้องเชื่อมขวางจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนในการผสมและสภาวะในการผลิต

อย่างไรก็ตาม การเกิดพันธะที่ตำแหน่งใหม่นี้ จะทำให้เกิดแอลกอฮอล์ทุติยภูมิที่เกิดจากการเปิดวงของอีพอกไซด์ ซึ่งสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับพันธะพอลิเอสเทอร์บนสายโซ่หลักของพอลิเอสเทอร์ได้ นำไปสู่กระบวนการแตกสายโซ่โมเลกุล ตามด้วยการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน จะได้พอลิเมอร์ร่วมที่มีโครงสร้างโมเลกุลแตกต่างออกไป ซึ่งจากการศึกษาพบว่าไม่มีรายงานไม่มากนักที่กล่าวว่าการเกิดพอลิเมอร์ร่วมในพอลิเมอร์ผสมเกิดโดยกระบวนการดังกล่าว จะส่งผลต่อการเพิ่มความเข้ากันได้ในพอลิเมอร์ผสม

การทำให้เกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก การเกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกโดยตรงในระหว่างการหลอมเหลวผสม เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่ปลายสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์องค์ประกอบแต่ละชนิดที่ถูกปรับปรุงให้มีหมู่ฟังก์ชันบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในขณะหลอมเหลว อย่างไรก็ตาม ในพอลิเมอร์ผสมบางระบบจำเป็นต้องเติม coupling agent หรือ condensation agent เพื่อกระตุ้นความว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่หมู่ปลายสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์องค์ประกอบ

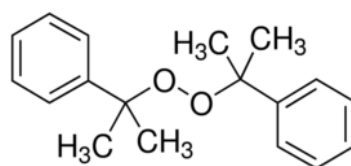
ตัวอย่างการเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมโดยการทำให้เกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก เช่น การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเมอร์สองชนิด โดยการใช้สารเชื่อมประสาน (coupling agent) ที่ประกอบด้วยหมู่อีพอกซีหลายหมู่ในโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ปลายสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอสเทอร์ที่มีความเป็น nucleophile ทำให้เกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด โดยมีโมเลกุลของสารเชื่อมประสานเป็นตัวเชื่อมโยง

2.6 สารประกอบอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ (Organic peroxide)

สารประกอบอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ [11] คือ สารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจนสองอะตอมติดกันหรือเรียกว่า หมู่เปอร์ออกไซด์ (peroxy group) $-O-O-$ ในหมู่โครงสร้าง สารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์มีหลายประเภท เช่น polyester, peroxydicarbonate, diakyl peroxides, diacyl peroxides, hydroperoxide และ peroxyketals เป็นต้น สารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์จะใช้ในการค้า ทางอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ พลาสติก ยาง ซึ่งอาจจะใช้ในรูปของสารบริสุทธิ์ที่เป็นของแข็งของเหลว หรือเป็นสารละลายเป็นเม็ด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการนำไปใช้และความปลอดภัยในการใช้งาน

2.6.1 ไดคิลมิล เปอร์ออกไซด์ (Dicumyl Peroxide) [12]

ไดคิลมิล เปอร์ออกไซด์ มีชื่อทางเคมี คือ Bis(1-methyl-1-phenylethyl) peroxide มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 270.37 กรัมต่อโมล ความหนาแน่นเท่ากับ 1.107 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการหลอมเหลวมีค่า 39.8 องศาเซลเซียส โครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2.6

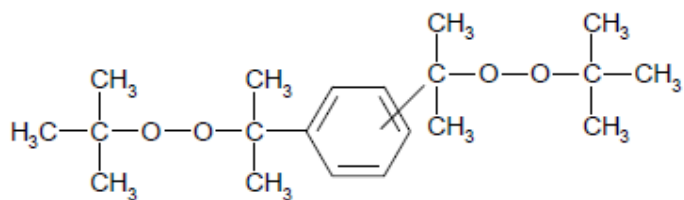


ภาพที่ 2.6 โครงสร้างเคมีของ Dicumul peroxide [13]

ไดคิลมิล เปอร์ออกไซด์ ส่วนใหญ่มักนิยมใช้เป็นสารเชื่อมขวาง (crosslink agent) สำหรับพอลิเมอร์และอีลาสโตเมอร์ พอลิเมอร์ที่สามารถเชื่อมขวางกับสารประกอบอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ได้ จะใช้ในการผลิตสายไฟ ยางสำหรับซีล เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นสารยับยั้งการหน่วงไฟใน expanded polystyrene (EPS) ได้อีกด้วย

2.6.2 เปอร์กาด็อกซ์ (Perkadox) [14]

เปอร์กาด็อกซ์ มีชื่อทางเคมี คือ Di(tert-butylperoxyisopropyl)benzene มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 338.5 กรัมต่อโมล ความหนาแน่นเท่ากับ 1.08 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อุณหภูมิการหลอมเหลวมีค่าประมาณ 44 - 48 องศาเซลเซียส เปอร์กาด็อกซ์ทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) สำหรับปฏิกิริยาการเกิดโคพอลิเมอร์ไรเซชัน สามารถใช้ร่วมกับสารหน่วงไฟได้ โครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของ Perkadox[®]14s [14]

สำหรับความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของเปอร์ออกไซด์มักจะแสดงในรูปแบบของครึ่งชีวิต (half-life) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ และความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของ Perkadox 14S แสดงดังภาพที่ 2.8 เส้นกราฟ k สำหรับครึ่งชีวิตของเปอร์ออกไซด์ออกซ์ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 20 วินาที ทั้งนี้ครึ่งชีวิตของ Perkadox 14S สามารถคำนวณได้จาก

$$k_d = A \cdot e^{-E_a/RT}$$

$$t_{1/2} = (\ln 2) / k_d$$

เมื่อ

$$E_a = 152.69 \text{ kJ / mole}$$

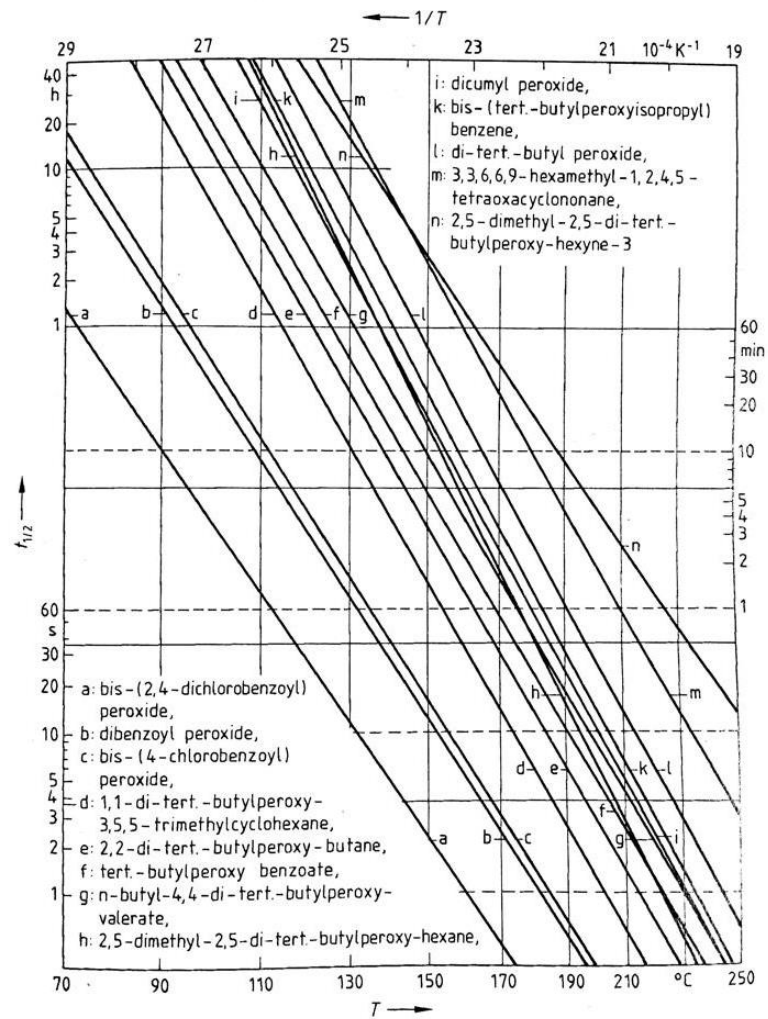
$$A = 7.65 E + 15 \text{ s}^{-1}$$

$$R = 8.3142 \text{ J / mole} \cdot \text{K}$$

$$T = (273.15 + ^\circ\text{C}) \text{ K}$$

Perkadox เป็นสารชนิด organic peroxide ความร้อนหรือสิ่งเจือปนอาจเป็นสาเหตุให้เกิดอันตรายจากการสลายตัว อาจเป็นสาเหตุให้เกิดผลกระทบต่อดวงตาและผิวหนังได้ การสัมผัสทางผิวหนัง การสัมผัสกับดวงตา และการสูดดม เป็นเส้นทางหลักที่จะได้รับอันตรายจากสารชนิดนี้ ฝุ่นผงจาก Perkadox อาจก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบหายใจ และอาจทำให้เกิดอาการของโรคหลอดลมอักเสบได้ เมื่อสัมผัสกับผิวหนังหรือดวงตาอาจทำให้เกิดการระคายเคืองเล็กน้อย หากกลืนสารชนิดนี้ลงไปอาจทำให้ปาก ลำคอ หลอดอาหารและกระเพาะอาหารเกิดการระคายเคืองได้

ดังนั้นควรจัดเก็บในบริเวณที่ห่างไกลจากอาหาร เครื่องดื่ม และอาหารสัตว์ และควรจัดเก็บในพื้นที่ที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก ห่างจากความร้อนและแสงแดด



ภาพที่ 2.8 กราฟระหว่างครึ่งชีวิตการแตกตัวของเปอร์ออกไซด์และอุณหภูมิ [15]

2.7 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide) [16] เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเปลี่ยนขนาดอนุภาค ซิงค์ ออกไซด์ให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับอนุภาคนาโนเมตร มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดมีขนาดอนุภาคเล็กระดับนาโนเมตร (10^{-9} เมตร)

2.7.1 ลักษณะและคุณสมบัติของซิงค์ออกไซด์ [16, 17]

สารซิงค์ออกไซด์ มีลักษณะเป็นผงอนุภาคละเอียดสีขาว เป็นสารที่ใช้ยับยั้งแบคทีเรีย (Anti-Bacteria) ไม่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย นอกจากทำลายแบคทีเรียแล้วยังช่วยป้องกันและยับยั้งการแบ่งเซลล์ของแบคทีเรีย และยังสามารถป้องกันรังสี UV-A และ UV-B รับกลืนอันไม่พึงประสงค์

ซิงค์ออกไซด์ เป็นวัสดุในกลุ่มโลหะออกไซด์ที่มีการนำมาใช้งานในรูปแบบของวัสดุนาโน ตัวอย่างการใช้นาโนซิงค์ออกไซด์ ได้แก่ การใช้งานในกลุ่มของอิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์ตรวจจับก๊าซ ใช้สำหรับการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียในทางทันตกรรม ใช้ในการบำบัดสิ่งแวดล้อม เนื่องจากมีสมบัติที่ดีในด้านการดูดซับแสง และสมบัติด้านการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง นอกจากนี้ยังใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ใช้กับคนโดยตรง คือ เครื่องสำอาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งโลชั่นกันแดดที่เริ่มนิยมนำซิงค์ออกไซด์ขนาดนาโนมาใช้เป็นองค์ประกอบ เนื่องจากมีระดับความสามารถในการป้องกันรังสี UV ได้ในระดับเดียวกับอนุภาค ซิงค์ออกไซด์ที่มีขนาดใหญ่กว่านาโน แต่ข้อได้เปรียบที่เห็นได้ชัดเจนของโลชั่นกันแดดที่มีอนุภาคนาโนเป็นองค์ประกอบ คือ การส่งผ่านแสงได้ดีกว่า ทำให้ไม่ทิ้งร่องรอยให้เห็นเป็นสีขาวอย่างชัดเจนบนผิว เมื่อเทียบกับโลชั่นกันแดดที่มีอนุภาคขนาดใหญ่

จากเหตุที่ซิงค์ออกไซด์ได้รับความสนใจในการใช้ประโยชน์มากขึ้น ทำให้เกิดการผลิตในภาคอุตสาหกรรมมากขึ้นด้วย ซึ่งผลที่ตามมา คือ การศึกษาด้านความเป็นพิษของนาโนซิงค์ออกไซด์ ในแง่มุมต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นด้านสิ่งแวดล้อมหรือด้านความเป็นพิษต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ตัวอย่างการศึกษาความเป็นพิษของซิงค์ออกไซด์ต่อแบคทีเรียแกรมลบ โดยใช้ *E.coli* เป็นตัวแทน ส่วนแบคทีเรียแกรมบวกใช้ *S.aureus* เป็นตัวแทน และต่อเซลล์ที่ทำหน้าที่เป็นภูมิคุ้มกันของมนุษย์ในระดับเบื้องต้น (T cell) จากผลการศึกษาที่ใช้นาโนซิงค์ออกไซด์ขนาดประมาณ 13 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่า นาโนซิงค์ออกไซด์ สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของ *E.coli* ได้ที่ระดับความเข้มข้น ≥ 3.4 มิลลิโมล ในขณะที่การเจริญเติบโตของ *S.aureus* ถูกยับยั้งได้อย่างสมบูรณ์ที่ระดับความเข้มข้น ≥ 1 มิลลิโมล

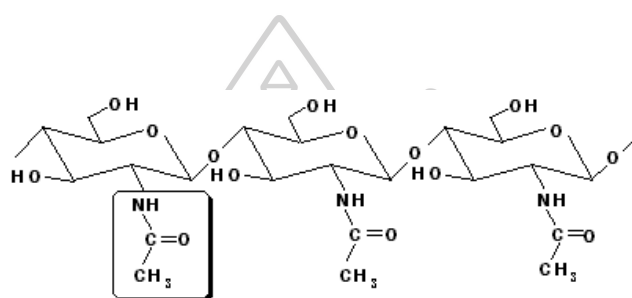
2.7.2 กลไกการยับยั้งแบคทีเรียของซิงค์ออกไซด์ [18]

กลไกการยับยั้งแบคทีเรียของนาโนซิงค์ออกไซด์ใช้หลักการโฟโตคะตะลิสต์ (Photocatalyst) โดยมีกลไก คือ เมื่อแสงทำปฏิกิริยากับนาโนซิงค์ออกไซด์จึงทำให้อิเล็กตรอนขึ้นไปยังสถานะกระตุ้น (excited state : e^-) และเกิดช่องว่างของอิเล็กตรอน (hole : h^+) บริเวณของสถานะเดิม (Ground state)

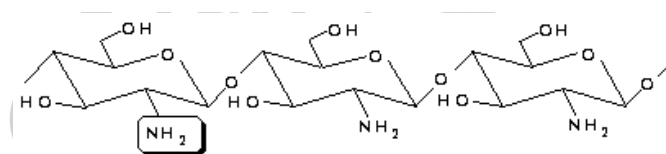
เมื่อ h^+ ทำปฏิกิริยาน้ำ (H_2O) ได้ Hydroxyl radicals ($\cdot OH$) กับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ส่วนอิเล็กตรอน (e^-) จะทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ Superoxide radical anion (O_2^-) และทำปฏิกิริยาต่อไปกับไฮโดรเจนไอออนได้ Hydrogen superoxide ($HO_2\cdot$) และเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องระหว่าง Hydrogen superoxide กับไฮโดรเจนไอออนและอิเล็กตรอนได้ Hydrogen peroxide (H_2O_2) โดยพบว่า Hydrogen peroxide จะผ่านเข้าไปในผนังเซลล์ของแบคทีเรียเกิดอันตรกิริยากับ organic materials จนเกิดการเสื่อมสลายและฆ่าแบคทีเรีย ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O)

2.8 ไคโตซาน (Chitosan)

ไคโตซาน (chitosan) [19] หรือที่เรียกว่า deacetylated chitin เป็นโคพอลิเมอร์ที่เกิดจาก glucosamine และ N-acetylglucosamine ประกอบด้วย glucosamine มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ จัดเป็นสารอนุพันธ์ของไคตินที่ผลิตได้จากการทำปฏิกิริยากับด่างเข้มข้นเพื่อกำจัดหมู่อะซิไคลออก ทำให้โมเลกุลเล็กลง และมีคุณสมบัติที่อ่อนตัวสามารถขึ้นรูปเป็นเจล เม็ด เส้นใย หรือคอลลอยด์ รวมถึงการใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่าง ๆ ได้มากขึ้น นอกจากนี้ ไคโตซานประกอบด้วยหมู่อะมิโน (-NH₂) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นเปลี่ยนเป็นสารอนุพันธ์อื่น ๆ ได้หลากหลาย



โครงสร้างทางเคมีของไคติน



โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน

ภาพที่ 2.9 โครงสร้างของไคติน และไคโตซาน [20]

2.8.1 ลักษณะเฉพาะของไคโตซาน (Characteristics of chitosan) [21]

- ระดับการกำจัดหมู่แอสไคล (Degree of deacetylation, DD)

ไคโตซานเกิดจากปฏิกิริยาการกำจัดหมู่แอสไคลของไคติน (พอลิเมอร์สายยาวที่มีองค์ประกอบเป็น เอ็น-แอสไคลกลูโคซามีน) สภาพของการเป็นไคโตซานจึงขึ้นอยู่กับปริมาณการเกิดปฏิกิริยากำจัดหมู่แอสไคล ซึ่งวัดได้จากค่าระดับการกำจัดหมู่แอสไคล การลดลงของหมู่แอสไคลในไคตินเป็นการเพิ่มขึ้นของหมู่อะมิโนของกลูโคซามีน ซึ่งเป็นการเพิ่มประจุบวกบนสายพอลิเมอร์ ทำให้เกิดสภาพของการเป็นไคโตซานเพิ่มขึ้น การจัดระดับของการกำจัดหมู่แอสไคลของไคโตซาน มีค่าเป็นร้อยละหรือที่เรียกว่า Percent Deacetylation (% DD) ค่าระดับการกำจัดหมู่แอสไคลของไคโตซานมีผลต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของไคโตซาน

- คุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ (Antimicrobial properties)

โคโตซานและอนุพันธ์ของโคโตซานมีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์หลายชนิด เช่น แบคทีเรีย ยีสต์ และรา โคโตซานจึงได้รับความสนใจอย่างมากในการนำมาใช้ประโยชน์ เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพ และยืดระยะเวลาในการเก็บรักษาอาหารหลายชนิด เช่น อาหารทะเล เนื้อสัตว์ ผักและผลไม้ โดยจากการศึกษาฤทธิ์ของโคโตซานในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ที่พบในอาหารที่ความเข้มข้น 40-750 mg/l พบว่าแบคทีเรียแกรมลบมีความไวสูงต่อโคโตซาน ในขณะที่ความไวของแบคทีเรียแกรมบวกจะแตกต่างกันมากและยีสต์มีความไวปานกลาง นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ของโคโตซานลดลงเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) สูงขึ้น องค์ประกอบของอาหาร เช่น แป้ง โปรตีน และเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) มีผลเสียต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ ส่วนไขมันไม่พบว่ามีผลกระทบใด ๆ งานวิจัยของ ดร. บุญศรี จงเสรีจิตต์ และคณะ [22] พบว่าโคโตซานที่ความเข้มข้น 100-3,000 ส่วนในล้านส่วน (part per million, ppm) สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *S.aureus*, *E.coli* และ *S.typhimurium* ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีค่าความเข้มข้นน้อยที่สุดของโคโตซาน (minimal inhibitory concentration, MIC) ในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียเท่ากับ 100, 500 และ 1,000 ppm ตามลำดับ

สำหรับกลไกการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ ได้มีผู้รวบรวมเสนอไว้หลากหลาย คุณ Harish Prashanth และคณะ [23] พบว่าโคโตซานอาจยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์โดยอนุภาคประจุลบบนผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ ทำให้ผนังเซลล์เกิดความเสียหายขึ้นจนไม่สามารถควบคุมการผ่านเข้าออกของสาร จึงเกิดการรั่วไหลของสารต่าง ๆ ในเซลล์ และทำให้เซลล์ตายในที่สุด นอกจากนี้ ยังพบว่าฤทธิ์ในการต้านจุลินทรีย์อาจเป็นผลมาจากการขัดขวางสารอาหารเข้าสู่เซลล์ โคโตซานบางชนิดโดยเฉพาะชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เมื่อเคลื่อนเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์จะไปจับกับ DNA จึงยับยั้งการสังเคราะห์ RNA และโปรตีน หรืออาจจับกับไอออนของโลหะ (chelation) และสารอาหารที่จำเป็น นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับขนาดน้ำหนักโมเลกุล ค่าระดับการกำจัดหมู่แอสซิดิล ชนิดของจุลินทรีย์หรือแบคทีเรีย ชนิดของสารละลายกรดที่ใช้ ชนิดของอาหารและอุณหภูมิในการเก็บรักษา องค์ประกอบของอาหาร เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ เกลือ อาจทำปฏิกิริยากับโคโตซานและส่งผลให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นหรือลดลงได้

- การทำให้เป็นแผ่นหรือเยื่อบาง (Formation of film)

โคโตซานและอนุพันธ์ของโคโตซานหลายชนิดมีคุณสมบัติในการนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มหรือเป็นเยื่อบาง ๆ ที่มีความเหนียว คงทน ยืดหยุ่นและไม่ฉีกขาดง่าย แผ่นฟิล์มมีลักษณะเด่นในการป้องกันการสูญเสียน้ำหรือความชื้นและควบคุมการผ่านเข้าออกของก๊าซได้ดี สามารถรับประทานได้ไม่เป็นพิษและย่อยสลายได้ในธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์หลาย

ชนิด จึงมีการนำไปใช้ประโยชน์เป็นบรรจุภัณฑ์หรือเคลือบบนผิวของอาหารเพื่อชะลอการเน่าเสียและถนอมคุณค่าของอาหาร เช่น ผลไม้ เนื้อสัตว์ และเนยแข็ง โคโตซานเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นการทำแผ่นฟิล์มโคโตซานต้องใช้กรดอินทรีย์เพื่อเป็นตัวทำละลาย เช่น กรดอะซิติก (acetic acid) กรดแลคติก (lactic acid) กรดฟอร์มิก (formic acid) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid) และกรดมาลิก (malic acid) เมื่อละลายในกรดอินทรีย์จะได้สารละลายโคโตซานที่มีความหนืดต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของกรดที่ใช้ทำละลายและจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มหรือการเคลือบโคโตซาน ประกอบกับกรดอินทรีย์เหล่านี้ยังมีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ในตัวของตัวเอง จึงช่วยเสริมฤทธิ์ในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ของโคโตซานยิ่งขึ้น ประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ขึ้นอยู่กับชนิดของกรดอินทรีย์ โดยโคโตซานที่ละลายในกรดอินทรีย์ต่างชนิดกันจะมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์แตกต่างกันไปด้วย มีรายงานว่าโคโตซานที่ละลายในกรดอะซิติก กรดแลคติกและกรดฟอร์มิก มีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียมากกว่ากรดโพรพิโอนิก และกรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid) [24]

ความแข็งแรงของแผ่นฟิล์มโคโตซานและการป้องกันความชื้นเป็นคุณสมบัติที่สำคัญและเป็นข้อจำกัดของการใช้แผ่นฟิล์มโคโตซาน จากงานวิจัยต่าง ๆ พบว่าคุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่ใช้ในการผลิต เช่น ชนิดของกรด ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และอัตราการกำจัดหมู่แอซิดิลของโคโตซาน รวมทั้งชนิดของสารที่ใช้เพื่อทำให้แผ่นฟิล์มเกิดความยืดหยุ่น (plasticizer) เช่น กลีเซอรอล (glycerol) หรือพอลิเอธิลีนไกลคอล (polyethylene glycol) แผ่นฟิล์มโคโตซานที่ผลิตจากกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) และกรดอะซิติก จะมีเนื้อแน่นและเปราะบาง ในขณะที่ฟิล์มที่ทำจากกรดแลคติก (lactic acid) และกรดซิตริก (citric acid) จะมีความยืดหยุ่นสูงกว่า นอกจากนี้เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH 3, 4 และ 5) สูงขึ้นจะทำให้การซึมผ่านของน้ำและมีปริมาณสารที่ละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นตาม แต่จะทำให้ต้านแรงดึงได้น้อยลง สำหรับแผ่นฟิล์มที่เตรียมด้วยกรดอะซิติกและกรดโพรพิโอนิกจะมีการซึมผ่านของน้ำและมีปริมาณสารที่ละลายน้ำได้ต่ำ และมีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูง ในขณะที่สำหรับแผ่นฟิล์มที่เตรียมด้วยกรดแลคติกจะยึดได้มาก และมีปริมาณสารที่ละลายน้ำได้สูง แต่มีความแข็งแรงต่อแรงดึงน้อยที่สุด

มีรายงานว่าโคโตซานที่แยกจากเปลือกแข็งของสัตว์น้ำด้วยกรรมวิธีที่ต่างกันจะมีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกันทั้งขนาดน้ำหนักโมเลกุล ความหนืด เพอร์เซ็นต์ของการลดหมู่แอซิดิล (% deacetylation) และปริมาณความชื้น จึงสามารถพัฒนาเป็นฟิล์มชนิดต่าง ๆ ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน โดยศึกษาพฤติกรรมในการดูดซับความชื้นของโคโตซานฟิล์มที่เตรียมจากเปลือกของสัตว์น้ำด้วยกรรมวิธีต่างกัน และใช้ตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ พบว่าการใช้กรดอะซิติกหรือกรดฟอร์มิกเป็นตัวทำละลายจะได้แผ่นฟิล์มโคโตซานที่มีความยืดหยุ่นและโปร่งใส ซึ่งเหมาะแก่การใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ ส่วน

แผ่นฟิล์มไคโตซานที่เตรียมด้วยกรดแลคติกหรือกรดมาลิกจะซึบน้ำได้ดี (hydrophilic) และกลายเป็นก้อนเหนียวจึงไม่เหมาะสำหรับทำเป็นบรรจุภัณฑ์

- น้ำหนักโมเลกุล ความหนืด และความสามารถในการละลาย (Molecular weight, viscosity and solubility)

ไคโตซานที่ผลิตขึ้นมีหลากหลายชนิด ซึ่งจะมีน้ำหนักโมเลกุล และระดับการกำจัดหมู่เอซิติลที่แตกต่างกันออกไป ส่งผลให้สารละลายไคโตซานมีความหนืดและคุณสมบัติอื่น ๆ ที่ต่างกันไปด้วย ไคโตซานไม่สามารถละลายน้ำแต่ละลายได้ในกรดอินทรีย์ ไคโตซานเมื่อผ่านปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยน้ำ (hydrolysis) จะอยู่ในรูปที่มีน้ำหนักโมเลกุลเล็กกลางและในรูปของโอลิโกแซ็กคาไรด์ (Oligosaccharide) ที่สามารถละลายน้ำได้และยังคงมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของเชื้อแบคทีเรียและยีสต์หลายชนิด [25] สารละลายที่เตรียมจากไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีความหนืดมาก และไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จึงมีการนำไคโตซานมาย่อยสลายด้วยกรรมวิธีทางเคมีฟิสิกส์ หรือใช้เอนไซม์เพื่อตัดสายพอลิเมอร์ให้สั้นลงซึ่งทำให้มีน้ำหนักโมเลกุลเล็กกลาง จึงเพิ่มประสิทธิภาพในการละลาย และถูกดูดซึมได้ดีขึ้นตลอดจนเพิ่มคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น การยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียและเชื้อรา ความสามารถในการต่อต้านเชื้อโรคต่าง ๆ ด้านมะเร็ง และเพิ่มภูมิคุ้มกันโรค

2.8.2 การนำไคโตซานไปใช้ประโยชน์ [26]

มักนำไปใช้ในด้านบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร (Food packaging) เนื่องจากคุณสมบัติที่หลากหลายและมีประโยชน์ของไคโตซาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติในการทำให้เป็นแผ่นฟิล์มที่ป้องกันการซึมผ่านของน้ำและก๊าซต่าง ๆ และความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ประกอบกับเป็นสารที่มาจากธรรมชาติ ไม่ก่อภูมิแพ้ ปลอดภัยต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมตลอดจนสามารถเติมสารที่มีประโยชน์ เช่น วิตามินและเกลือแร่ต่าง ๆ ลงในแผ่นฟิล์มได้ ไคโตซานจึงได้รับความสนใจอย่างมากในการนำมาใช้เป็นวัสดุหีบห่อในการบรรจุหีบห่อ หรือเคลือบผลิตภัณฑ์อาหารที่เกิดการเน่าเสียได้ง่าย เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาอาหารและเครื่องดื่มต่าง ๆ เช่น ผัก ผลไม้ เนยแข็ง และขนมปัง

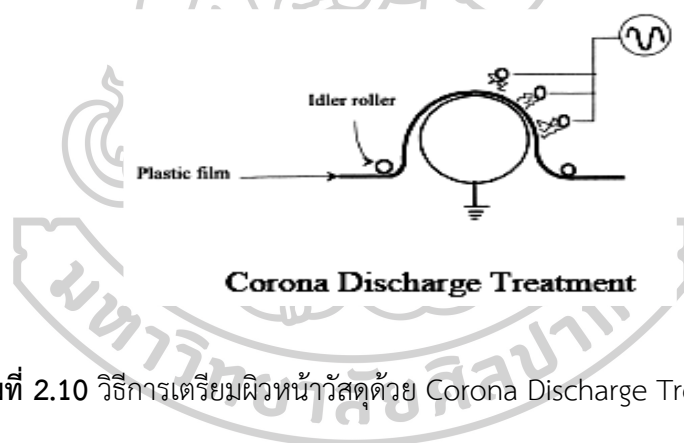
2.9 การปรับสภาพพื้นผิว (surface modification)

โดยทั่วไปพลาสติกจะมีลักษณะเฉื่อยต่อสารเคมี ผิวไม่มีรูพรุน และมีแรงดึงผิวที่ต่ำ จึงทำให้พลาสติกไม่สามารถเกาะติดกับพลาสติกเหลว สารที่ใช้เคลือบ กาว และหมึกพิมพ์ต่าง ๆ ได้ดี ดังนั้นการปรับสภาพพื้นผิว (Surface modification) จึงมีความสำคัญอย่างมากในการเคลือบผิวหรือการพิมพ์ เพื่อให้มีสมบัติการเกาะติดที่ดีขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่การปรับสภาพพื้นผิวนั้นมักจะนิยมนำไปใช้ในการเคลือบ และการลามิเนต เป็นต้น โดยในปัจจุบันการปรับสภาพพื้นผิวจะมีอยู่ 4 วิธีด้วยกัน คือ

1. การปรับสภาพผิวโดยใช้โคโรนา (Corona Treatment)
2. การปรับสภาพผิวโดยใช้ Flame Treatment
3. การปรับสภาพผิวโดยใช้พลาสมา
4. การปรับสภาพผิวโดยใช้ Primer

2.9.1 การปรับสภาพผิวโดยใช้โคโรนา (Corona discharge treatment) [27, 28]

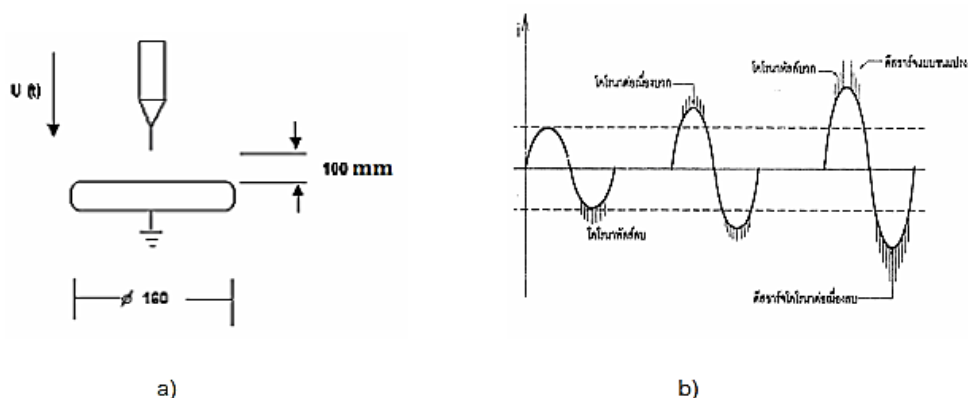
เป็นวิธีการเตรียมผิวหน้าวัสดุโดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูง (100,000 โวลต์) และใช้ความถี่ประมาณ 1 - 100 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อไอออไนซ์อากาศระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้วให้กลายเป็นไอออนและไอออนที่เกิดขึ้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผิววัสดุ โดยการไปออกซิไดซ์แผ่นฟิล์มส่งผลให้แผ่นฟิล์มมีพลังงานพื้นผิว ความขรุขระของผิวหน้าวัสดุ และความสามารถในการเปียกผิวเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสิ่งที่มีผลต่อการเตรียมพื้นผิวด้วยวิธีนี้ คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (เช่น ความถี่, โวลต์) รูปแบบของขั้วไฟฟ้า (electrode shape) บรรยากาศ (ส่วนใหญ่ใช้อากาศ) และลักษณะของวัสดุ โดยวัสดุที่เป็นแผ่นฟิล์ม แสดงได้ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 วิธีการเตรียมผิวหน้าวัสดุด้วย Corona Discharge Treatment [27]

2.9.1.1 โคโรนาดีสชาร์จ (Corona discharge)

จะเกิดตรงบริเวณรอบๆ อิเล็กโทรดปลายแหลมหรือขอบคมที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น เช่น สายตัวนำแรงสูงที่มีขนาดเล็กเกินไป หรือผิวสายตัวนำไม่เรียบพอ ทำให้อากาศรอบ ๆ บริเวณนั้น เกิดไอออนในเซชัน การทดลองเพื่อศึกษาการเกิดโคโรนาดีสชาร์จในอากาศ เริ่มต้นโดยใช้อิเล็กโทรดปลายแหลมกับกระนาบ ดังภาพที่ 2.11a) และผลการวัดรูปคลื่นแรงดันจากออสซิลโลสโคป ดังภาพที่ 2.11b)

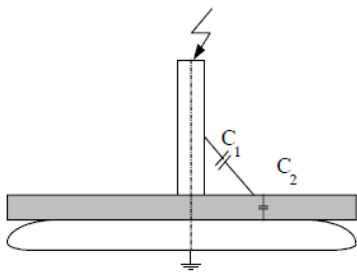


ภาพที่ 2.11 a) อิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองโคโรนาดีสชาร์จ b) ลักษณะโคโรนาดีสชาร์จ [29]

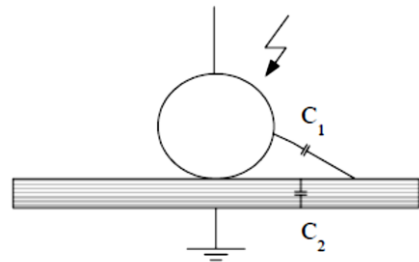
จากภาพที่ 2.11b) สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่เกิดจากอิเล็กโทรดปลายแหลม เมื่อป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นถึงค่าหนึ่ง ถ้าพิจารณารูปคลื่นแรงดันจากออสซิลโลสโคปจะสังเกตเห็นพัลส์ ซึ่งเริ่มเกิดขึ้นก่อนที่ยอดครึ่งคลื่นลบของรูปคลื่นแรงดันกระแสสลับรูปคลื่นไซน์ มีขนาดและช่วงห่างพัลส์สม่ำเสมอเท่า ๆ กัน เรียกว่า “Tracheal Pulse” มีช่วงกว้างของคลื่นเพียงสิบ ๆ นาโนวินาที ความถี่อาจถึง 0.5 MHz ถ้าเพิ่มแรงดันสูงขึ้นอีก จะสังเกตเห็นพัลส์ขึ้นที่ยอดครึ่งคลื่นบวกแต่จะไม่สม่ำเสมอทั้งยอดบวกและยอดลบพัลส์อาจจะหายไปหากเพิ่มแรงดันอีกเรียกลักษณะโคโรนาเช่นนี้ว่า “โคโรนาต่อเนื่อง (Continuous corona)” คลื่นรบกวนวิทยุจึงลดลง แต่พลังงานสูญเสียโคโรนากลับยิ่งเพิ่มมากขึ้น ต่อจากนั้น ก็สังเกตเห็นพัลส์หนาแน่นมากขึ้น ที่ยอดคลื่นบวกเรียกว่า ดีสชาร์จขนแปรง (Brush discharge)

2.9.1.2 ดีสชาร์จตามผิว (Surface discharge) [29]

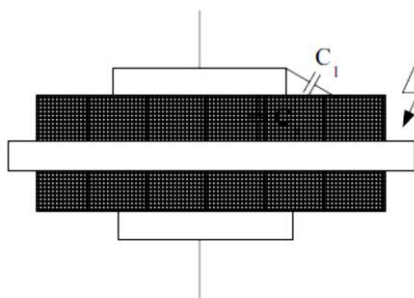
ดีสชาร์จตามผิวอาจเกิดขึ้น ตามแนวรอยต่อของฉนวนต่างชนิดกัน เช่น ของแข็งกับก๊าซ หรือของแข็งกับ ของเหลว เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวผิวรอยต่อของฉนวน สูงเกินค่าวิกฤต ตัวอย่างเช่น ปลอกฉนวนนำสายปลายสายเคเบิล หรือดีสชาร์จภายนอกกระทบเข้ากับฉนวนซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้าในเนื้อ ฉนวนไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดเบรกดาวร์นเจาะทะลุได้ เช่น แผ่นคั่นระหว่างอิเล็กโทรด หรือปลอกฉนวนนาสายดังภาพที่ 2.12



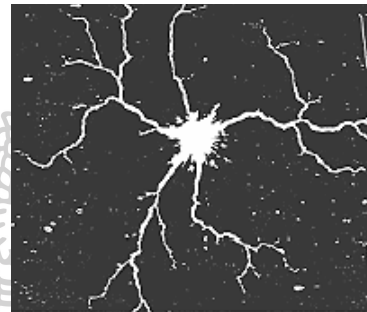
a) แท่งรอดกับระนาบคั่นด้วยแผ่นฉนวน



b) อิเล็กโทรดทรงกลมกับระนาบคั่นด้วยแผ่นแก้ว



c) ปลอกฉนวนนาสาย



d) รูปแบบการเกิดดิสชาร์จบนแผ่นฉนวนเมื่อรับแรงดันอิมพัลส์ชั่วคราว

ภาพที่ 2.12 ลักษณะฉนวนที่ทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวและการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิว [29]

ในภาพที่ 2.12a) และภาพที่ 2.12 2.9b) ดิสชาร์จตามผิวจะเกิดขึ้นที่บริเวณแท่งรอดหรือทรงกลมสัมผัสหรือใกล้กับแผ่นฉนวนหรือแผ่นแก้ว เพราะความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณนั้นจะสูงกว่าบริเวณอื่น เมื่อเพิ่มแรงดันหรือความเครียดสูงขึ้น ดิสชาร์จจะขยายตัวกว้างยาวขึ้นห่างออกไปจากแท่งรอดหรือทรงกลมสู่ขอบแผ่นฉนวนหรือแผ่นแก้ว ถ้าแผ่นฉนวนหรือแผ่นแก้วหนามากพอและแผ่นไม่กว้างเกินไปก็จะเกิดวาปไฟข้ามผ่านแผ่นแก้วไปหาอิเล็กโทรดระนาบได้ ถ้าแผ่นแก้วไม่หนาและแผ่นกว้างใหญ่ การเกิดดิสชาร์จตามผิวก็จะกว้างไประดับหนึ่งแล้วก็จะเกิดเบรกดาวร์เงาะทะเลแผ่นแก้วได้

ในภาพที่ 2.12c) ดิสชาร์จบางส่วนตามผิวจะเริ่มเกิดที่อิเล็กโทรดแหวนยึดต่อลงดินและวิ่งขยายตัวออกไปทางปลายปลอกฉนวนนาสายเข้าหาตัวนำ ทั้งนี้เพราะความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น ส่วนในภาพที่ 2.12d) เป็นรูปแบบการเกิดดิสชาร์จตามผิวบนแผ่นฉนวนเมื่อรูปแบบ

อิเล็กทรอนิกส์แสดงในภาพที่ 2.12a) และทำการป้อนแรงดันพัลส์ชั่ววอกให้กับแท่งรีด การเกิดดิสชาร์จแบบนี้มีชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า “Gliding Discharge”

ดิสชาร์จบางส่วนตามผิวที่เริ่มต้นเกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าวอาจอธิบายได้ด้วยลักษณะของสมคักดีหรือศักย์ไฟฟ้าเท่าในรูปทั้งสามกรณีค่าความซึมผ่าน (permittivity) ของฉนวนแข็งจะมีค่าสูงกว่าอากาศหลายเท่าค่าความจุไฟฟ้า C_2 ย่อมมีค่ามากกว่า C_1 ฉะนั้นตามหลักของโวลท์เตจดีไวเดอร์แรงดันตกคร่อมส่วนใหญ่จะอยู่ที่ C_1 หมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนนั้นจะมีค่าสูงกว่าเมื่อป้อนแรงดันถึงค่าหนึ่ง จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวมีค่าเกินค่าวิกฤตดิสชาร์จบางส่วนก็เริ่มเกิดขึ้น เมื่อแรงดันเพิ่มสูงกว่าค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ดิสชาร์จจะเปลี่ยนจากโคโรนาไปเป็นดิสชาร์จแบบชนแปร่งวิ่งคืบหน้าไปตามผิวฉนวนแข็ง ความเข้มของดิสชาร์จบางส่วนตามผิวจะขึ้นอยู่กับความจุไฟฟ้าของฉนวนแข็ง C_2 ถ้าค่า C_2 ยิ่งมากดิสชาร์จบางส่วนตามผิวจะยิ่งเข้มมากขึ้น

ในกรณีของแรงดันกระแสสลับ กระแสดิสชาร์จที่ไหลจากปลายดิสชาร์จชนแปร่งผ่านเนื้อฉนวนเป็นกระแสประจุ (Displacement Current) ซึ่งจะทำให้ดิสชาร์จตามผิวขยายตัวคืบหน้ามากขึ้นได้ในกรณีแรงดันกระแสตรงซึ่งค่าแรงดันที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ดิสชาร์จตามผิวจะเกิดได้ยาก หรือไม่เกิดเลยเพราะว่าไม่มีกระแสประจุ การดิสชาร์จบางส่วนตามผิวจะขึ้นอยู่กับสภาพนำไฟฟ้าของผิวและฉนวนสำหรับแรงดันอิมพัลส์ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างรวดเร็ว การเปลี่ยนแปลงรวดเร็วของแรงดันต่อเวลา dv/dt นี้เป็นผลให้กระแสประจุมีค่าสูง ด้วยเหตุนี้เองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนตามผิวเนื่องจากแรงดันอิมพัลส์จึงมีพลังงานสูง จากรูปลักษณะและดิสชาร์จบางส่วนตามผิวทำให้สามารถทราบชั่วและขนาดของแรงดันอิมพัลส์ได้

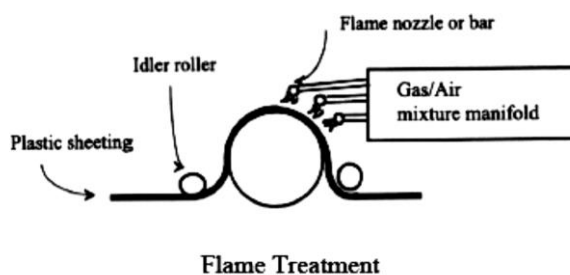
2.9.1.3 ดิสชาร์จบางส่วนภายใน (Internal discharge)

ดิสชาร์จบางส่วนภายใน หมายถึงดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลวที่มีโพรงหรือฟองก๊าซ หรือสิ่งเจือปนแปลกปลอมที่มีค่าความซึมผ่าน (permittivity) ต่ำกว่าในเนื้อฉนวนหลักอันทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงหรือสิ่งเจือปนดังกล่าวมีค่าสูงกว่าฉนวนรอบๆ ซึ่งอาจพิสูจน์ได้จากการวิเคราะห์ที่มีความซึมผ่าน (permittivity) ต่างกันวางซ้อนกัน ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเมื่อชั้นฉนวนซ้อนได้รับแรงดันถึงระดับหนึ่งแล้วจะทำให้ฉนวนโดยรอบเสียหายเกิดการกัดกร่อน การฉนวนเสื่อมสภาพ อายุการใช้งานจะสั้นลงและในบางกรณีอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวนได้ที่สุดในที่สุด

2.9.2 การปรับสภาพผิวโดยใช้ Flame treatment

วิธีนี้จะช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดติด ด้วยกระบวนการออกซิไดส์ผิวหน้าวัสดุ โดยกลไกอนุมูลอิสระ (free radical) ส่งผลให้สายโซ่โตนตัดให้สั้นลง และเกิดการเชื่อมโยงพันธะ (crosslink)

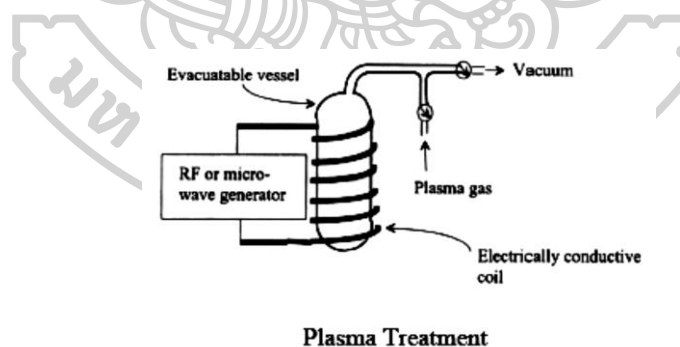
การออกซิไดส์ก่อให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) คาร์บอนิล (carbonyl) และหมู่เอไมด์ (amide group) ที่ความลึก 4-9 นาโนเมตร นอกจากนี้วิธีการนี้ส่งผลให้แรงดึงผิวสูงขึ้น ความสามารถในการเปียกผิวดีขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 วิธีการเตรียมผิวหน้าวัสดุด้วย Flame treatment [29]

2.9.3 การปรับสภาพผิวโดยใช้พลาสมา (Plasma treatment)

เป็นวิธีการเพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดติดบนผิวหน้าวัสดุโดยการยิงอนุภาคบนผิวหน้าด้วยไอออนของแก๊ส เช่น อาร์กอน (Ar) ฮีเลียม (He) ไนโตรเจน (N_2) และออกซิเจน (O_2) ที่ความดันต่ำ ๆ ส่งผลให้ผิวหน้าวัสดุมีความสามารถในการเปียกผิวมากขึ้น และผิวหน้ามีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 วิธีการเตรียมผิวหน้าวัสดุด้วย Plasma treatment [29]

2.10 การบรรจุอาหารแบบต่อต้านจุลินทรีย์

ปัจจุบันผู้ประกอบการอุตสาหกรรมนิยมนำเทคโนโลยีการบรรจุอาหารแบบต่อต้านจุลินทรีย์มาใช้ เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตอาหารมากขึ้น การบรรจุอาหารแบบต่อต้านจุลินทรีย์ (Antimicrobial food packaging) เป็นระบบการบรรจุที่สามารถทำลาย หรือ ยับยั้งการเจริญเติบโต

ของจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย รวมถึงจุลินทรีย์ก่อโรคที่ปนเปื้อนในอาหาร เพื่อให้เกิดความปลอดภัย รวมทั้งรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บ รักษาอาหารให้ยาวนานขึ้น [30] หลักการในการบรรจุอาหารแบบต่อต้านจุลินทรีย์ คือ การใช้สารต้านจุลินทรีย์ร่วมกับระบบการบรรจุ หรือใช้พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติในการต้านจุลินทรีย์ ซึ่งรูปแบบหลักการในการบรรจุอาหารแบบต่อต้านจุลินทรีย์ คือ การใช้สารต้านจุลินทรีย์ร่วมกับระบบการบรรจุ หรือ ใช้พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติในการต้านจุลินทรีย์ ซึ่งรูปแบบการนำสารต้านจุลินทรีย์มาใช้ในการบรรจุอาหารจะเป็นแบบใดนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ ชนิดของสาร ต้านจุลินทรีย์ คุณสมบัติและลักษณะเฉพาะของอาหาร สารต้านจุลินทรีย์ที่ใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่ กรดเบนโซอิกและเบนโซเอต ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเกลือซัลไฟต์ สารประกอบไนไตรต์และไนเตรต ฯลฯ [31] นอกจากนี้ ยังมีการนำสารต้านจุลินทรีย์จากธรรมชาติมาใช้มากขึ้น เช่น แบคทีริโอซิน กรดอินทรีย์และสารสกัดจากพืช โดยนำมาใช้เคลือบวัสดุบรรจุหรือผสมในฟิล์มย่อยสลายทางชีวภาพ ตัวอย่างการบรรจุอาหารแบบต่อต้านจุลินทรีย์ โดยใช้สารต้านจุลินทรีย์จากธรรมชาติแสดงตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การบรรจุอาหารแบบต่อต้านจุลินทรีย์โดยใช้สารต้านจุลินทรีย์จากธรรมชาติ [31]

สารต้านทานจุลินทรีย์	วัสดุบรรจุ	ชนิดของอาหาร	ชนิดของจุลินทรีย์
แบคทีริโอซิน โนซิน เพติโอซิน	พอลิเอทิลีน เวย์โปรตีนเคลือบพอลิโพรพิลีน	เต้าหู้ ไส้กรอก	<i>L. monocytogenes</i> <i>L. plantarum</i>
กรดอินทรีย์ กรดซอร์บิก กรดอะซิติก	พอลิไวนิลลิดีนคลอไรด์ พอลิพรอพิลีน, พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ	เนื้อวัว แฮม	<i>L. monocytogenes</i> <i>A.niger</i>
สารสกัดจากพืช น้ำมันโรสแมรี่ สารสกัดจากเมล็ดองุ่น ลินาลูล	พอลิเอทิลีน พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ, พอลิพรอพิลีน	เนื้อวัว เนื้อวัวบด เนยแข็ง	<i>Salmonella</i> <i>E. sakazaki</i> <i>B.cereus</i>

2.10.1 เทคโนโลยีการบรรจุอาหารแบบต่อต้านจุลินทรีย์มีหลายประเภท [32]

2.10.1.1 การใส่ซอง/แผ่นดูดซับสารต้านจุลินทรีย์ลงในบรรจุภัณฑ์ เป็นเทคโนโลยีที่นำมาใช้แทนการพ่นก๊าซ หรือสารต้านจุลินทรีย์ต่าง ๆ ลงบนพื้นผิวของอาหารโดยตรง ซึ่งสารต้านจุลินทรีย์ในซองหรือแผ่นดูดซับนั้นจะถูกปลดปล่อยภายในบรรจุภัณฑ์เพื่อช่วยป้องกันการเกิดราหรือจุลินทรีย์ชนิดอื่นในผลิตภัณฑ์อาหาร มีทั้งการใช้สารต้านจุลินทรีย์ในรูปแบบสารระเหย เช่น เอทานอลในซองปลดปล่อยสารระเหย ซึ่งประกอบด้วยเอทานอลในวัสดุดูดซับบรรจุในซอง พอลิเมอร์ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีใช้อย่างแพร่หลาย เช่น Antimold Mild®

2.10.1.2 การผสมสารต้านจุลินทรีย์ลงในพอลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์ เป็นวิธีที่สะดวกในการทำให้บรรจุภัณฑ์หรือฟิล์มมีคุณสมบัติต่อต้านจุลินทรีย์ โดยสารต้านจุลินทรีย์ที่นิยมใช้เติมลงไปในพอลิเมอร์ ได้แก่ ซิลเวอร์ซีโอไลท์ ซึ่งทนต่ออุณหภูมิสูง สามารถต้านแบคทีเรียและราได้หลายชนิด โดยนำไปผสมกับพอลิเมอร์ เช่น พอลิเอทิลีน, พอลิโพรพิลีน, ไนลอน และบิวทาไดอีน สไตรีน ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีใช้ทางการค้า เช่น Zeomic, Apacider, Aglon, Bactekiller และ Novaron

2.10.1.3 เทคนิคการเคลือบหรือการดูดซับสารต้านจุลินทรีย์ไว้ที่พื้นผิวของพอลิเมอร์ เป็นการนำสารต้านจุลินทรีย์เติมลงไปวัสดุที่ใช้ในการผลิตสารเคลือบ หรือฟิล์มเคลือบผลิตภัณฑ์อาหาร สารต้านจุลินทรีย์ที่นิยมใช้ คือ กรดอินทรีย์และเกลือของกรดอินทรีย์ ส่วนสารต้านจุลินทรีย์ที่ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตฟิล์มได้ จะถูกนำมาเคลือบบนแผ่นฟิล์มในภายหลัง เช่น อีเทอร์เคลือบบนฟิล์มพอลิเอทิลีน ซึ่งเทคโนโลยีการบรรจุอาหารนี้ช่วยชะลอการเจริญของยีสต์ รา และแบคทีเรียได้

2.10.1.4 การตรึงสารต้านจุลินทรีย์ให้ยึดเกาะกับพื้นผิวของพอลิเมอร์ด้วยพันธะไอออนิก หรือพันธะโควาเลนต์ โดยการเกาะติดจะต้องอาศัยฟังก์ชันนอลกรุปทั้งของสารต้านจุลินทรีย์และพอลิเมอร์ ตัวอย่างสารต้านจุลินทรีย์ ได้แก่ เปปไทด์ เอนไซม์พอลิแอมีน และกรดอินทรีย์ ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ใช้ในการบรรจุอาหาร ได้แก่ อีวีเอ เอทิลีน เมทิลอะคริเลท เป็นต้น

2.10.1.5 การใช้พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติในการต่อต้านจุลินทรีย์โดยกำเนิด พอลิเมอร์บางชนิดแสดงคุณสมบัติต่อต้านจุลินทรีย์โดยกำเนิด และนำมาประยุกต์ใช้ในสารเคลือบ และฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีประจุบวก เช่น พอลิแอลไลซีน และ โคโตซาน จะก่อให้เกิดการจับตัวกับเซลล์ ส่งผลให้เกิดการรั่วของสารสำคัญภายในเซลล์จุลินทรีย์ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ เนื่องจากประจุบวกของเอมีน จะทำปฏิกิริยาสัมพันธ์กับประจุลบของเยื่อหุ้มเซลล์ นอกจากนี้ พอลิเมอร์ที่มีประจุบวก เช่น โคโตซาน ยังสามารถใช้ร่วมกับสารต้านจุลินทรีย์อื่น ๆ เช่น กรดอินทรีย์ และสารสกัดจากพืช เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์

ปัจจุบันงานวิจัยได้มุ่งเน้นการใช้สารต้านจุลินทรีย์ชีวภาพร่วมกับวัสดุพอลิเมอร์ชนิดใหม่ที่สามารถต้านจุลินทรีย์ได้หลายชนิด และไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษหรืออันตรายต่อผู้บริโภค ซึ่งอาจเรียกได้ว่าบรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์อันชาญฉลาด หรือบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ (intelligent or smart antimicrobial packages) ที่สามารถตรวจจับจุลินทรีย์และสร้างกลไกขึ้นมา เพื่อต่อต้านจุลินทรีย์นั้นได้ [20] การบรรจุอาหารแบบต่อต้านจุลินทรีย์เป็นเทคโนโลยีที่มีวิวัฒนาการอย่างรวดเร็ว มีบทบาทสำคัญในการช่วยลดความเสี่ยงในการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรค ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของอาหาร โดยยังคงรักษาคุณภาพความสดและความปลอดภัยของอาหารไว้ เทคโนโลยีดังกล่าวฯ กำลังได้รับความสนใจและมีบทบาทในภาคอุตสาหกรรมอาหารสูงขึ้น เนื่องจากเป็นทางเลือกใหม่ที่สามารถใช้กับอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีรูปแบบที่หลากหลายและสามารถนำไปพัฒนาเชิงธุรกิจได้ในอนาคต และที่สำคัญมีแนวโน้มที่สูงขึ้นของเทคโนโลยีที่ใช้สารต้านจุลินทรีย์จากธรรมชาติและวัสดุบรรจุอาหารย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เป็นทิศทางการใช้ทรัพยากรธรรมชาติให้เกิดประโยชน์ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้บริโภคด้วย

2.11 แบคทีเรีย

แบคทีเรีย [33] เป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่เป็นเซลล์แบบโพรคาริโอต (prokariotic cell) มีลักษณะเป็นเซลล์เดี่ยว (unicellular) มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า มีขนาดเล็กประมาณ 0.3 - 2 ไมโครเมตร ต้องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 1000 เท่าจึงจะเห็นได้ชัด รูปร่างของแบคทีเรียโดยทั่วไปมี 3 แบบ คือ รูปกลม (coccus) รูปแท่ง (bacillus) และรูปเกลียว (spiral) เมื่อเลี้ยงแบคทีเรียบนอาหารเลี้ยงเชื้อในห้องปฏิบัติการและอยู่รวมกันเป็นจำนวนมากเรียกว่า โคลินี (colony) ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียกลุ่มที่เรียกว่า แอคติโนมัยซีท (actinomycetes) ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นเส้นใยคล้ายเชื้อรา โดยอาจมีการแตกแขนงและมีการแตกหักของเส้นใย เพื่อสร้างสปอร์แบบไม่อาศัยเพศด้วย โดยเราสามารถพบแบคทีเรียได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อมทั้งในดิน ในน้ำ ในอากาศ พืช สัตว์ และในคน ปัจจุบัน (ค.ศ. 2013) มีแบคทีเรียที่ถูกค้นพบและรายงานอย่างเป็นทางการ (validly published) แล้วทั้งสิ้น 10,599 ชนิด

2.11.1 โครงสร้างของแบคทีเรีย [34]

2.11.1.1 cytoplasmic membrane (เยื่อหุ้มเซลล์) เป็นเยื่อ 2 ชั้น ส่วนที่ไม่ละลายน้ำ (hydrophobic) และส่วนที่ละลายน้ำ (hydrophilic) ประกอบด้วยฟอสโฟลิปิด 20-30% โปรตีน 50-70% และคาร์โบไฮเดรตเล็กน้อย ส่วนของลิปิดและโปรตีนมีการเลื่อนไหลไปมาได้ (fluidity)

2.11.1.2 Cytoplasmic matrix มีลักษณะเป็นวุ้น ประกอบด้วย น้ำ 70 % ประจุสารอนินทรีย์ตัวกลางต่างๆของกระบวนการเมตาโบลิซึม DNA granule (สะสมสารอาหาร โปรตีน) ไรโบโซม

2.11.1.3 Ribosomes เป็นเม็ดเล็ก ๆ ขนาด 15-20 nm กระจายทั่วไปอิสระในเซลล์ประกอบด้วย RNA 60-90 % โปรตีน 10-40 % จำนวนขึ้นกับความต้องการสร้างโปรตีน

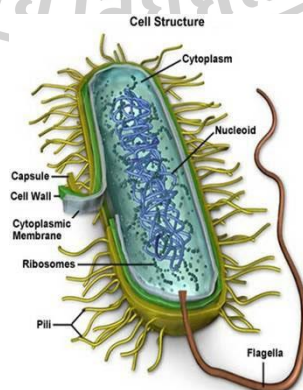
2.11.1.4 Nucleoid ประกอบด้วย DNA เส้นเดี่ยวหรือคู่ปลายสองข้างเชื่อมกัน ยาวประมาณ 500 เท่าของเซลล์ DNA ของแบคทีเรียอยู่ในนิวคลีโอออยด์หรือ bacterial chromosome

2.11.1.5 Cell wall (ผนังเซลล์) ผนังเซลล์เป็นส่วนประกอบเซลล์ที่อยู่ระหว่างแคปซูลและเยื่อหุ้มเซลล์แบคทีเรียทุกชนิดยกเว้น mycoplasma มีโครงสร้างนี้ ซึ่งหน้าที่ที่สำคัญของผนังเซลล์คือ ช่วยให้เซลล์คงรูปร่างไว้ป้องกันและรักษา ความดันภายในเซลล์ เป็น precursor ในกระบวนการสังเคราะห์สารต่าง ๆ เป็นต้น

2.11.1.6 Capsules ลักษณะเป็นวุ้น รูปร่างไม่แน่นอนไม่ติดสีแกรม ความหนาแตกต่างกันตามชนิดแบคทีเรีย

2.11.1.7 Pili ยาวกว่า fimbriae จำนวนน้อยกว่ามีส่วนร่วมในการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศในแบคทีเรียโดยอาศัย F-pili (sex pili) ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของสารพันธุกรรมจาก donor ไป receptor และมีคุณสมบัติเป็น antigen Fimbriae มีลักษณะเป็นขนละเอียดเล็ก ๆ จำนวนมาก ไม่มีหน้าที่ในการเคลื่อนที่แต่มีหลักฐานว่าช่วยให้แบคทีเรีย เกาะติดกับผิว

2.11.1.8 Flagella ลักษณะเป็นเส้นยาวคล้ายเส้นด้าย ความยาว 1-70 ไมโครเมตร ยื่นออกมาจากผนังเซลล์มีในแบคทีเรีย spiral เกือบทั้งหมด



ภาพที่ 2.15 โครงสร้างเซลล์ของแบคทีเรีย [34]

2.11.2 การจำแนกแบคทีเรีย [34]

2.11.2.1 แบคทีเรียแกรมลบ (Gram negative eubacteria) เป็นแบคทีเรียที่ย้อมติดสีแดงของซัลฟานิน โอ (Safranin O) เนื่องจากมีชั้นของสารประกอบไขมันและคาร์โบไฮเดรต (lipopolysaccharides) ทำให้ไม่ติดสีม่วงของคริสตัลไวโอเลต (Crystal violet) แบคทีเรียกลุ่มนี้มีหลายชนิดที่สำคัญ เช่น Spirochaete อยู่ในน้ำโคลน ทำให้เกิดโรคในคนและสัตว์ได้ *Escherichia coli* (*E.coli*) อยู่ในลำไส้ อุจจาระ น้ำทิ้ง

2.11.2.2 แบคทีเรียแกรมบวก (Gram positive eubacteria) เป็นแบคทีเรียที่มีผนังเซลล์หนา ประกอบด้วย peptidoglycan แต่ไม่มีเยื่อสารประกอบไขมันและคาร์โบไฮเดรตหุ้มภายนอกเหมือนกลุ่มแรก จึงย้อมติดสีม่วงของคริสตัลไวโอเลต ตัวอย่างเช่น Staphylococcus พบบนผิวหนังของคน Streptococcus lactis ใช้ทำนมเปรี้ยว

2.11.3 กลไกการออกฤทธิ์ของสารต้านจุลินทรีย์การยับยั้งและการทำลายจุลินทรีย์ [35]

กระบวนการที่จุลินทรีย์ถูกยับยั้งหรือทำลายได้ เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ นั้น มีสาเหตุมาจากการทำลายที่ส่วนต่างๆของเซลล์ของจุลินทรีย์ดังนี้ คือ

2.11.3.1 การทำลายที่ผนังเซลล์ หรือการยับยั้งการสร้างผนังเซลล์

พบว่าผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกบางชนิดถูกทำลายได้ด้วยเอนไซม์ไลโซไซม์ (lysozyme) ที่พบในน้ำตา ในเลือดขาว เมือก เป็นต้น และยังพบในแบคทีเรียอีกหลายชนิด เอนไซม์นี้จะไปย่อยสลายโครงสร้างของผนังเซลล์ทำให้เซลล์แตก

สารเคมีบางชนิดอาจไปยับยั้งการสร้างผนังเซลล์ของแบคทีเรียที่กำลังเจริญเติบโต มีผลทำให้เกิดเป็นโปรโทพลาสต์ (protoplast) ซึ่งถ้าไม่เลี้ยงไว้ในสภาพที่เหมาะสม เซลล์จะแตกได้ หรือการให้ยาเพนิซิลลินก็มีผลยับยั้งการสร้างผนังเซลล์

2.11.3.2 เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเยื่อหุ้มเซลล์ที่ยอมให้สารผ่าน (cell permeability)

เยื่อหุ้มเซลล์มีสมบัติยอมให้สารอาหารผ่านเข้าสู่เซลล์ ถ้าเยื่อหุ้มเซลล์นี้ถูกทำลายจะมีผลทำให้ชะงักการเจริญเติบโตของเซลล์ และทำให้เซลล์ตายได้ สารเคมีบางอย่าง เช่น ฟีนอล สารซักฟอก สบู่ มีความสามารถที่ไปเปลี่ยนแปลงสมบัติของเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้องค์ประกอบต่าง ๆ ภายในเซลล์รั่วไหลออกมา

2.11.3.3 เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของโปรตีนและกรดนิวคลีอิก

เซลล์ที่มีชีวิตต้องมีโปรตีน และกรดนิวคลีอิกอยู่ในสภาพปกติหรือเป็นธรรมชาติ ถ้ามีสารเคมีหรือสภาพใดๆที่ทำให้โปรตีนและกรดนิวคลีอิกเปลี่ยนไปจากสภาพธรรมชาติ (denature) จะมีผลทำลายเซลล์ได้ เช่น อุณหภูมิสูง สารเคมีความเข้มข้นสูงจะทำให้

โปรตีนและกรดนิวคลีอิกตกตะกอน จับตัวเป็นก้อนแข็ง ซึ่งจะไม่สามารถแปรสภาพกลับเหมือนเดิมได้อีก

2.11.3.4. การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์

เอนไซม์ต่าง ๆ จำเป็นในปฏิกิริยาเคมีของกระบวนการเมแทบอลิซึมในเซลล์ ดังนั้น ถ้ามีตัวยับยั้งเอนไซม์ (enzyme inhibitor) ก็จะมีผลต่อปฏิกิริยาของกระบวนการต่าง ๆ เช่น กระบวนการไกลโคไลซิส (glycolysis) วัฏจักรเครบส์ (Kreb's tricarboxylic acid cycle) และระบบไซโตโครม (cytochrome system) สารที่เป็นตัวยับยั้ง ได้แก่ ไฮยาไนต์ ยับยั้งไซโตโครมออกซิเดส ฟลูออไรด์ยับยั้งไกลโคไลซิส เป็นต้น

สารที่เป็นออกซิไดซิงเอเจนต์อย่างแรง เช่น ฮาโลเจน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อาจทำลายองค์ประกอบของเซลล์จนเซลล์ไม่สามารถทำหน้าที่ตามปกติต่อไปได้ เช่น รวมตัวกับหมู่ซัลไฟไฮไดรล (sulfhydryl) ของเอนไซม์ในเซลล์ ทำให้โครงสร้างของเอนไซม์เปลี่ยนไป เอนไซม์จึงไม่ทำงาน นอกจากนี้ยังมีไอออนของโลหะ เช่น เงิน ทองแดง และปรอท ซึ่งจะไปรวมตัวกับหมู่ซัลไฟไฮไดรลของเอนไซม์หรือโปรตีน มีผลทำให้เซลล์ถูกทำลายได้

2.11.3.5 ป้องกันการสร้างเมแทบอลิต์ (antimetabolites)

เมแทบอลิต์เป็นสารที่จำเป็นสำหรับกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ เช่น ในการสังเคราะห์กรดโฟลิก จุลินทรีย์จำเป็นต้องใช้สารกรดพาราอะมิโนเบนโซอิก (p-aminobenzoic acid) ซึ่งสารนี้มีโครงสร้างคล้ายกับ ซัลฟานิลาไมด์ (sulfanilamide) ดังนั้นการใช้ซัลฟานิลาไมด์เข้าแย่งทำปฏิกิริยาแทนที่กรดพาราอะมิโนเบนโซอิก ทำให้การสังเคราะห์กรดโฟลิกหยุดชะงัก ดังนั้นการใช้สารเคมีที่มีโครงสร้างคล้ายคลึงกันกับสารเมแทบอลิต์เพื่อไปยับยั้งเมแทบอลิซึมของเซลล์จึงช่วยทำลายจุลินทรีย์ได้

2.11.3.6 การยับยั้งการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก

สารบางอย่างมีผลในการยับยั้งการสังเคราะห์ DNA และ RNA โดยสารนั้นจะไปขัดขวางการสร้างหน่วยพื้นฐานของกรดนิวคลีอิก คือ พิวรีนและพิริมิดีน และไปขัดขวางการรวมตัวของนิวคลีโอไทด์เข้าเป็นกรดนิวคลีอิก ซึ่งมีผลต่อการสังเคราะห์โปรตีนของเซลล์ทำให้กระบวนการเมแทบอลิซึมผิดปกติไป และทำให้เซลล์ถูกทำลายได้ในที่สุด

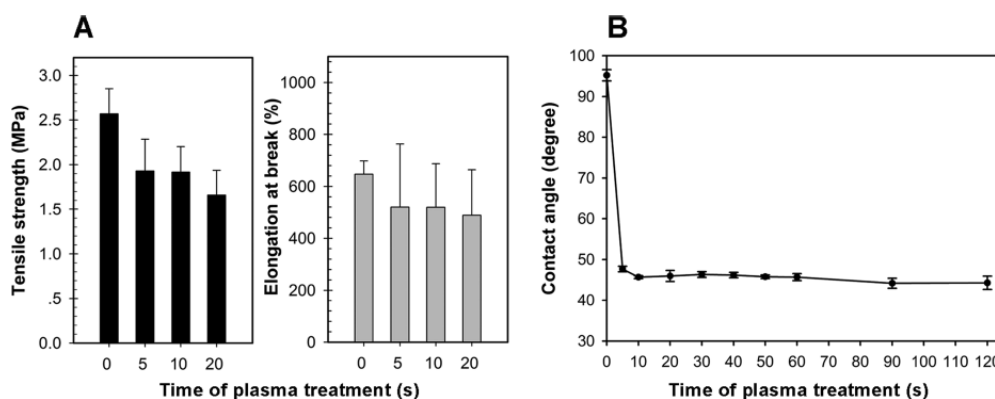
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คุณ Siriporn Theapsak และคณะ [36] ได้ทำการเตรียมฟิล์มพอลิเอทิลีน (PE) ที่มีการเคลือบผิวด้วยไคโตซานสำหรับใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่ต้านทานแบคทีเรีย โดยการปรับปรุงพื้นผิวของฟิล์มพอลิเอทิลีนด้วยเทคนิคพลาสมาแบบดีจชาร์จข้ามฉนวน (dielectric barrier discharge, DBD)

ก่อนทำการเคลือบผิวด้วยสารละลายโคโตนานที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยได้ทำการศึกษาค่ามุมสัมผัสน้ำ (contact angle) สมบัติเชิงกล ผลของการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมาที่มีต่อความขรุขระบนผิวฟิล์มพอลิเอทิลีนโดยใช้เทคนิค atomic force microscope (AFM) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) และ X-ray photoelectron microscopy (XPS) และศึกษาสมบัติในการต้านทานแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเอทิลีนที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยโคโตนาน โดยใช้แบคทีเรียแกรมลบ คือ *Escherichia coli* และแบคทีเรียแกรมบวก คือ *Staphylococcus aureus*

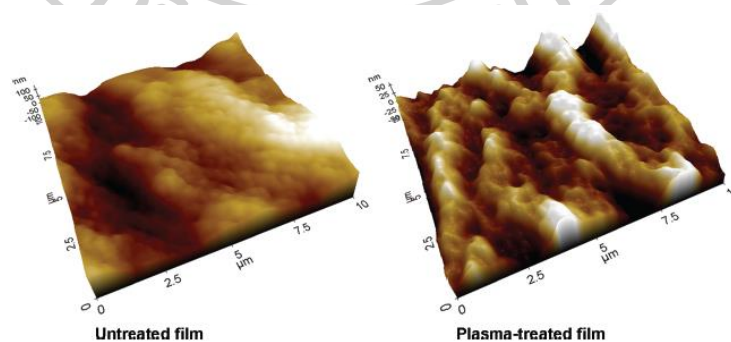
สำหรับขั้นตอนในการทดลองจะเริ่มจากการติดตั้ง DBD Plasma ใช้กระแสไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ความถี่ 350 เฮิร์ตซ์ และระยะห่างของอิเล็กโทรด 4 มิลลิเมตร ลำดับต่อไปจะทำการเตรียมโคโตนานสำหรับเคลือบผิวฟิล์ม PE โดยนำโคโตนานละลายในสารละลายกรดอะซิติก 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสารละลายโคโตนานเป็น 0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทำการกวนทิ้งไว้ข้ามคืนที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำฟิล์มไปผ่านกระบวนการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมาจะนำฟิล์มมาจุ่มลงในสารละลายโคโตนานที่มีการกวนเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้ pH เป็นกลาง ฟิล์ม PE ที่เคลือบผิวด้วยโคโตนานจะถูกทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง โดยทิ้งไว้ข้ามคืนเพื่อรอการวิเคราะห์ต่อไป

จากผลการทดสอบผลของการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมาที่มีต่อสมบัติเชิงกลและค่ามุมสัมผัสน้ำ จากภาพที่ 2.16 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงยึด (tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวก่อนการแตกหัก (%elongation at break) ของฟิล์ม PE ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมาจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการปรับปรุงสภาพผิวเพิ่มขึ้น ส่วนค่ามุมสัมผัสน้ำนั้นจะเป็นการศึกษาถึงความสามารถในการเปียกผิว พบว่ามีค่าลดลงจาก 95 เป็น 48 ° เมื่อระยะเวลาในการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมาเป็น 5 วินาที และค่ามุมสัมผัสน้ำจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาในการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมาเพิ่มขึ้นเป็น 10 วินาที หลังจากระยะเวลานี้ค่ามุมสัมผัสน้ำจะมีค่าคงที่ที่ 45.7 ° เมื่อระยะเวลาการปรับปรุงสภาพผิวนานขึ้นถึง 120 วินาที การลดลงของค่ามุมสัมผัสน้ำแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงสภาพผิวของฟิล์ม PE ด้วยพลาสมาจะสามารถเพิ่มความสามารถในการชอบน้ำ (hydropillicity) ได้



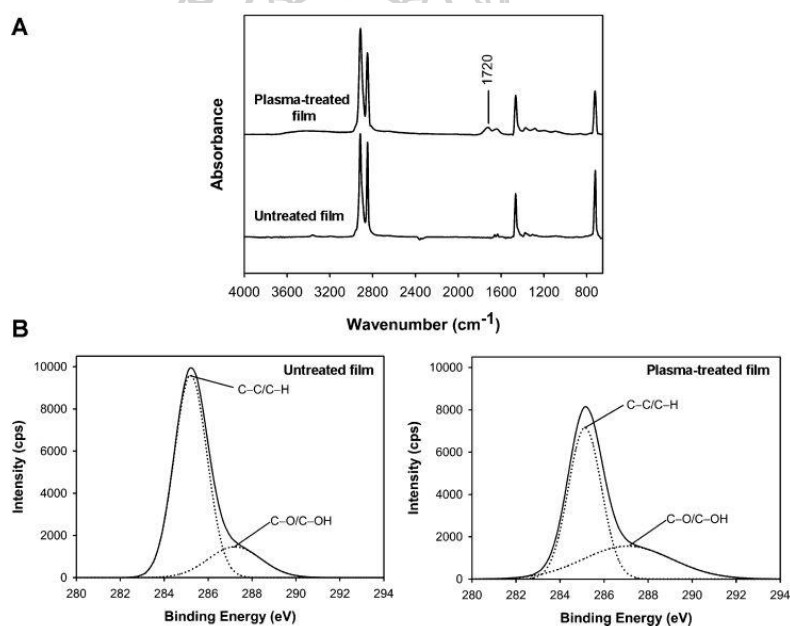
ภาพที่ 2.16 แสดงผลของเวลาในการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมา (A) สมบัติเชิงกล และ (B) ค่ามุมสัมผัสน้ำของฟิล์ม PE

ผลของการปรับปรุงสภาพผิวด้วย DBD พลาสมาที่มีต่อลักษณะสัญญาณวิทยาของฟิล์ม PE โดยใช้เทคนิค AFM จากภาพที่ 2.17 พบว่าฟิล์ม PE ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมา พื้นผิวโดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะค่อนข้างเรียบ ในทางกลับกันฟิล์มที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมาจะมีความขรุขระมากขึ้น ซึ่งสามารถหาค่าความขรุขระของพื้นผิวโดยใช้ Root Mean Square (rms) พบว่าฟิล์ม PE ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวมีค่าเป็น 29.35 ± 8.94 นาโนเมตร ในขณะที่ฟิล์มที่มีการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมาเป็นเวลา 10 วินาที จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 37.33 ± 9.03 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงสภาพผิวด้วย DBS พลาสมาจะส่งผลต่อฟิล์ม PE อย่างมาก



ภาพที่ 2.17 แสดงภาพ AFM ใน 3 มิติของฟิล์ม PE ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมา (หลังจากการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมาเป็นเวลา 10 วินาที)

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ผิวของฟิล์ม PE ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมาในอากาศจะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR และ XPS ภาพที่ 2.18A แสดงสเปกตรัมที่ได้จาก ATR-FTIR ของฟิล์ม PE ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมาเป็นเวลา 10 วินาที เนื่องจากโครงสร้างเคมีของ PE ประกอบด้วยหมู่เมทิลีน (CH_2) อินฟราเรดสเปกตรัมของฟิล์ม PE ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมาจะประกอบด้วย 4 พีค คือ methylene stretching ที่ 2920 และ 2850 cm^{-1} และ methylene deformations ที่ 1464 และ 719 cm^{-1} หลังจากการปรับปรุงสภาพผิวจะปรากฏพีคที่ 1720 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นของหมู่ $\text{C}=\text{O}$ stretching และที่บริเวณ 3200 -3800 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$)



ภาพที่ 2.18 (A) ATR-FTIR และ (B) XPS สเปกตรัมของฟิล์ม PE ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมาเป็นเวลา 10 วินาที

ภาพที่ 2.18B แสดงสเปกตรัม deconvolute ของ $\text{C}1s$ ที่ได้จากเทคนิค XPS ของฟิล์ม PE ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมาเป็นเวลา 10 วินาที พบว่าสเปกตรัมทั้งสองสามารถซ้อนทับกับสององค์ประกอบ คือ 1) องค์ประกอบที่ 285 อิเล็กตรอนโวลต์ เกี่ยวข้องกับคาร์บอนที่ต่อกับคาร์บอนหรือไฮโดรเจน ($\text{C}-\text{C}/\text{C}-\text{H}$) และ 2) องค์ประกอบที่ 286.7 อิเล็กตรอนโวลต์

เกี่ยวข้องกับคาร์บอนที่ต่อกับออกซิเจน (C-O/C-OH) ซึ่งสอดคล้ององค์ประกอบทางเคมีกับอัตราส่วนอะตอมของฟิล์ม PE ที่ได้จากเทคนิค XPS แสดงดังตารางที่ 2.2

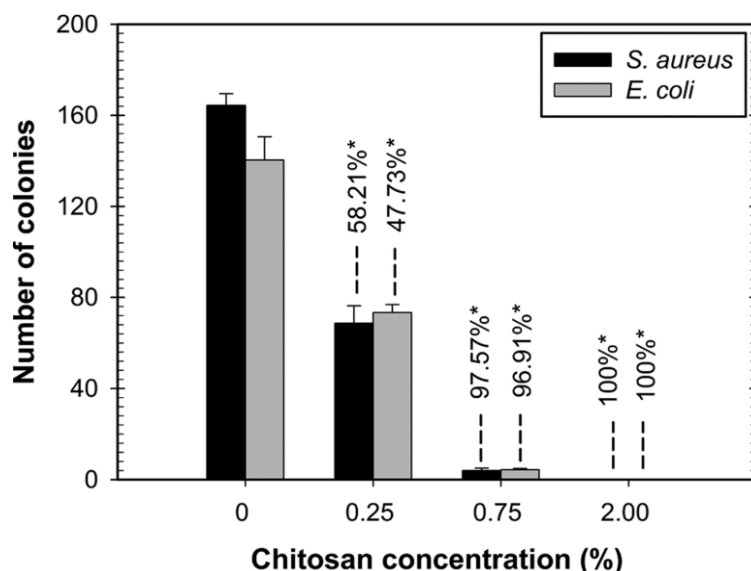
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีและอัตราส่วนอะตอมของฟิล์ม PE ที่ได้จากเทคนิค XPS

samples	chemical composition (%)			atomic ratios	
	C1s	O1s	N1s	O/C	N/C
untreated	77.13	20.03	2.84	0.26	0.037
plasma-treated	69.78	27.42	2.81	0.39	0.040

จากตารางที่ 2.2 พบว่าอัตราส่วนอะตอม O/C ของฟิล์ม PE ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมามีค่าเป็น 0.26 และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.39 ภายหลังจากการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมา นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนอะตอม N/C จาก 0.037 เป็น 0.040 สำหรับฟิล์ม PE ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมา ตามลำดับ

สำหรับการทดสอบสมบัติในการต้านทานแบคทีเรีย พบว่าสมบัติของสารต้านทานแบคทีเรียของไคโตซานจะขึ้นอยู่กับปัจจัย เช่น ความเข้มข้น น้ำหนักโมเลกุล ระดับการกำจัดหมู่เอซิดิล และชนิดของแบคทีเรีย เพื่อประเมินถึงผลของความสามารถในการต้านทานแบคทีเรียของฟิล์ม PE ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมาและเคลือบผิวด้วยไคโตซาน จะทำการทดสอบฟิล์มที่มีความเข้มข้นของไคโตซานแตกต่างกัน คือ 0.25, 0.75 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์ ในการต้านทานแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ แบคทีเรียแกรมบวก *S. aureus* (TISTR no. 1466) และแบคทีเรียแกรมลบ *E. coli* (TISTR no. 780) โดยวิธีการนับโคโลนี ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 2.19 พบว่าเมื่อฟิล์มสัมผัสกับเซลล์แบคทีเรียเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะมีจำนวนโคโลนีของแบคทีเรียทั้งสองชนิดลดลง และเมื่อความเข้มข้นของไคโตซานเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการลดลงของแบคทีเรีย (bacterial reduction rate (BRR)) ของฟิล์มที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมาและเคลือบผิวด้วยไคโตซานความเข้มข้น 0.25 เปอร์เซ็นต์ จะต้านแบคทีเรียชนิด *S. aureus* และ *E. coli* เป็น 58 และ 48 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และค่า BRR ในการต้านทานของแบคทีเรียทั้งสองชนิดจะเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเข้มข้นของไคโตซานที่เคลือบผิวฟิล์ม PE เป็น 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไคโตซานที่เคลือบบนผิวฟิล์ม PE สามารถต้านทานแบคทีเรียได้ กลไกในการต้านทานแบคทีเรียของไคโตซานขึ้นอยู่กับอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างโมเลกุลประจุบวกของไคโตซาน และโมเลกุลประจุลบของเยื่อหุ้มเซลล์แบคทีเรีย โดยเฉพาะอันตรกิริยาจากแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic forces) ระหว่างหมู่ protonate NH_3^+ ของไคโตซานและหมู่ฟอสเฟตของเยื่อหุ้มเซลล์แบคทีเรีย อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เป็น

ผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของเยื่อหุ้มเซลล์ และการขัดขวางการทำงานของมัน ทำให้เกิดการเสียสมดุลภายในเซลล์ เกิดการรั่วของอิเล็กโทรไลต์ เช่น โพแทสเซียมไอออน และสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น กรดนิวคลีอิก และกลูโคส เป็นผลให้การเติบโตของแบคทีเรียถูกยับยั้งและตายในที่สุด

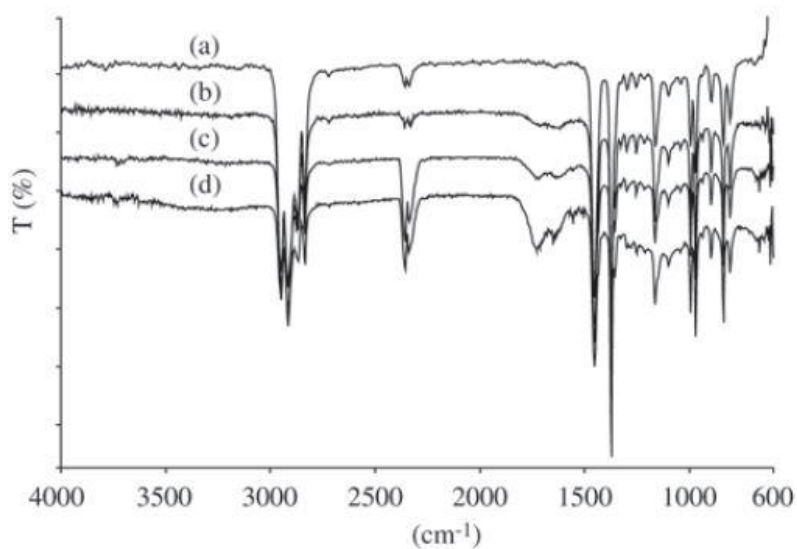


ภาพที่ 2.19 จำนวนโคโลนีของฟิล์ม PE และฟิล์ม PE ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมา และเคลือบผิวด้วยไคโตซานความเข้มข้น 0.25, 0.75 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในการต้านทานแบคทีเรียชนิด *S.aureus* และ *E.coli*

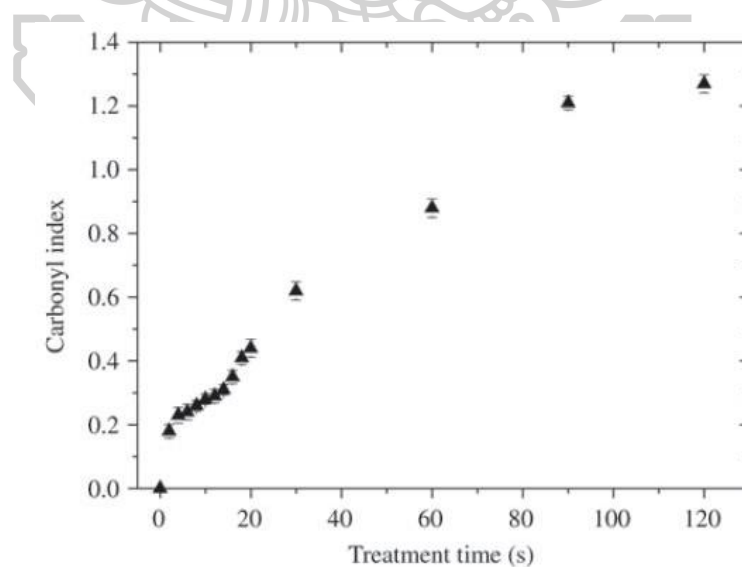
จากงานวิจัยของคุณ Noeli Sellin และคณะ [37] ได้ทำการวิเคราะห์ห่อองค์ประกอบที่พื้นผิวของฟิล์มพอลิพรอพิลีน (PP) ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนาในอากาศ สำหรับขั้นตอนการทดลองเริ่มจากการทำความสะอาดฟิล์ม PP ด้วยอะซิโตนและทำให้แห้งเพื่อป้องกันการปนเปื้อนที่พื้นผิว หลังจากนั้นจะทำการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา โดยใช้กระแสไฟฟ้าประมาณ 5000 โวลต์ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 3 มิลลิเมตร ระยะเวลาและการควบคุมสภาวะแวดล้อมแตกต่างกัน (อุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 55 เปอร์เซ็นต์)

จากการทดสอบองค์ประกอบเคมีด้วยเทคนิค ATR-FTIR แสดงดังภาพที่ 2.20 สเปกตรัมของฟิล์ม PP ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา พบว่าฟิล์ม PP ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาจะเกิดหมู่ฟังก์ชันมีช่วงที่บริเวณ $3600 - 3200 \text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับพันธะไฮโดรเจนของแอลกอฮอล์ (-OH) ส่วนพีคที่ 1720 cm^{-1} สามารถยืนยันถึงหมู่คาร์บอนิล (C=O) ของหมู่ -COOH และที่ 1645 cm^{-1} สอดคล้องกับหมู่พันธะคู่ของ C=O olefinic หรือหมู่ C=O enolic ในฟิล์ม PP ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว โดยความเข้ม (intensity) ของพีคแสดงให้เห็นว่ามีการดูดกลืนของ

หมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการปรับปรุงสภาพผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแสดงค่าดัชนีของหมู่คาร์บอนิล (carbonyl index) ดังภาพที่ 2.21 สังเกตแถบของการดูดกลืนที่ $1710 - 1720 \text{ cm}^{-1}$ สอดคล้องกับหมู่เอสเทอร์ (C=O) ส่วนหมู่นไตรเจนที่ถูกออกซิไดซ์จะไม่พบในทุกกรณี

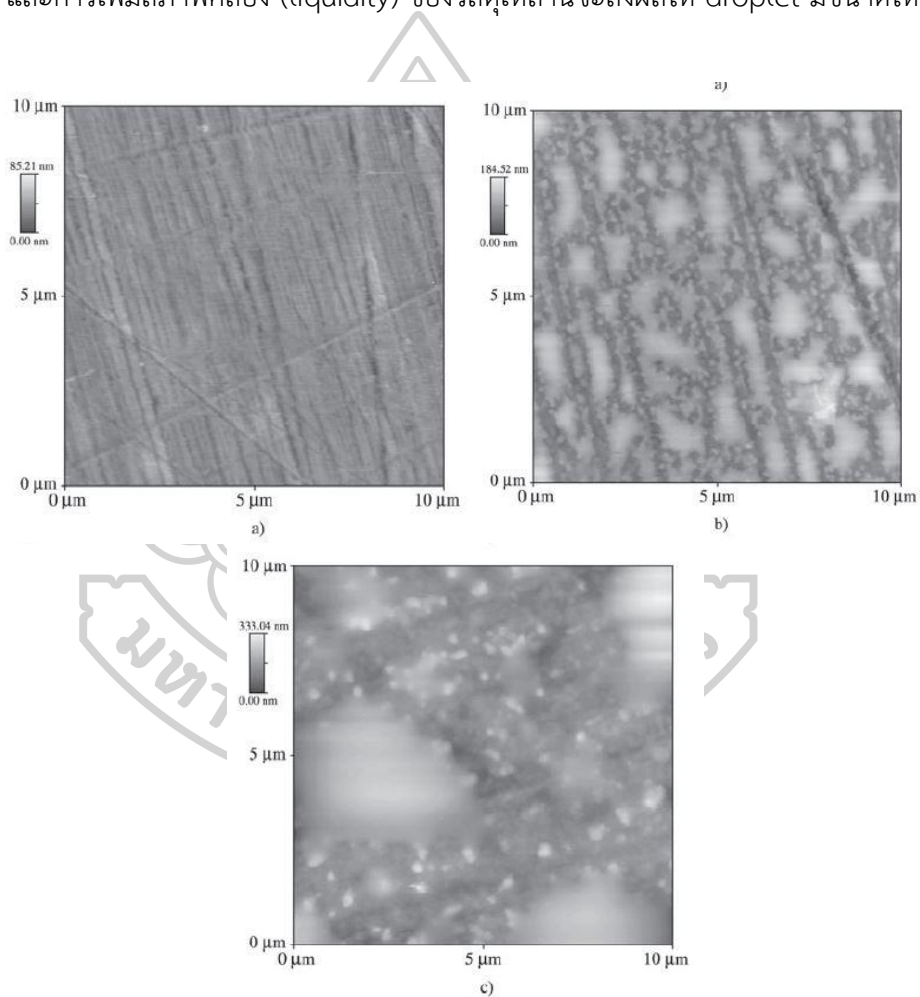


ภาพที่ 2.20 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากเทคนิค ATR-FTIR ของฟิล์ม PP (a) ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว และผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาที่เวลา (b) 2 วินาที (c) 10 วินาที (d) 30 วินาที



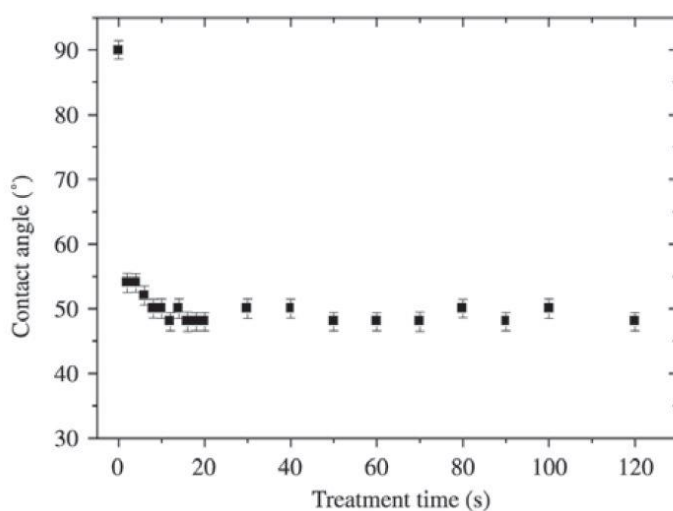
ภาพที่ 2.21 ค่าดัชนีหมู่คาร์บอนิลของฟิล์ม PP ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาที่เวลาต่าง ๆ

การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค AFM แสดงดังภาพที่ 2.22 พบว่าฟิล์ม PP ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาจะมีพื้นผิวขรุขระ มีโครงสร้างที่เป็นเม็ดละเอียด (granular structure) และมีการจัดเรียงตัวตามทิศทาง เป็นผลมาจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม ภายหลังจากการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดของสัณฐานวิทยา คือ จะมีลักษณะเป็นหยดขนาดเล็ก (droplet) อะตอมของออกซิเจนในอากาศจะทำปฏิกิริยากับสายโซ่ PP และออกซิไดซ์เกิดเป็นหมู่มีขั้วขึ้นที่ผิวฟิล์ม สาเหตุของการเพิ่มขึ้นของออกซิเดชัน เช่น การเพิ่มระยะเวลาในการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา การตัดสายโซ่พอลิเมอร์ การลดลงของน้ำหนักโมเลกุล และการเพิ่มสภาพคล่อง (liquidity) ของวัสดุเหล่านี้จะส่งผลให้ droplet มีขนาดใหญ่ขึ้น



ภาพที่ 2.22 แสดงภาพ AFM ของฟิล์ม PP (a) ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว และผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยพลาสมาที่เวลา (b) 2 วินาที (c) 30 วินาที

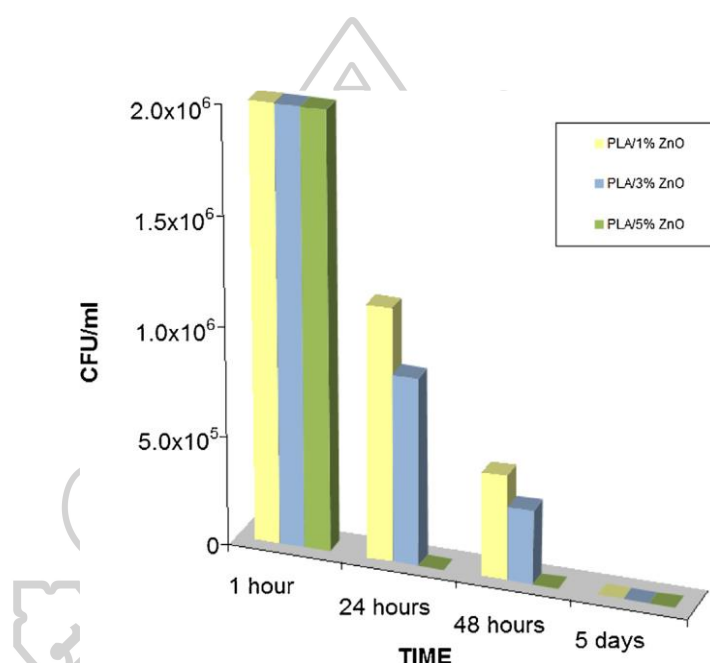
จากภาพที่ 2.23 การทดสอบความสามารถในการเปียกผิว (wettability) โดยการศึกษาค่ามุมสัมผัสน้ำ (contact angle) ของฟิล์ม PP ที่ระยะเวลาในการปรับปรุงสภาพผิวแตกต่างกัน พบว่าฟิล์ม PP ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวจะมีค่ามุมสัมผัสน้ำ 90° และฟิล์มที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาเป็นระยะเวลา 2 วินาทีจะมีค่ามุมสัมผัสน้ำลดลงจาก 90° เป็น 54° และการปรับปรุงสภาพผิวด้วยระยะเวลามากกว่า 10 วินาที จะมีค่ามุมสัมผัสน้ำเปลี่ยนแปลงไม่มากนักอยู่ที่ประมาณ 50° สำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์นั้นต้องการการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาโดยใช้ระยะเวลาอันสั้น การปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาจะสามารถเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วบนผิวของฟิล์ม PP ทำให้เพิ่มความสามารถในการเปียกผิว และส่งผลให้เกิดการยึดเกาะที่ดีขึ้น



ภาพที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมสัมผัสน้ำกับเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาของฟิล์มพอลิพรอพิลีน

จากงานวิจัยของคุณ Antomella Marra และคณะ [38] ได้ทำการเตรียมฟิล์มพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ปริมาณแตกต่างกัน คือ 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร จากการศึกษาสมบัติการต้านทานแบคทีเรียของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ แสดงดังภาพที่ 2.24 ฮิสโตแกรมแสดงความเข้มข้นของแบคทีเรียชนิด *E. coli* ในหน่วยโคโลนีต่อมิลลิเมตร (CFU/ml) ของฟิล์ม PLA ที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ในปริมาณแตกต่างกัน ที่ระยะเวลา 1, 24, 48 ชั่วโมง และ 5 วัน และตารางที่ 2.3 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลง (%R) ของแบคทีเรียชนิด *E. coli* ที่เวลาแตกต่างกัน ผลที่ได้แสดงถึงความสามารถในการต้านทานแบคทีเรียชนิด *E. coli* ของฟิล์ม PLA/ZnO biocomposites ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับเวลาและ

ปริมาณการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของแบคทีเรียมีค่าเท่ากับ 2×10^6 CFU/ml สำหรับฟิล์ม PLA พบว่าไม่มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของสารต้านแบคทีเรียจนถึงเวลา 5 วัน เป็นผลมาจากฟิล์ม PLA ไม่มีสมบัติในการต้านทานแบคทีเรีย สำหรับตัวอย่างฟิล์ม PLA ที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าหลังจากผ่านไป 1 ชั่วโมง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของแบคทีเรีย แต่หลังจากผ่านไป 24 ชั่วโมง ตัวอย่างฟิล์ม PLA ที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์ แสดงการต้านทานเชื้อแบคทีเรียสูงถึง 99.99 เปอร์เซ็นต์ ส่วนฟิล์ม PLA ที่มีการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มเช่นเดียวกันเมื่อเวลาผ่านไป 5 วัน

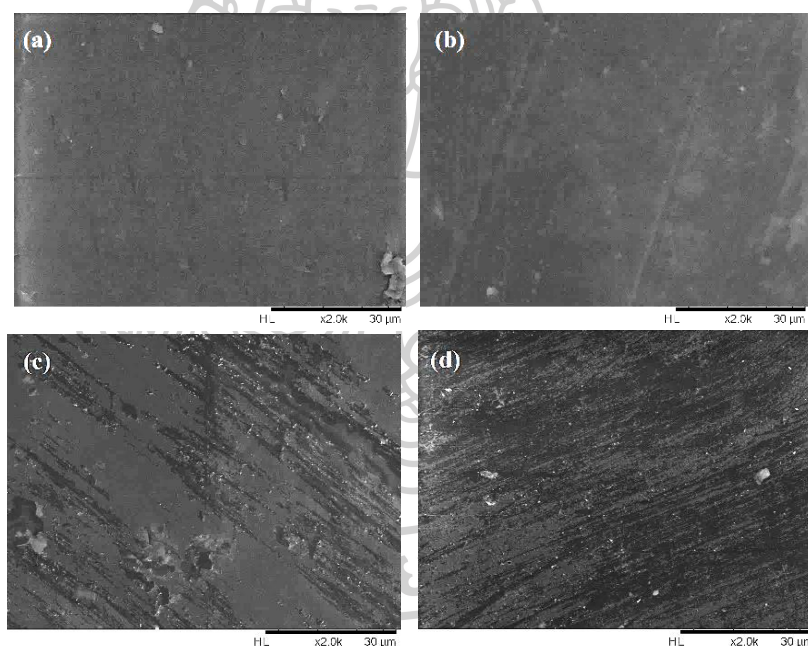


ภาพที่ 2.24 แสดงผลของเวลาและปริมาณการเติมอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่มีต่อความสามารถในการต้านทานแบคทีเรียชนิด *E.coli* ของฟิล์ม PLA/ZnO biocomposite

ตารางที่ 2.3 การลดลง (%R) ของ *E.coli* เมื่อสัมผัสกับฟิล์ม PLA และ PLA/ZnO biocomposite ที่เวลา 1, 24, 48 และ 5 วัน

Sample	%R(t= 1 h)	%R (t= 24 h)	%R (t= 48 h)	%R(t= 5 days)
PLA	0	0	0	0
PLA/1% ZnO	0	42.41 ± 0.01	76.22 ± 0.01	99.99 ± 0.01
PLA/3% ZnO	0	57.04 ± 0.01	82.80 ± 0.01	99.99 ± 0.01
PLA/5% ZnO	0	99.99 ± 0.01	99.99 ± 0.01	99.99 ± 0.01

จากงานวิจัยของคุณศุภชัย สง่า และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBS ในอัตราส่วนการผสมเป็น 90/10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปเคลือบผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยไครโตซาน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่มีฤทธิ์ในการต่อต้านแบคทีเรีย ซึ่งใช้การปรับปรุงสภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยโคโรนาที่กระแสไฟฟ้าต่างกัน 3 ค่า คือ 4, 5 และ 6 แอมแปร์ จากการทดสอบผลของการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนาที่มีต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม จากภาพที่ 2.25 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนาที่กระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์จะมีพื้นผิวที่ราบเรียบ แต่เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าเป็น 5 และ 6 แอมแปร์ จะส่งผลให้ฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากการกัดกร่อน (etching) ที่บริเวณพื้นผิวของฟิล์มในระหว่างกระบวนการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา

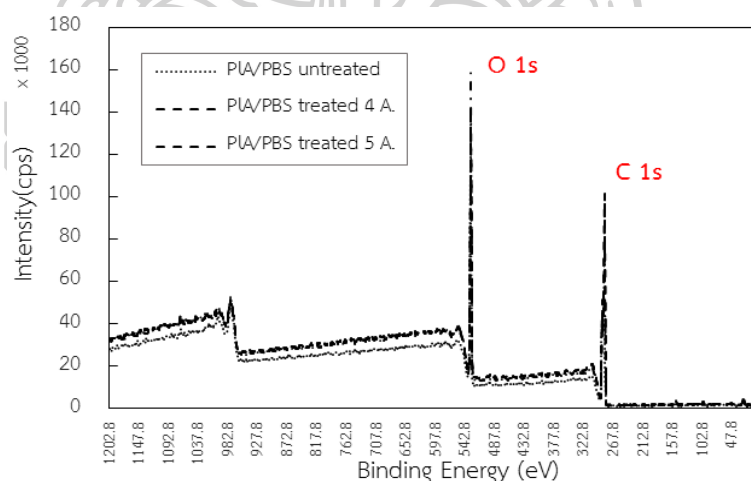


ภาพที่ 2.25 ภาพที่ได้จากเทคนิค SEM แสดงพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBS ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว (a) และผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยกระแสไฟฟ้า 4 (b) 5 (c) และ 6 แอมแปร์ (d)

การศึกษาความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบด้วยสารละลายไครโตซานทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา โดยการนำตัวอย่างไปศึกษาภาพตัดขวางด้วยเทคนิค SEM พบว่าฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยไครโตซานความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ไม่ผ่านการ

ปรับปรุงสภาพผิวจะมีความหนาของโคโตซานประมาณ 2.1634 ไมโครเมตร และฟิล์มที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยกระแสไฟฟ้า 4, 5 และ 6 แอมแปร์ จะมีความหนาของโคโตซานเป็น 4.7811, 3.0387 และ 3.9119 ไมโครเมตร ดังนั้นการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนาจะช่วยทำให้โคโตซานติดผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้ดียิ่งขึ้น ในทำนองเดียวกันการเคลือบผิวด้วยโคโตซานที่ความเข้มข้นอื่นๆ ได้แก่ 0.25, 0.5 และ 1 พบว่าจะมีแนวโน้มที่เหมือนกัน โดยฟิล์มที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาจะมีความหนามากกว่าฟิล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา โดยที่การปรับปรุงด้วยกระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์ จะมีความหนาของโคโตซานมากที่สุด รองลงมาคือ 6 และ 5 แอมแปร์ ตามลำดับ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่มากเกินไปอาจส่งผลให้ผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดการสลายตัวทางความร้อน จึงมีความสามารถในการเกาะติดลดลง นอกจากนี้ความหนาของโคโตซานจะมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโคโตซานเพิ่มขึ้น

จากภาพที่ 2.26 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบเคมีที่พื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา พบว่า XPS สเปกตรัมของทุกตัวอย่างจะปรากฏพีคหลัก 2 ตำแหน่ง คือ 285 และ 533 อิเล็กตรอนโวลต์ สันนิษฐานได้ว่าเป็นพีค C1s ของ aliphatic carbon bond (C-C) และ O1s ของ C=O หรือ C-O ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมคือ คาร์บอนและออกซิเจน



ภาพที่ 2.26 XPS survey spectrum ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา (Corona treatment)

จากตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมี อัตราส่วนอะตอม และเปอร์เซ็นต์ของพันธะเคมีที่แตกต่างกันบนพื้นผิวของฟิล์มทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา พบว่าการปรับ

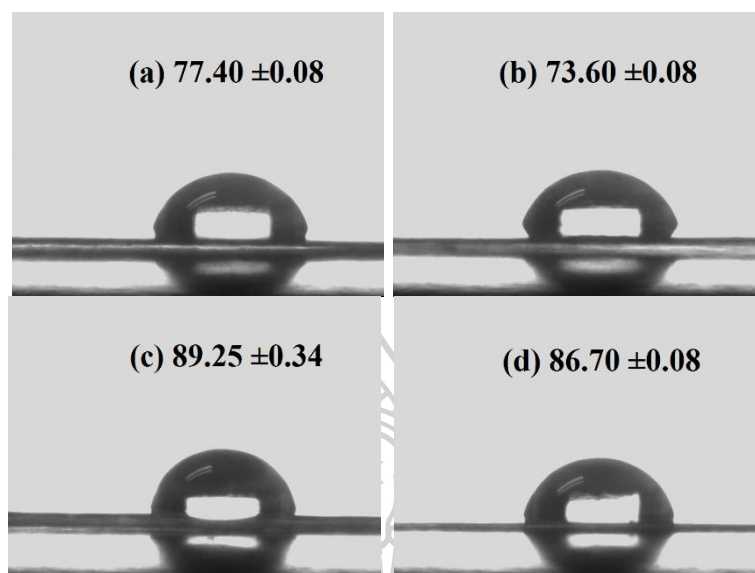
สภาพผิวด้วยกระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์ ทำให้อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C ratio) เพิ่มขึ้นจาก 0.494 เป็น 0.509 เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวของฟิล์มทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วในระหว่างการปรับสภาพผิว ในทางตรงข้ามการปรับสภาพผิวด้วยกระแสไฟฟ้า 5 และ 6 แอมแปร์ ส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C ratio) ลดลงเป็น 0.364 และ 0.447 ตามลำดับที่เป็นเช่นนี้เพราะอาจจะเกิดการสลายตัวของโมเลกุลพอลิเมอร์ที่พื้นผิวหลังจากถูก bombard ด้วยกระแสไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงเกินไป

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมี อัตราส่วนอะตอมบนพื้นผิว และเปอร์เซ็นต์ของพันธะทางเคมีที่แตกต่างกันของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพผิวด้วยโคโรนา

Sample	Chemical composition		atomic ratios	285 eV	287 eV	289 eV
	%C	%O	O/C	C-C/C-H	C-O	O-C=O
PLA/PBS untreated	66.92	33.05	0.494	44.9	26.9	28.2
PLA/PBS treated 4 A.	66.29	33.71	0.509	40.1	30.9	29.0
PLA/PBS treated 5 A.	72.26	26.31	0.364	48.5	22.5	22.7
PLA/PBS treated 6 A.	68.33	30.54	0.447	47.2	28.2	24.6

จากภาพที่ 2.27 พบว่าพอลิเมอร์ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยกระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์ จะมีมุมสัมผัสน้ำลดลงจาก $77.4 \pm 0.08^\circ$ ไปเป็น $73.6 \pm 0.08^\circ$ การลดลงของมุมสัมผัสน้ำแสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาจะมีความชอบน้ำสูงขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว จากการวิเคราะห์ด้วย XPS ในทางตรงข้ามการปรับสภาพผิวด้วยโคโรนาที่กระแสไฟฟ้า 5 และ 6 แอมแปร์ ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 89.25 ± 0.34 และ 86.7 ± 0.08 องศา ตามลำดับ เป็นผลมาจากความขรุขระของพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่มากขึ้น โดยทั่วไปความขรุขระของพื้นผิวนั้นจะมีอิทธิพลต่อการวัดค่ามุมสัมผัสน้ำ ซึ่งค่ามุมสัมผัสน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อความขรุขระของฟิล์มมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับสภาพผิวนั้นสูงมากเกินไปผลทำให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวและทำให้หมู่ที่มีขั้วถูกปลดปล่อยออกมาพร้อมกับพวกสารระเหย (volatile species) จึงทำให้มันมีความชอบน้ำ (hydrophilic) ลดลง ดังนั้นจากผลการทดลองขององค์ประกอบทางเคมีที่พื้นผิวและค่ามุมสัมผัสน้ำนั้นสรุปได้ว่าการปรับสภาพผิวด้วย

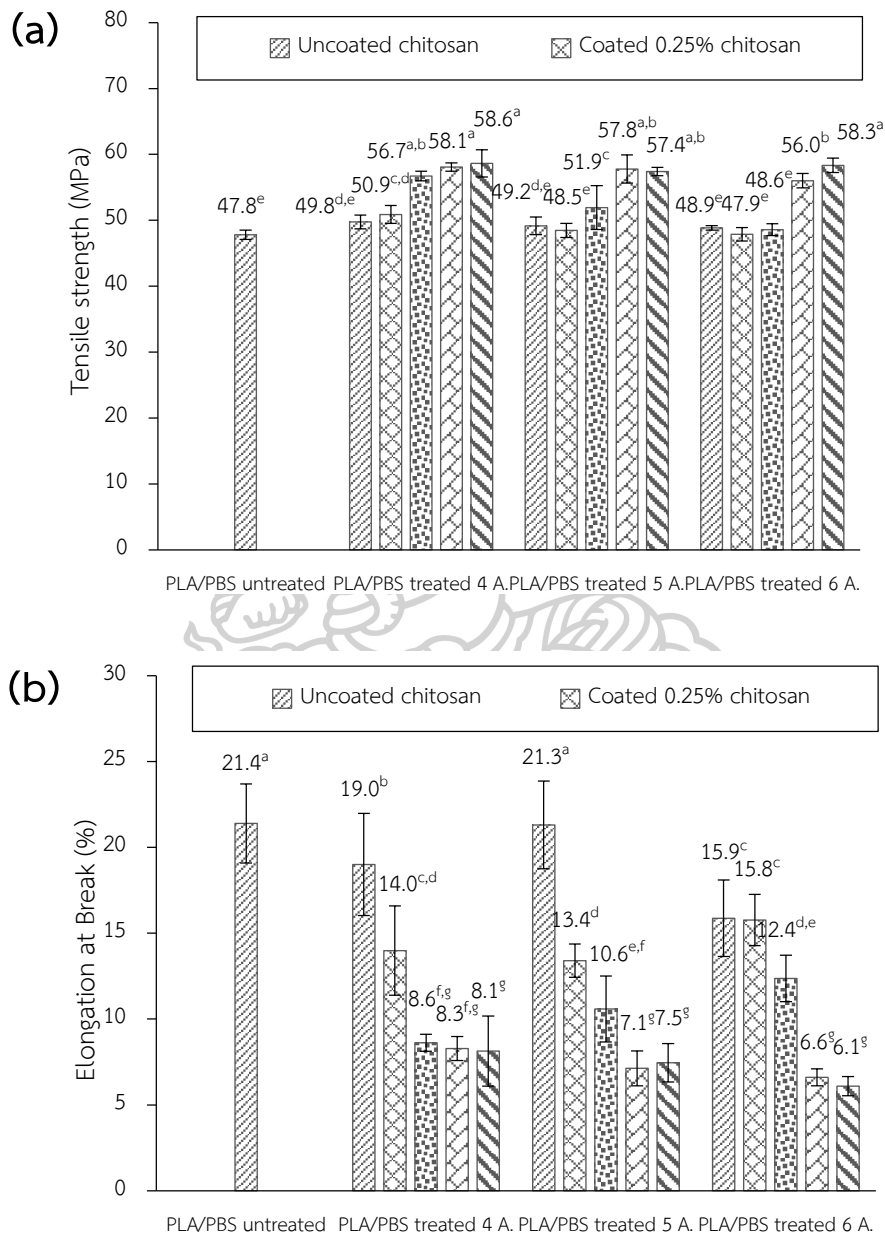
โคโรนาที่กระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์ มีความเหมาะสมที่สุดในการเคลือบผิวด้วยสารละลายไคโตซาน เนื่องจากมีอัตราส่วนของหมู่ฟังก์ชันที่สูง และมีความเปียกผิวที่ดี



ภาพที่ 2.27 ค่ามุมสัมผัสน้ำที่ผิว (water contact angle) ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว (a) และผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยกระแสไฟฟ้าที่ 4 (b) 5 (c) และ 6 แอมแปร์ (d)

จากภาพที่ 2.28 การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา รวมถึงฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ถูกเคลือบด้วยสารละลายไคโตซาน ความเข้มข้นต่างๆ พบว่าความแข็งแรงต่อการดึงยึด (tensile strength) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนามีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ถึงแม้ว่าการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนานั้นจะช่วยเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว เป็นเหตุให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความขรุขระมากขึ้นแต่ก็ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อ tensile strength ส่วนความสามารถในการดึงยึด (elongation at break) ของฟิล์มที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว เนื่องจากว่าฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวนั้นมีพื้นผิวที่มีความขรุขระ ซึ่งความขรุขระบนพื้นผิวของฟิล์มนี้จะกลายเป็นจุดรวมแรงเค้น (stress concentration) เป็นเหตุทำให้เกิดการแตกหักได้ง่าย นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่า tensile strength และ elongation at break ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ถูกเคลือบผิวด้วยสารละลายไคโตซานที่ความเข้มข้นต่างๆ จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายไคโตซานที่เคลือบบนฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่า tensile strength มีค่ามากขึ้น แต่ในทางกลับกัน

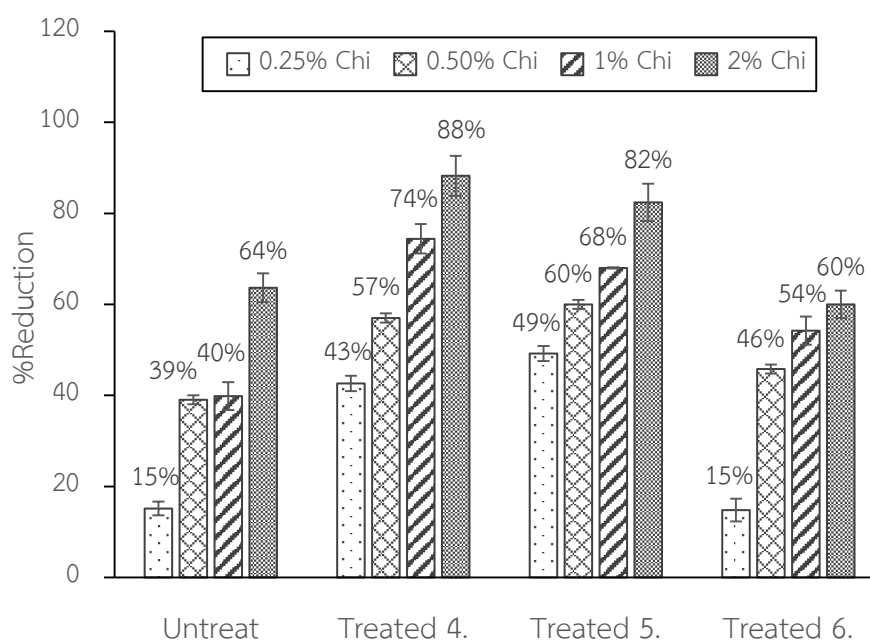
elongation at break จะมีค่าลดลง ที่เป็นเช่นนี้เป็นผลมาจากการเสริมแรงของไคโตซานบนพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ เพราะว่าไคโตซานนั้นมีโครงสร้างที่เป็นแบบ cellulosic-like structure จึงมีค่ามอดูลัส (modulus) ที่สูง



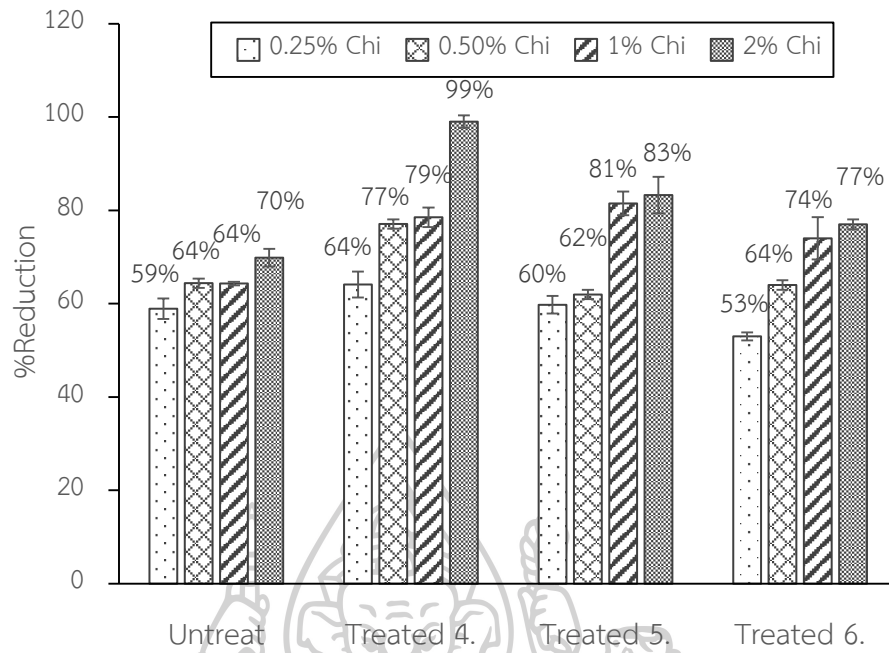
ภาพที่ 2.28 สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยโคโรนา รวมไปถึงฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่ถูกเคลือบผิวด้วยสารละลายไคโตซานที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยที่ความแตกต่างทางนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ได้ดำเนินการตามการทดสอบ Duncan's test

จากภาพที่ 2.29 และภาพที่ 2.30 แสดงฤทธิ์ในการต่อต้านแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบผิวด้วยไคโตซานความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยแบคทีเรีย 2 ชนิดคือ *S.aureus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก และ *E.coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ โดยใช้วิธี shake-flask พบว่าการเคลือบผิวด้วยไคโตซานจะมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ทั้งสองชนิด ซึ่งเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายไคโตซานที่เคลือบผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโครานาที่มีการเคลือบผิวด้วยไคโตซานความเข้มข้นต่างๆ พบว่าการใช้กระแสไฟฟ้า 4 แอมแปร์ มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรีย (%Reduction) ทั้ง *S.aureus* และ *E.coli* ส่วนที่กระแสไฟฟ้า 5 และ 6 แอมแปร์ จะมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ (%Reduction) ทั้งสองชนิดลดลง ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากมีปริมาณไคโตซานบนผิวที่น้อยกว่า อีกทั้งยังมีพื้นผิวที่มีความขรุขระมาก ทำให้มีการเกาะติดและสะสมของเชื้อแบคทีเรียได้ดีกว่าฟิล์มที่มีพื้นผิวราบเรียบ เพราะว่าพื้นผิวที่มีความขรุขระมากจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ส่งผลทำให้มีบริเวณสำหรับการเกิด colonization ของแบคทีเรียได้ดี เชื้อแบคทีเรียจึงเจริญเติบโตได้ดี

นอกจากนี้ยังพบอีกว่าฤทธิ์ในการต่อต้านแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบผิวด้วยสารละลายไคโตซานต่อแบคทีเรียชนิด *E.coli* มีค่าที่มากกว่า *S.aureus* ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากไคโตซานมีฤทธิ์ในการต่อต้านแบคทีเรียชนิดแกรมบวกได้น้อยกว่าแบคทีเรียชนิดแกรมลบ



ภาพที่ 2.29 เปอร์เซนต์การลดลงของแบคทีเรีย (%Reduction) ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่เคลือบผิวด้วยสารละลายไคโตซานที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *S.aureus*



ภาพที่ 2.30 เปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรีย (%Reduction) ของฟิล์มพอลิเมอร์เบสชนิดที่เคลือบผิวด้วยสารละลายไคโตซานที่ความเข้มข้นต่างๆ ต่อแบคทีเรียชนิด *E.coli*



บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ชื่อทางการค้า BioPBS เกรด FZ91PM ผลิตโดยบริษัท PTT MCC Biochem Company Limited ประเทศไทย มีลักษณะเป็นเม็ดทรงรีและแบน สีขาวขุ่น มีค่าดัชนีการไหล 5 กรัม/10 นาที (ที่อุณหภูมิ 190 °C น้ำหนัก 2.16 กิโลกรัม)

3.1.2 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT) ชื่อทางการค้า Ecoflex® เกรด F Mulch C1201 ผลิตโดยบริษัท BASF ประเทศเยอรมัน มีลักษณะเป็นเม็ดกลม สีขาวขุ่นเหลือบเหลือง มีค่าดัชนีการไหล 9-10 กรัม/10 นาที (ที่อุณหภูมิ 190 °C น้ำหนัก 2.16 กิโลกรัม)

3.1.3 ไดคิวมิล เปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) ความบริสุทธิ์ 98 % จากบริษัท Sigma-Aldrich จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา มีลักษณะเป็นเกล็ด สีใส และนำมาใช้งานโดยผ่านการไล่ความชื้นออกก่อน

3.1.4 เปอร์กาด็อกซ์ ชื่อทางเคมี Di(tert-butylperoxyisopropyl)benzene ชื่อทางการค้า Perkadox® 14S ผลิตโดยบริษัท Akzonobel ประเทศไทย ประกอบด้วยเปอร์ออกไซด์อยู่ 40 % ส่วนที่เหลือคือแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกา มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว

3.1.5 ไคโตซานชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (low molecular weight chitosan) เกรด 448869 จากบริษัท Sigma-Aldrich จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา น้ำหนักโมเลกุล 50,000 – 190,000 ดัชนีมีการกำจัดหมู่แอซิติล (Degree of deacetylation) ประมาณ 75-85 % มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลืองอ่อน

3.1.6 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) เกรด 96479 จากบริษัท Sigma-Aldrich จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา ความบริสุทธิ์ 99 % มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว

3.1.7 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol , PVA) เกรด BF17W จากบริษัท Ajax Technologies จำกัด ประเทศออสเตรเลีย มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวใส

3.1.8 กรดอะซิติก (Acetic acid) จากบริษัท RCI Labscan จำกัด ประเทศไทย มีความเข้มข้น 99.7 wt% ความหนาแน่น 1.05 g/cm³

3.1.9 น้ำกลั่น (Distilled water)

3.1.10 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

3.1.11 โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เกรด AR1166 จากบริษัท RCI Labscan จำกัด ประเทศไทย ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์

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

3.1.13 เชื้อแบคทีเรียชนิด *Escherichia coli* (*E. coli*) และ *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ดำเนินการวิจัย

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

3.2.2 เครื่องหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์ม (Cast film extruder) รุ่น LE 25-30/C บริษัท Labtech Engineering จำกัด ประเทศไทย

3.2.3 เครื่องระเบิดผิวพลาสติกด้วยประจุไฟฟ้าโคโรนา (Corona treatment) บริษัท Labtech Engineering จำกัด ประเทศไทย

3.2.4 เครื่องทดสอบสมบัติของวัสดุแบบทั่วไป (Universal Testing Machine) ชื่อทางการค้า Instron โมเดล 5969 บริษัท Instron Engineering Corporation จากประเทศสหรัฐอเมริกา

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

3.2.6 เครื่องวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer, TGA) รุ่น TGA/DSC1 บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

3.2.7 เครื่องทดสอบสมบัติการกันผ่านของออกซิเจน (Oxygen Permeability Tester) รุ่น GDP-C-Gas Permeability Tester บริษัท Brugger feinmechanik จำกัด ประเทศเยอรมัน

3.2.8 เครื่องวัดมุมสัมผัสผิวน้ำ (Water Contact Angle Tester) รุ่น Kruss model DSA10 บริษัท KRÜSS GmbH จำกัด ประเทศเยอรมัน

3.2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น Tabletop Microscope TM3030 บริษัท Hitachi High-Technologies จำกัด ประเทศญี่ปุ่น

3.2.10 เครื่องวิเคราะห์ผิววัสดุด้วยรังสีเอกซ์เรย์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) รุ่น AXIS Ultra DLD บริษัท Kratos Analytical จำกัด ประเทศเยอรมัน

3.2.11 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) จากบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT โดยปรับเปลี่ยนปริมาณการเติม PBAT เป็น 3, 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยจะแบ่งออกเป็น 2 แนวทาง คือแนวทางที่ไม่เติมและเติม DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ในอัตราส่วนคงที่ที่ 0.001 phr แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงชื่อย่อและสัดส่วนการผสมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

Sample	PBS (wt%)	PBAT (wt%)	DCP (phr)
Neat PBS	100	-	-
97/3	97	3	-
95/5	95	5	-
93/7	93	7	-
PBS/DCP	100	-	0.001
97/3/DCP	97	3	0.001
95/5/DCP	95	5	0.001
93/7/DCP	93	7	0.001

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมและเติม DCP เริ่มจากนำเม็ดพลาสติก PBS และ PBAT ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และนำ DCP ไปวางไว้ใน desiccator ที่มีซิลิกาเจล เพื่อเป็นการกำจัดความชื้น สำหรับแนวทางที่ไม่เติม DCP จะทำการผสมเม็ดพลาสติก PBS และ PBAT ในถุงซิปลและเขย่า แต่สำหรับแนวทางที่มีการเติม DCP จะทำการผสมด้วยวิธีทางกายภาพ โดยการนำ DCP ปริมาณ 0.001 phr มาละลายในอะซิโตน จากนั้นนำเม็ดพลาสติก PBAT มาคลุกผสมกับสารละลาย DCP ที่เตรียมไว้ หลังจากนั้นนำมาคลุกผสมกับ PBS เพื่อช่วยให้ DCP เกิดการกระจายตัวได้ดี ทำการหลอมเหลวส่วนผสมทั้งหมดโดยกระบวนการหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์ม (Cast film extrusion) โดยตั้งค่าอุณหภูมิตั้งแต่ hopper ถึง die ดังนี้ 150 160 170 180 190 190 องศาเซลเซียส และใช้แรงดันหัวดายคงที่ ความเร็วรอบในการหมุนของสกรูเป็น 40 รอบต่อนาที โดยปรับแรงดึงยืดฟิล์มที่ทำให้ได้ฟิล์มมีความหนาอยู่ในช่วง 100 – 150 ไมครอน ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ขึ้นรูปได้จะถูกนำไปศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะสัณฐานวิทยาต่อไป

3.3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox

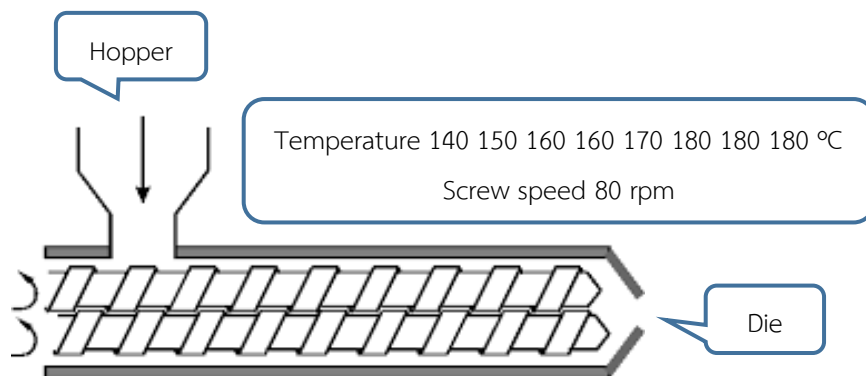
การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT โดยปรับเปลี่ยนปริมาณการเติม PBAT เป็น 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยจะแบ่งออกเป็น 2 แนวทาง คือแนวทางที่ไม่เติมและเติม Perkadox เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ในอัตราส่วนคงที่ที่ 0.001 phr แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงชื่อย่อและสัดส่วนการผสมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

Sample	PBS (wt%)	PBAT (wt%)	Perkadox (phr)
Neat PBS	100	-	-
95/5	95	5	-
90/10	90	10	-
85/15	85	15	-
80/20	80	20	-
PBS/Perkadox	100	-	0.001
95/5/Perkadox	95	5	0.001
90/10/Perkadox	90	10	0.001
85/15/Perkadox	85	15	0.001
80/20/Perkadox	80	20	0.001

ขั้นตอนก่อนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสม คือ นำเม็ดพลาสติก PBS และ PBAT ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อเป็นการกำจัดความชื้น หลังจากนั้นทำการผสมเม็ดพลาสติก PBS และ PBAT ในถุงซิปลและเขย่า สำหรับแนวทางที่มีการเติม Perkadox จะทำการผสมในถังพลาสติก จากนั้นปิดฝาและเขย่าส่วนผสมทั้งหมดตามสัดส่วนที่แสดงไว้ดังตารางที่ 3.2 ทำการหลอมเหลวส่วนผสมทั้งหมดด้วยเครื่องหลอมอัดรีดพลาสติกแบบสกรูคู่ (Co-rotating twin screw extruder) โดยตั้งค่าอุณหภูมิหลอมเหลวภายในกระบอกล้อมตั้งแต่ hopper ถึง die ดังนี้ 140 150 160 160 170 180 180 180 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วรอบของสกรู 80 รอบต่อนาที เมื่อพอลิเมอร์ผสมถูกหลอมเหลวจะถูกอัดรีดออกมาผ่านทางหัวขึ้นรูป (die) อยู่ในลักษณะเป็นเส้น extrudate จากนั้นเส้น extrudate จะถูกหล่อเย็นด้วยน้ำ เพื่อเป็นการระบายความร้อนออกและให้เส้นคงรูปนำไปตัดเม็ดด้วยเครื่อง Pelletizer จากนั้น หลังจากนั้นเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ได้จากการตัดเม็ดจะถูก

นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผสม



ภาพที่ 3.1 แสดงภาพจำลองและสภาวะที่ใช้ในการหลอมผสมด้วยเครื่อง twin screw extruder [39]

3.3.3 การขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยกระบวนการหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์ม (Cast film extrusion)

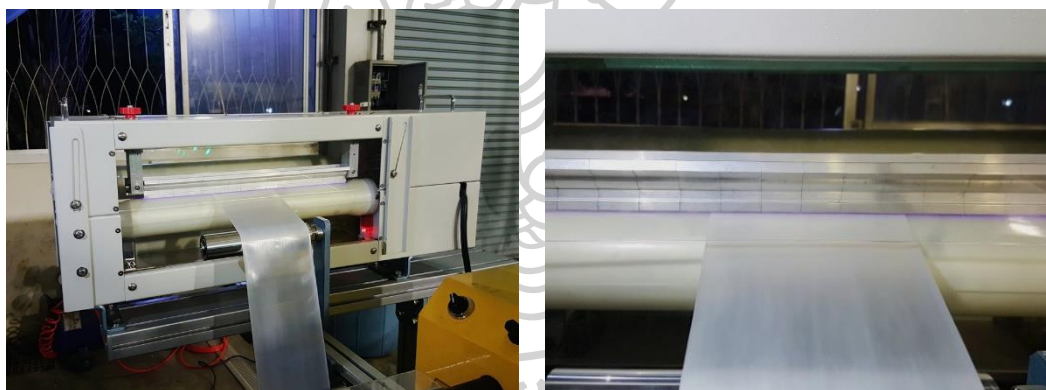
พอลิเมอร์ผสมสีต่างๆ ที่ผ่านการอบไล่ความชื้นภายหลังกระบวนการหลอมผสมด้วยกระบวนการ twin screw extrusion ไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบางโดยใช้กระบวนการหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์ม (Cast film extrusion) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ hopper ถึง die ดังนี้ 150 160 170 180 190 องศาเซลเซียส และใช้แรงดันหัวตายคงที่ ความเร็วรอบในการหมุนสกรูเป็น 60 รอบต่อนาที โดยปรับแรงดึงยืดฟิล์มที่ทำให้ได้ฟิล์มมีความหนาอยู่ในช่วง 80 - 120 ไมโครเมตร



ภาพที่ 3.2 เครื่องหลอมอัดรีดแผ่นฟิล์มที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสีต่างๆ [40]

3.3.4 การปรับปรุงสภาพพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยโคโรนา (Corona treatment)

โดยส่วนใหญ่ฟิล์มพลาสติกจะไม่มีขั้วหรือไม่ชอบน้ำ แรงดึงผิวต่ำ และมีความสามารถในการเปียกผิวไม่ดี ซึ่งเป็นปัญหาสำหรับกระบวนการเคลือบผิว ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงสภาพพื้นผิวเพื่อให้มีการยึดเกาะที่ดีขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการปรับปรุงสภาพพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยโคโรนา หลังจากแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ cast film จะนำไปผ่านเข้าเครื่องระเบิดผิวพลาสติกด้วยประจุไฟฟ้าโคโรนา ดังแสดงในภาพที่ 3.3 โดยดำเนินการภายใต้อุณหภูมิแวดล้อม ทำการกำหนดระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งและอิเล็กโทรด รวมถึงอัตราการดึงฟิล์มพอลิเมอร์ผสมให้มีค่าคงที่ สำหรับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับปรุงสภาพพื้นผิวจะมีการปรับเปลี่ยน 3 ค่า คือ 3, 4 และ 5 แอมแปร์ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการนำไปใช้เคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรียต่อไป หลังจากฟิล์มพอลิเมอร์ผสมผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวจะถูกม้วนเก็บใส่ถุงซิปล็อค และนำไปเก็บในกล่องสุญญากาศที่มีซิลิกาเจลอยู่ภายใน เพื่อป้องกันความชื้นที่อาจจะส่งผลต่อสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม



ภาพที่ 3.3 เครื่องระเบิดผิวพลาสติกด้วยประจุไฟฟ้าโคโรนา (Corona treatment)

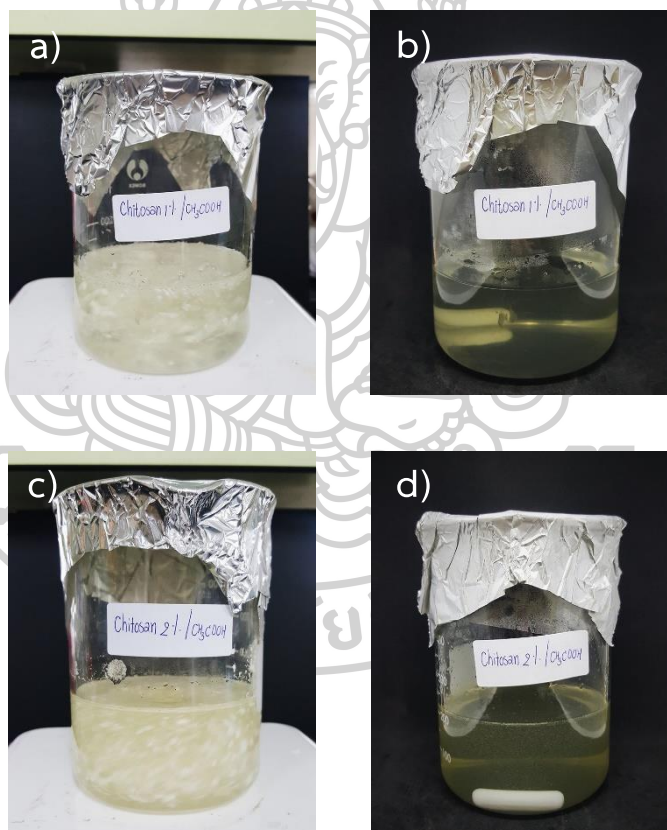
3.3.5 การเตรียมสารต้านทานแบคทีเรียสำหรับเคลือบผิวฟิล์มพอลิเมอร์

3.3.5.1 การเตรียมสารละลายโคโตซาน

ขั้นตอนในการเตรียมสารละลายโคโตซาน เริ่มต้นจากการเตรียมสารละลายกรดอะซิติกให้มีความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยกรดอะซิติกที่ใช้ในงานวิจัยมีความเข้มข้น 99.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการปิเปตกรดอะซิติกปริมาตร 9.6 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 1000 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรโดยเติมน้ำปราศจากไอออน

(deionized water) จนถึงขีดวัดปริมาตร ทำการเขย่าเพื่อให้มีความเข้มข้นสม่ำเสมอ จะได้สารละลายกรดอะซิติกเท่ากับ 1000 มิลลิลิตร

สำหรับการเตรียมสารละลายไคโตซานความเข้มข้น 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยจะเตรียมสารละลายไคโตซานปริมาตร 200 มิลลิลิตร ทำได้โดยนำไคโตซานไปชั่งน้ำหนักปริมาณ 2 และ 4 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปรับปริมาตรด้วยสารละลายกรดอะซิติก 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งได้จากการเตรียมไว้ข้างต้นจนมีปริมาตร 200 มิลลิลิตร นำไปกวนด้วย magnetic stirring bar ที่อุณหภูมิห้อง ทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ไคโตซานจะละลายจนหมด รอจนฟองอากาศหายไป จะได้สารละลายไคโตซานสำหรับนำไปเคลือบฟิล์มพอลิเมอร์ผสมต่อไป



ภาพที่ 3.4 สารละลายไคโตซานความเข้มข้น a) 1% w/v ก่อนละลาย b) 1 % w/v หลังละลาย
c) 2 % w/v ก่อนละลาย d) 2 % w/v หลังละลาย

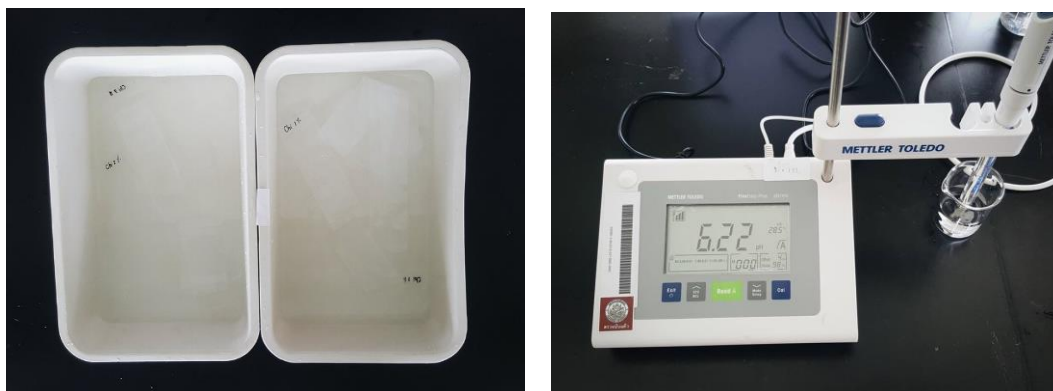
3.3.5.2 การเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคซิงค์ออกไซด์

การเตรียมตัวกลางสำหรับสารแขวนลอยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ ทำได้โดยนำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ละลายในน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 90 องศาเซลเซียส จนกระทั่ง PVA ละลายจนหมด จะได้สารละลายใสไม่มีสีและมีลักษณะเป็นของเหลวหนืด หลังจากนั้นทำการวัดความหนืดของสารละลาย PVA ด้วยเครื่อง Viscometer โดยจะควบคุมความหนืดของสารละลายให้ใกล้เคียงกับความหนืดของสารละลายไคโตซาน หากความหนืดที่วัดได้ยังไม่ใกล้เคียง จะทำการปรับความหนืดโดยการเติม PVA เพิ่มทีละน้อย และทำการวัดค่าความหนืดใหม่อีกครั้ง

สำหรับการเตรียมสารแขวนลอยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทำได้โดยเตรียมสารละลาย PVA ที่เตรียมไว้ข้างต้นปริมาณ 100 มิลลิลิตร ทำการชั่งอนุภาคซิงค์ออกไซด์ 1 และ 2 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร นำไปกวนด้วย magnetic stirring bar ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง จะได้สารแขวนลอยของอนุภาคซิงค์ออกไซด์สำหรับนำไปเคลือบฟิล์มพอลิเมอร์ผสมต่อไป

3.3.6 การเคลือบฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยสารละลายไคโตซานหรือสารแขวนลอยอนุภาคซิงค์ออกไซด์

นำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนามาทำการเคลือบด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย 2 ชนิด แตกต่างกัน คือ สารละลายไคโตซานหรือสารแขวนลอยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ได้เตรียมไว้ข้างต้น โดยตัดฟิล์มพอลิเมอร์ผสมให้มีความกว้าง 7 เซนติเมตร จากนั้นนำมายึดติดด้วยเทปกาว ทำการปาดเคลือบผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยวิธี Doctor blade coating โดยควบคุมความหนาของสารต้านทานแบคทีเรียที่เคลือบให้มีขนาด 50 ไมโครเมตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้สารต้านทานแบคทีเรียแห้งสนิท สำหรับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ทำการเคลือบด้วยสารละลายไคโตซานจำเป็นต้องนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น เพื่อเป็นการกำจัดกรดอะซิติกออกไป โดยนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแช่ในน้ำกลั่นและล้างจนกว่าจะมี pH เป็นกลาง ซึ่งอยู่ในช่วง pH ประมาณ 6-7 ด้วยเครื่อง pH meter แสดงดังภาพที่ 3.5 ในส่วนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบด้วยสารแขวนลอยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ไม่ต้องทำการล้าง เนื่องจากตัวกลางที่ใช้มีสภาพเป็นกลางและอาจทำให้สารที่เคลือบหลุดออก ดังนั้นจะได้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนาและเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย เพื่อนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์และทดสอบสมบัติต่าง ๆ ต่อไป



ภาพที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการล้างฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบด้วยสารละลายโคโตะซาน และการวัดค่า pH ด้วยเครื่อง pH meter

3.3.7 ขั้นตอนการทดสอบและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

3.3.7.1 การศึกษาสมบัติเชิงกล

การศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง Universal testing machine ชื่อทางการค้า Instron โมเดล 5960 บริษัท Instron Engineering จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา ทำการทดสอบความต้านทานต่อการดึงยึด (tensile testing) โดยดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D882 เริ่มจากการตัดฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในแนวขนานกับเครื่อง (machine direction, MD) เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 1 x 6 ตารางนิ้ว วัดความหนาของแผ่นฟิล์ม 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย ก่อนการทดสอบแผ่นฟิล์มจะถูกควบคุมสภาวะโดยการนำกล่องเก็บแผ่นฟิล์มไปไว้ในห้องทดสอบข้ามคืน ทำการทดสอบโดยตั้งระยะห่างระหว่าง grip เท่ากับ 4 นิ้ว ใช้อัตราการดึง 12.5 มิลลิเมตร/นาที และแรงที่ใช้ในการดึง 5 กิโลนิวตัน ชิ้นงานฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วนต่างๆ จะถูกนำไปทดสอบอย่างน้อยสัดส่วนละ 10 ชิ้น ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Young's modulus, Tensile strength และ %Elongation at break จากนั้นค่าที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดจำนวนอย่างน้อย 5 ชิ้นงานจะถูกรายงานไว้ในงานวิจัยนี้

สำหรับการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D1938 โดยตัดฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 1 x 3 ตารางนิ้ว จากนั้นตัดแผ่นฟิล์มให้มีความลึกเข้าไป 2 นิ้ว ตัวอย่างชิ้นงานจะคล้ายกับรูปซากางง จากนั้นวัดความหนาของส่วนที่เหลือ 1 นิ้ว จำนวน 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย ทำการทดสอบโดยใช้อัตราการดึง 250 มิลลิเมตร/นาที และแรงที่ใช้ในการดึง 5 กิโลนิวตัน ชิ้นงานฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วนต่าง ๆ จะถูกนำไปทดสอบอย่างน้อยสัดส่วนละ 10 ชิ้น ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Tear strength จากนั้นค่าที่ใกล้เคียงกันมากที่สุดอย่างน้อยจำนวน 5 ชิ้นงานจะถูกรายงานไว้ในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 3.6 เครื่อง Universal testing machine [41]

3.3.7.2 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) รุ่น Tabletop Microscopy TM3030 บริษัท Hitachi High-Technologies จำกัด สำหรับการศึกษภาคตัดขวาง (cross section) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ชิ้นงานฟิล์มตัวอย่างจะถูกนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลว และทำให้ชิ้นงานแตกหักอย่างรวดเร็ว และสำหรับการศึกษาลักษณะของพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสมก่อนและหลังทำการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนาจะทำการตัดฟิล์มพอลิเมอร์ผสมให้มีขนาด 0.5×0.5 ตารางเซนติเมตร จากนั้นผิวหน้าหรือรอยแตกหักของชิ้นงานจะถูกนำไปเคลือบด้วย แพลทตินัม-ทอง โดยใช้กระบวนการ Sputtering เพื่อป้องกันการสะสมประจุขณะทำการทดสอบ สำหรับค่าความเร่งศักย์ไฟฟ้า (acceleration voltage) ที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 15 กิโลโวลต์



ภาพที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) [42]

3.3.7.3 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยใช้เทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) รุ่น DSC1 บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ ทำการศึกษาภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน โดยบรรจุตัวอย่างที่ใช้ทดสอบประมาณ 5 - 10 มิลลิกรัม ใน Alumina pan และทำการศึกษาในโหมดอุณหภูมิไม่คงที่ (temperature scan) โดยการให้ความร้อน-เย็นตัว-ให้ความร้อน ในช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 150 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 °C ต่อนาที สำหรับการให้ความร้อนในขั้นตอนแรกทำเพื่อกำจัดประวัติทางความร้อน (thermal history) ที่เกิดจากกระบวนการขึ้นรูป ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และความเป็นผลึก จะได้จากกราฟ DSC ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง สำหรับการคำนวณเปอร์เซ็นต์ผลึก ($\%X_c$) ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองจะถูกคำนวณโดยใช้สมการด้านล่างนี้

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times \frac{100}{w_f} \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

โดยที่ ΔH_m คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวตัวอย่าง (จูล/กรัม), w_f คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ PBS, ΔH_m^0 คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวผลึกตัวอย่าง PBS 100 เปอร์เซ็นต์ (110.3 จูล/กรัม) [43]



ภาพที่ 3.8 เครื่องมือทดสอบสมบัติทางความร้อน Differential scanning calorimeter (DSC)

3.3.7.4 การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) รุ่น TGA/DSC1 บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ทำการศึกษาภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน โดยบรรจุตัวอย่างที่ใช้ทดสอบประมาณ 5 - 10 มิลลิกรัม ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 600 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 °C ต่อนาที พารามิเตอร์ที่แสดงข้อมูลพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ได้แก่ อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการสลายตัวทางความร้อน (onset degradation temperature, T_{onset}) และอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนสูงสุด (degradation temperature, T_d) จะถูกรายงานไว้ในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 3.9 เครื่องมือทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน Thermogravimetric Analyzer (TGA)

3.3.7.5 การศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR)

การศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม จะดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM E96/E96M-10 โดยใช้วิธี Desiccant ขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างทดสอบทำได้โดยเริ่มจากนำซิลิกาเจล (silica gel) ไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเป็นการกำจัดความชื้น ตัดฟิล์มพอลิเมอร์ผสมให้มีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางรอบนอก (outside diameter) ของปากขวดทดสอบ ซึ่งในการทดลองนี้มีขนาดเท่ากับ 3 เซนติเมตร จากนั้นนำซิลิกาเจลที่อบแล้วมาบรรจุในขวดทดสอบประมาณ 4/5 ของขวด หรือประมาณ 20 กรัม (ระดับความสูงของซิลิกาเจลที่บรรจุมีความสำคัญอย่างยิ่ง หากระดับที่บรรจุต่ำเกินไปจะทำให้ดูดความชื้นได้ไม่ดี และหากฟิล์มตัวอย่างมีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมากจะทำให้ซิลิกาเจลไม่สามารถดูดความชื้นต่อไปได้อีก ดังนั้นค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่ได้มีความคลาดเคลื่อน) นำ vacuum grease มาทาปากขวดทดสอบแล้วนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ตัดได้มาปิดปากขวดให้แนบสนิท จากนั้นพันรอบปากขวดด้วย paraffin film ทำการชั่งน้ำหนักเริ่มต้น (initial weight, W_0) ลำดับต่อไปให้นำขวดทดสอบมาวางไว้ใน desiccator ซึ่งภายในอ้อมตัวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH) เท่ากับ $75 \pm 5\%$ RH ที่อุณหภูมิห้อง นำขวดทดสอบไปชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นทีเวลาแตกต่างกัน (W_i) เป็นเวลา 30 วัน เพื่อให้น้ำหนักคงที่

การหาค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ทำได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปต่อพื้นที่แลกเปลี่ยนของไอน้ำ (Q/A) กับเวลา (t) ความชันที่ได้จากกราฟ คือค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) และจะถูก normalized เพื่อลดปัจจัยของค่า WVTR ที่เป็นผลมาจากความหนาของฟิล์มที่แตกต่างกัน สามารถคำนวณได้จากสมการนี้

$$WVTR_{\text{raw}} \text{ (g/m}^2 \cdot \text{day)} = \frac{Q}{At} = \frac{W_i - W_0}{At_i} \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

$$WVTR_{\text{normalised}} \text{ (g} \cdot \text{mil/m}^2 \cdot \text{day)} = WVTR_{\text{raw}} \times l \times \frac{1 \text{ mil}}{25 \mu\text{m}} \quad \text{สมการที่ 3.3}$$

ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแต่ละสัดส่วนจะทำซ้ำจำนวน 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองจะถูกรายงานไว้ในงานวิจัยนี้

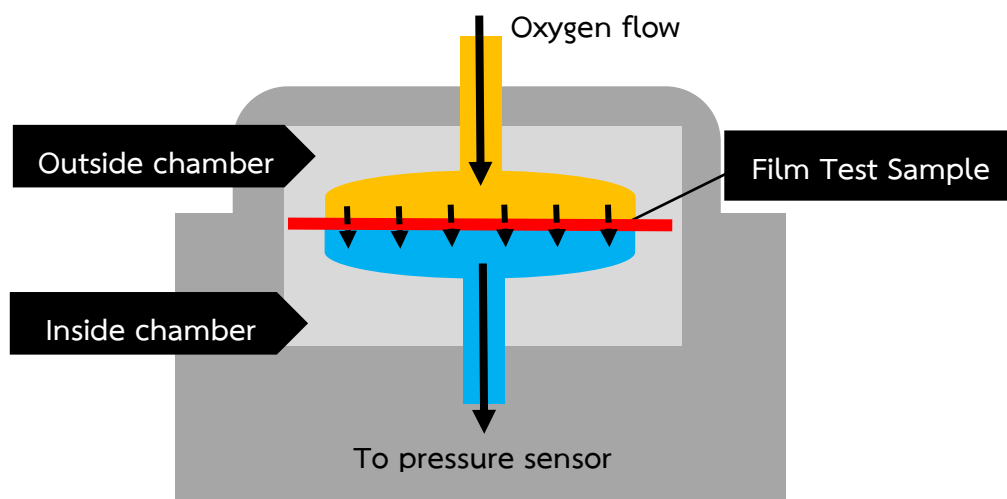


ภาพที่ 3.10 फिल्मพอลิเมอร์ผสมที่ติดบนปากขวดทดสอบ (ภาพซ้าย)
และนำขวดทดสอบไปวางไว้ใน Desiccator ภายใต้สภาวะที่ทดสอบ (ภาพขวา)

3.3.7.6 การศึกษาอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Oxygen transmission rate, OTR)

การศึกษาอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน จะถูกทดสอบโดยใช้เครื่อง GDP-C-Gas Permeability Tester บริษัท Brugger feinmechanik จำกัด ประเทศเยอรมัน ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D3985 สำหรับวิธีการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเริ่มจากการเลือกบริเวณของแผ่นฟิล์มทดสอบที่ไม่มีจุดบกพร่อง เช่น ริ้วรอย รอยพับและรูขนาดเล็ก (pinholes) เป็นต้น จากนั้นตัดฟิล์มทดสอบให้เป็นสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 1.5×1.5 นิ้ว วัดความหนาของฟิล์มทดสอบจำนวน 5 จุด เพื่อหาค่าเฉลี่ยความหนาของแผ่นฟิล์มทดสอบแต่ละแผ่น นำแผ่นฟิล์มไปติดบนแผ่นอะลูมิเนียมสำหรับการทดสอบ โดยภายในแผ่นอะลูมิเนียมจะวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ดังนั้นพื้นที่ในการผ่านของแก๊สออกซิเจนจะเท่ากับ 5.064 cm^2 ในส่วนของเครื่องทดสอบจะถูกควบคุมให้มีสภาวะความชื้นสัมพัทธ์น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ $23 \text{ }^\circ\text{C}$ นำแผ่นฟิล์มทดสอบที่ติดอะลูมิเนียมแล้วมาวาง โดยจะใช้ high vacuum grease ทาบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นฟิล์มอะลูมิเนียมกับเครื่องทดสอบ เพื่อให้แนบสนิท โดยใช้โหมต Evacuation A ซึ่งเป็นการทำให้เป็นสุญญากาศทั้งบนและล่าง เป็นเวลา 7.30 ชั่วโมง ตั้งอัตราการไหลของอากาศเป็น 100 cc/min เมื่อเวลาผ่านไปจนครบกำหนด เครื่องจะเริ่มทดสอบ ซึ่งการทดสอบจะอาศัยหลักการวัดความแตกต่างของความดันของแก๊สออกซิเจน โดยโมเลกุลของแก๊สออกซิเจนจะผ่านจาก outside chamber ไปยัง inner chamber สู้เซนเซอร์วัดความดัน และจะหยุดทดสอบเมื่ออัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนเข้าสู่ค่าคงที่ เครื่องคอมพิวเตอร์จะรายงานผลค่าอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน ในหน่วย $\text{cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{bar}$ นอกจากนี้ความหนาของแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ทดสอบจะส่งผลต่อค่าอัตราการ

ซึมผ่าน ดังนั้นจะถูก normalized เพื่อลดปัจจัยที่เป็นผลมาจากความหนา ดังนั้นงานวิจัยนี้จะรายงานค่า OP ในหน่วย $\text{cm}^3\text{mil}/\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{bar}$



ภาพที่ 3.11 แสดงภาพจำลองหลักการทำงานของเครื่องทดสอบการซึมผ่านของแก๊ส [44]



ภาพที่ 3.12 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน
ของบริษัท Bruker feinmechanik จำกัด ประเทศเยอรมัน

3.3.7.7 การศึกษาค่ามุมสัมผัสน้ำ (Water contact angle)

การศึกษาค่ามุมสัมผัสน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม จะถูกดำเนินการทดสอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง ด้วยเครื่อง Contact Angle Tester รุ่น Kruss model DSA10 ของบริษัท KRÜSS GmbH จำกัด ประเทศเยอรมัน โดยตัดตัวอย่างฟิล์มพอลิเมอร์ผสมขนาด 1×3 นิ้ว ซึ่งปริมาณน้ำ 1 หยดจะใช้ปริมาตรประมาณ 10 ไมโครลิตร ทำการวัดค่ามุมสัมผัสน้ำจำนวน 3 ครั้ง ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบจะถูกรายงานไว้ในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 3.13 เครื่องทดสอบค่ามุมสัมผัสน้ำ (Water contact angle tester) [45]

3.3.7.8 การศึกษาองค์ประกอบเคมีที่พื้นผิว

การศึกษาค่าองค์ประกอบเคมีที่พื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา โดยใช้สเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) รุ่น AXIS Ultra DLD บริษัท Kratos Analytical จำกัด ประเทศเยอรมัน โดยแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์เป็นแบบ Mono anode (Al K α source) ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ 0.25 วินาที และใช้กำลังไฟฟ้าที่ 150 วัตต์ พื้นที่บริเวณที่รังสีเอกซ์ตกกระทบ คือ 700 ไมโครเมตร x 300 ไมโครเมตร สำหรับวิธีการเตรียมชิ้นงานจะทำการตัดฟิล์มพอลิเมอร์ผสมให้มีขนาด 1×1 ตารางเซนติเมตร หรือเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 1 เซนติเมตร โดยชิ้นงานที่ทดสอบต้องแห้งสนิทและต้องไม่ให้ผิวหน้าสัมผัสกับวัสดุใด ๆ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนบนพื้นผิวฟิล์มที่จะทดสอบ ทำการห่อชิ้นงานที่เตรียมไว้ด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ จากนั้นนำไปใส่ถุงซิปล็อคและเก็บไว้ในกล่องที่มีซิลิกาเจลเพื่อรอการทดสอบต่อไป



ภาพที่ 3.14 เครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์
(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) [46]

3.3.7.9 การศึกษาสมบัติการต้านทานแบคทีเรีย (Antibacterial activity)

การศึกษาสมบัติการต้านทานแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านและไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย ได้แก่ สารแขวนลอยของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ และสารละลายไคโตซาน โดยใช้การทดสอบด้วยวิธี Dynamic shake flask จะดำเนินการทดสอบกับแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ *Escherichia Coli* (*E.coli*) ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ และ *Staphylococcus Aureus* (*S.aureus*) ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก โดยมีวิธีการทดสอบดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนการเตรียมอาหารและสารละลายเจือจางสำหรับเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย

การเตรียม Nutrient Agar (NA) ทำได้โดยการชั่ง NA ปริมาณ 16.8 กรัม ใส่ลงในปีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 600 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนจนอาหารละลายหมด นำมาแบ่งใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร จำนวน 2 ขวด ขวดละ 300 มิลลิลิตร ปิดปากขวดด้วยสำลีและอะลูมิเนียมฟอยล์ นำไป sterilize ด้วยหม้อนึ่งอัดไอน้ำ (autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที รอให้อุณหภูมิลดลงเหลือประมาณ 50 – 60 องศาเซลเซียส เพื่อให้สามารถจับขวดได้ จากนั้นนำปากขวดลงไฟในตะเกียงแอลกอฮอล์ ทำการเทใส่จานเพาะเชื้อพลาสติกที่ผ่านการฆ่าเชื้อ จานละประมาณ 10 มิลลิลิตร หมุน (swirl) จานเบาๆ เพื่อให้อาหารกระจายจนทั่ว รอจนอาหารในจานแข็งตัว ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 30 นาที คว่ำจานเพาะเชื้อลงในถุงร้อน และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อรอใช้งานในลำดับถัดไป



ภาพที่ 3.15 การเตรียม Nutreint Agar สำหรับเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย

การเตรียม Nutrient Broth (NB) ทำได้โดยการชั่ง NB ปริมาณ 13 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ใช้แท่งแก้วคนจนอาหารละลายหมด ทำการแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะนำมาแบ่งใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 6 ขวด (ตามจำนวนตัวอย่างในการทดลอง) ขวดละ 50 มิลลิลิตร ปิดปากขวดด้วยสำลีและอะลูมิเนียมฟอยล์ และส่วนที่สองนำมาแบ่งใส่หลอดทดลอง โดยการปิเปต NB ปริมาตรหลอดละ 5 มิลลิลิตร จำนวน 10 หลอด ปิดปากหลอดด้วยฝาพลาสติกและปิดทับด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ นำไป sterilize ด้วยเครื่อง autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที รอให้เย็นและเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิห้องสำหรับขวดรูปชมพู่ ส่วนหลอดทดลองเก็บไว้ในตู้เย็นเพื่อรอใช้งานในลำดับถัดไป



ภาพที่ 3.16 การเตรียม Nutreint Broth สำหรับเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย

การเตรียมสารละลายเจือจางโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.85 เปอร์เซ็นต์ ทำได้โดยชั่ง NaCl ความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ 8.59 กรัม ในน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร ใช้

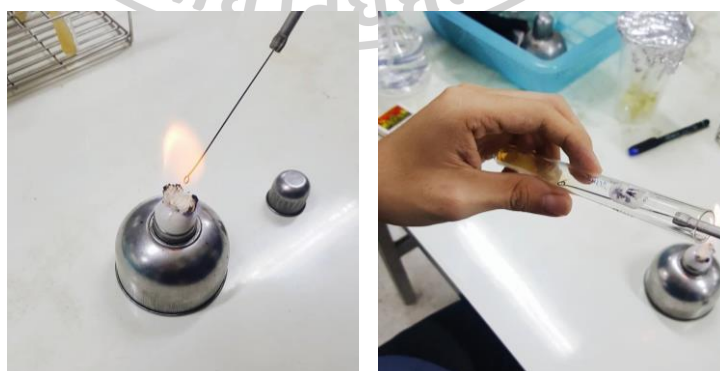
แห้งแก้วคนจนละลาย ทำการปิเปตใส่หลอดทดลอง ปริมาตรหลอดละ 4.5 มิลลิลิตร ซึ่งใน 1 ตัวอย่าง จะใช้สารละลายเชื้อจากจำนวน 9 หลอด ปิดฝาหลอดทดลองและปิดทับด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ นำไป sterilize ด้วยเครื่อง autoclave ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที รอให้เย็นและ เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อรอใช้งานในลำดับถัดไป



ภาพที่ 3.17 การเตรียมสารละลายเชื้อจากโซเดียมคลอไรด์

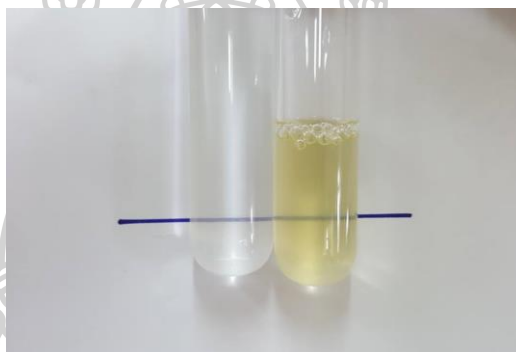
- ขั้นตอนการเตรียมเชื้อแบคทีเรีย

นำหลอดทดลองที่เตรียม NB ไว้ข้างต้น มาทำการ transfer เชื้อแบคทีเรียจาก stock เชื้อแบคทีเรีย โดยนำห่วงถ่ายเชื้อ (inoculation loop) มาลนไฟในตะเกียงแอลกอฮอล์ให้ร้อนแดง และต้องลนปากหลอดทดลองทุกครั้งที่เปิดและปิดฝา นำห่วงถ่ายเชื้อแต่ละบริเวณอาหารใน stock เชื้อแบคทีเรียก่อนเพื่อให้ห่วงเย็นลง ลากเชื้อแบคทีเรียจำนวน 1 ห่วง นำไปใส่ใน NB จากนั้นนำไปบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ทั้งไว้ข้ามคืน



ภาพที่ 3.18 การลนไฟห่วงถ่ายเชื้อในตะเกียงแอลกอฮอล์ และการใช้ห่วงลากเชื้อจาก stock เชื้อแบคทีเรีย

สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้แบคทีเรียโดยประมาณ 3×10^8 cfu/ml ตามวิธีของ McFARLAND SCALE ลำดับที่ 1 เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความขุ่นของการเพาะเชื้อแบคทีเรีย ทำได้โดยเตรียมแบเรียมคลอไรด์ (BaCl_2) 1 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ผสมกับกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) 1 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 9.9 มิลลิลิตร ในหลอดทดลอง ปิดฝาให้สนิท และต้องเขย่าก่อนนำมาเปรียบเทียบทุกครั้ง นำหลอดทดลองที่มีเชื้อแบคทีเรียซึ่งผ่านการบ่มทิ้งไว้ข้ามคืนมาทำการปั่นเหวี่ยงเพื่อให้ตกตะกอน จากนั้นใช้ไมโครปิเปตดูดมาใส่หลอดทดลองที่มีเพียงแค่น้ำ NB จนกว่าจะมีความขุ่นเท่ากับสารละลายที่เตรียมได้จากวิธี McFARLAND โดยวิธีการเปรียบเทียบคือ นำปากกาขีดลงบนกระดาษสีขาว และนำหลอดทดลองมาวางไว้หน้ากระดาษที่ขีดเส้นไว้ เปรียบเทียบโดยให้ทั้งสองหลอดมีความขุ่นเท่ากัน แสดงดังภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 การเปรียบเทียบความขุ่นของการเพาะเชื้อแบคทีเรีย โดยใช้วิธี McFARLAND SCALE ลำดับที่ 1

- ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มตัวอย่างและบ่มเชื้อ

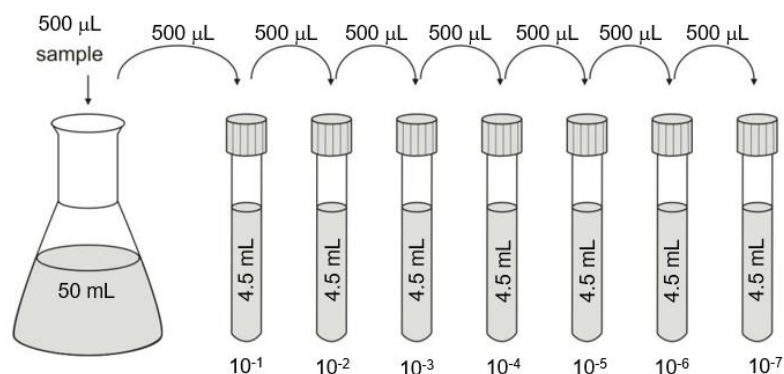
นำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านและไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรียมาตัดให้มีขนาดประมาณ 1×1 ตารางนิ้ว จำนวนสูตรละ 3 กรัม ใส่ในงานเพาะเชื้อพลาสติก โดยใส่ฟิล์มให้กระจายทั่วจาน จากนั้นนำไปฆ่าเชื้อโดยใช้รังสียูวี ด้านละ 20 นาที นำฟิล์มมาใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มี NB อยู่ 50 มิลลิลิตร ซึ่งจะใส่ฟิล์มสูตรละขวด และให้ใส่ฟิล์มทีละน้อยจนหมด เพื่อป้องกันการปนเปื้อน ก่อนและหลังใส่ฟิล์มต้องลงไฟที่ปากขวดทุกครั้ง และต้องนำ forceps จุ่มเอทานอลก่อนนำลงในตะเกียงแอลกอฮอล์ หลังจากนั้นจะใส่เชื้อแบคทีเรียที่เตรียมจากวิธี McFARLAND SCALE มาใส่ในขวดรูปชมพู่ โดยใช้ไมโครปิเปตดูดใส่ขวด ขวดละ 200 ไมโครลิตร เขย่าเพื่อให้เชื้อแบคทีเรียกระจายทั่วขวด นำไปบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ข้ามคืน



ภาพที่ 3.20 การบ่มเชื้อแบคทีเรียในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

- ขั้นตอนการทำ dilution

หลังจากบ่มทิ้งไว้ข้ามคืนแล้ว จะทำการเจือจางตัวอย่างเชื้อแบคทีเรียเริ่มต้น โดยการทำให้เชื้อแบคทีเรียเจือจางลงครึ่งละ 10 เท่า (10-fold serial dilutions) ในสารละลายเจือจางโซเดียมคลอไรด์ที่เตรียมไว้ข้างต้น จำนวนไม่เกิน 9 หลอด ต่อหนึ่งสูตรการทดลอง เขียนหมายเลขกำกับแต่ละหลอดให้ชัดเจน ซึ่งในการทดลองจะทำภายใต้เทคนิค sterilize เพื่อป้องกันการปนเปื้อน โดยจะเริ่มจากการปิเปตเชื้อแบคทีเรียจากขวดรูปชมพู่ 500 ไมโครลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองที่ 1 ใช้เครื่อง vortex เขย่า เพื่อให้เชื้อและสารละลายเข้ากันได้ดี จากนั้นปิเปตเชื้อจากหลอดทดลองที่ 1 ปริมาตร 500 ไมโครลิตร ใส่ลงในหลอดทดลองที่ 2 ใช้เครื่อง vortex เขย่า ทำแบบนี้ต่อไปจนครบทั้ง 9 หลอด เมื่อครบแล้วจะเริ่มทำขวดรูปชมพู่ที่มีฟิล์มสูตรอื่น ๆ ต่อไปจนครบทั้งหมด ซึ่งค่า dilution factor ของแต่ละหลอดทดลองในการเจือจางจะแสดงดังตารางที่ 3.3



ภาพที่ 3.21 วิธีการทำให้เชื้อแบคทีเรียเจือจางลงครึ่งละ 10 เท่า (10 fold serial dilutions) [47]

ตารางที่ 3.3 แสดง dilution factor ของแต่ละหลอดทดลองที่มีการเจือจางเชื้อแบคทีเรีย

หลอดทดลองที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรีย	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
Dilution factor	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9

หลังจากเจือจางเสร็จจะทำการเลือกความเข้มข้นจำนวน 3 ความเข้มข้นที่คาดว่าจะมีจำนวนโคโลนีในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งจะเจริญเติบโตในงานเพาะเชื้ออยู่ในช่วงประมาณ 30 – 300 โคโลนี มาหยดลงบนงานเพาะเชื้อที่มีอาหารแข็ง (NA) ซึ่งเตรียมไว้ข้างต้น โดยจะทำการแบ่งครึ่งงานเพาะเชื้อแล้วหยดสารละลายที่เจือจางจำนวนฝั่งละ 10 หยด หยดละ 10 ไมโครลิตร ทำแบบนี้ทั้ง 3 ความเข้มข้นต่อสูตรการทดลอง และทำจนครบทุกสูตร จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 – 24 ชั่วโมง

- การนับจำนวนเชื้อแบคทีเรีย

หลังจากบ่มเสร็จให้เลือกงานเพาะเชื้อที่มีการเจริญเติบโตของโคโลนีจำนวน 30 – 300 โคโลนี และมีการแยกโคโลนีอย่างชัดเจน เพียง 1 ความเข้มข้นต่อสูตรการทดลอง ทำการนับจำนวนโคโลนี จากนั้นนำมาคำนวณหาปริมาณของเชื้อแบคทีเรีย ในหน่วยโคโลนีต่อมิลลิลิตร (CFU/ml) และเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย (% Reduction) ดังนี้

$$\text{ปริมาณเชื้อแบคทีเรีย (cfu/ml)} = \frac{\text{จำนวนโคโลนีที่นับได้} \times \text{dilution factor}}{\text{ปริมาตรของเชื้อที่นำมาเลี้ยงบนอาหาร (ml)}} \quad \text{สมการที่ 3.4}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย (\% Reduction)} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.5}$$

โดยที่ A คือ CFU/ml ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย

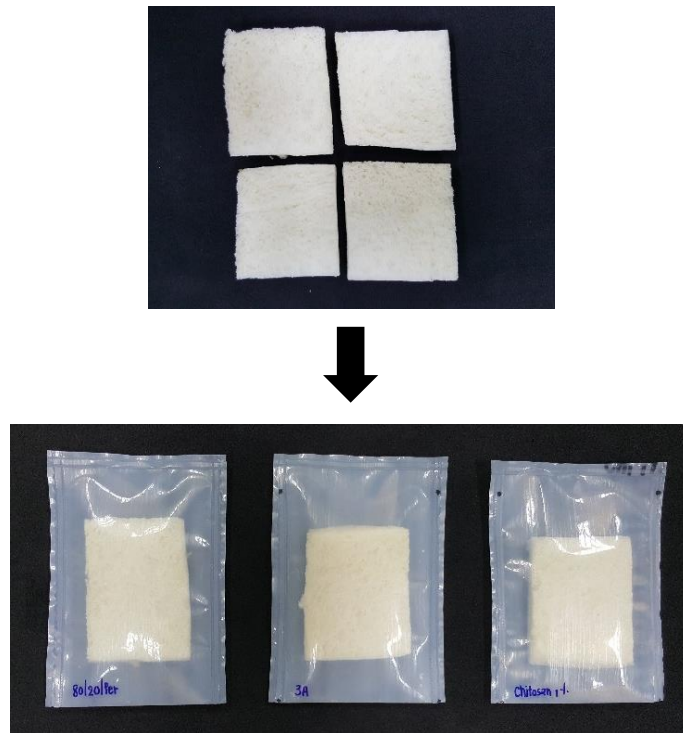
B คือ CFU/ml ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย

3.3.7.10 การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมาประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร

ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วนที่มีสมบัติเหมาะสมที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรียจะถูกนำมาทดสอบความเป็นไปได้ในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ถูกนำมาทดสอบมีทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ได้แก่ ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาและเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ ไคโตซาน หรืออนุภาคซิงค์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 1 และ 2 %w/v โดยจะทำบรรจุภัณฑ์ให้มีขนาดประมาณ 3 x 4 ตารางนิ้ว ในการศึกษาจะใช้ มะเขือเทศราชินี (cherry tomato) และขนมปังแผ่นขาว เริ่มจากนำมะเขือเทศ และขนมปังแผ่นขาวใส่ลงในบรรจุภัณฑ์ จากนั้นปิดผนึก (seal) ให้เรียบร้อยทุกด้าน แสดงดังภาพที่ 3.22 - ภาพที่ 3.23 สำหรับมะเขือเทศจะนำไปเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 7 - 10 °C ส่วนขนมปังแผ่นขาวจะเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง สังเกตการเปลี่ยนแปลงและบันทึกภาพถ่ายเพื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลอง



ภาพที่ 3.22 ขั้นตอนการเตรียมมะเขือเทศใส่ลงในบรรจุภัณฑ์และปิดผนึก



ภาพที่ 3.23 ขั้นตอนการเตรียมขนมปังแป้งข้าวใส่ลงในบรรจุภัณฑ์และปิดผนึก



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารที่ต้านทานแบคทีเรียจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท ซึ่งในปัจจุบันแนวโน้มการใช้งานฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารเพิ่มมากขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการในชีวิตประจำวันของมนุษย์ที่เน้นความสะดวกสบาย และความรวดเร็ว ซึ่งโดยส่วนใหญ่พลาสติกที่ใช้ในปัจจุบันนั้นไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จึงก่อให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกจำนวนมาก ซึ่งย่อยสลายยากและใช้ระยะเวลาในการย่อยสลาย เป็นสาเหตุทำให้เกิดการสะสมของขยะและเกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้การเลือกใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการนำมาพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารควรมีสมบัติในการต้านทานแบคทีเรีย เนื่องจากแบคทีเรียเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเน่าเสียของอาหาร ทำให้อาหารเสื่อมคุณภาพเร็ว และมีอายุการเก็บรักษาที่สั้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะเกี่ยวข้องกับการพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารที่ต้านทานแบคทีเรีย โดยการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (PBAT) ในแบบที่ไม่เติมและเติม DCP หรือ Perkadox เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา โดยจะใช้ PBS เป็นเมทริกซ์หลัก จากนั้นจะนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วนที่เหมาะสมไปปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา (Corona treatment) เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะของสารต้านทานแบคทีเรีย ฟิล์มที่ปรับปรุงพื้นผิวจะถูกเคลือบด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย ได้แก่ ไคโตซาน หรืออนุภาคซิงค์ออกไซด์ ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน จากนั้นจะทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติการกั้นผ่านของออกซิเจน อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ค่ามุมสัมผัสน้ำ สมบัติเคมีที่ผิว สมบัติทางความร้อน ลักษณะสัณฐานวิทยา สมบัติการต่อต้านแบคทีเรีย และความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 การศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

ส่วนที่ 2 การศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

ส่วนที่ 3 การศึกษาผลของการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาและเคลือบผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย

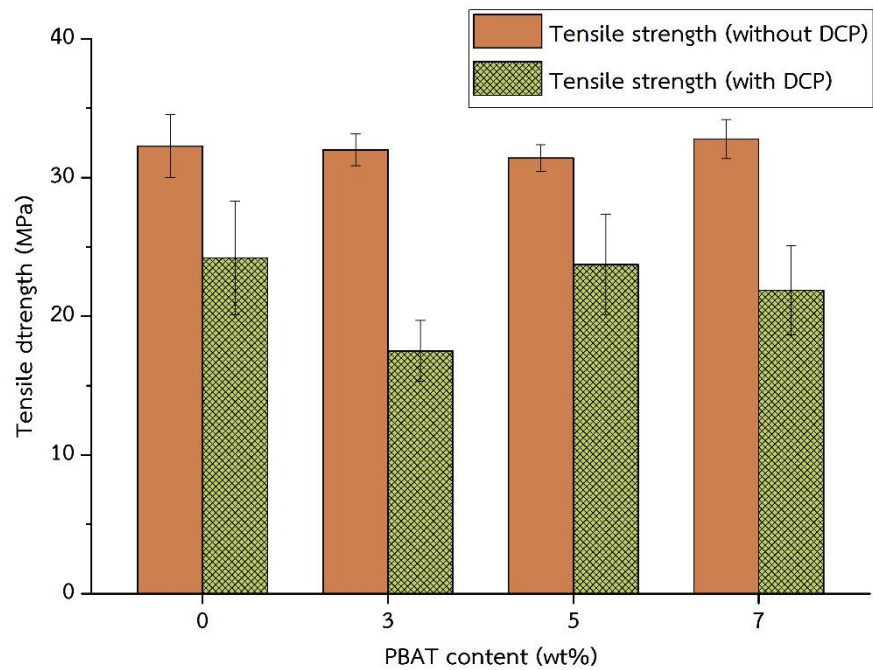
4.1 การศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

4.1.1 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

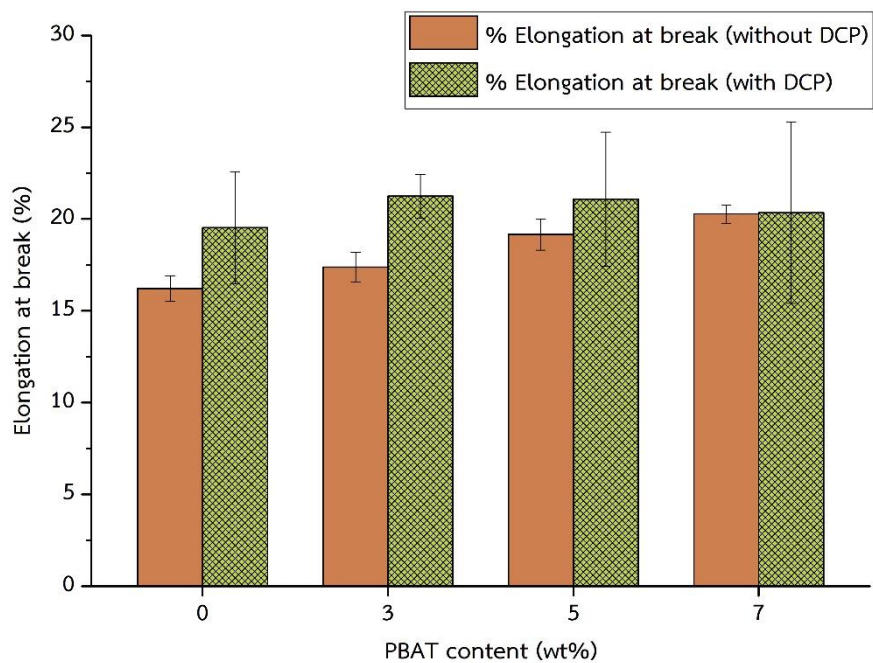
การศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ในอัตราส่วนคงที่ที่ 0.001 phr แสดงดังภาพที่ 4.1- ภาพที่ 4.3 และแสดงข้อมูลเชิงตัวเลขไว้ในตารางผนวก ก.1 สำหรับค่าความแข็งแรงต่อการดึงยึด (Tensile strength) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม แสดงดังภาพที่ 4.1 พิจารณาผลของการเติม PBAT พบว่าการเติม PBAT ในปริมาณมากขึ้นส่งผลต่อค่า tensile strength อย่างไม่มีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับ PBS บริสุทธิ์ ในทางกลับกัน การเติม DCP ลงในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจะทำให้ tensile strength มีค่าลดลงประมาณ 20 – 40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในแนวทางที่ไม่เติม DCP และจะสังเกตได้ว่าฟิล์ม PBS บริสุทธิ์ ที่เติม DCP จะแสดงการลดลงของค่า tensile strength ที่ใกล้เคียงกันกับฟิล์มพอลิเมอร์สกัดส่วนอื่น ๆ ที่เติม DCP

พิจารณาค่า elongation at break เป็นไปตามที่คาดหวังไว้ว่าการผสม PBAT จะช่วยปรับปรุงความสามารถในการยืดหยุ่น (flexibility) ให้กับฟิล์ม PBS ได้ จากภาพที่ 4.2 พบว่าค่า elongation at break มีแนวโน้มเปลี่ยนไปในทิศทางที่สูงขึ้นตามปริมาณการเติม PBAT ที่มากขึ้น และเมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติม DCP พบว่า ค่า elongation at break จะมีค่าสูงกว่าในแนวทางที่ไม่เติม DCP เล็กน้อย อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นนี้ไม่ได้เป็นฟังก์ชันกับปริมาณการเติม PBAT เนื่องจากในสัดส่วนที่มีปริมาณการเติม PBAT สูงขึ้นกลับทำให้ค่า elongation at break แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม DCP สามารถเกิดปฏิกิริยาแข่งขันในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่ (chain scission) และปฏิกิริยาการเชื่อมขวาง (crosslink/branch) โดย DCP จะเป็นตัวริเริ่มทำให้สายโซ่โมเลกุลของ PBS เกิดการขาดภายในเมทริกซ์ ส่งผลให้ค่า tensile strength ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จากนั้นอนุมูลอิสระ (free radical) ที่เกิดขึ้นภายในโมเลกุลของ PBS จะเกิดการ terminate โดยการเชื่อมขวางกับโมเลกุล PBS หรือ PBAT ที่อยู่ข้างเคียง ทำให้สายโซ่โมเลกุล PBS เกิดการเกี่ยวพันกัน (chain entanglement) ส่งผลให้การเคลื่อนที่ผ่านกันของสายโซ่โมเลกุลเป็นไปได้ยากขึ้น ดังนั้นค่า elongation at break ของฟิล์ม PBS และ PBS/PBAT ที่เติม DCP จึงมีค่าสูงกว่าแนวทางที่ไม่เติม DCP เล็กน้อย สำหรับแนวทางที่เติม DCP ปริมาณการเติม PBAT จะไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของ elongation at break แสดงว่า PBS มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา free radical กับ DCP มากกว่า PBAT



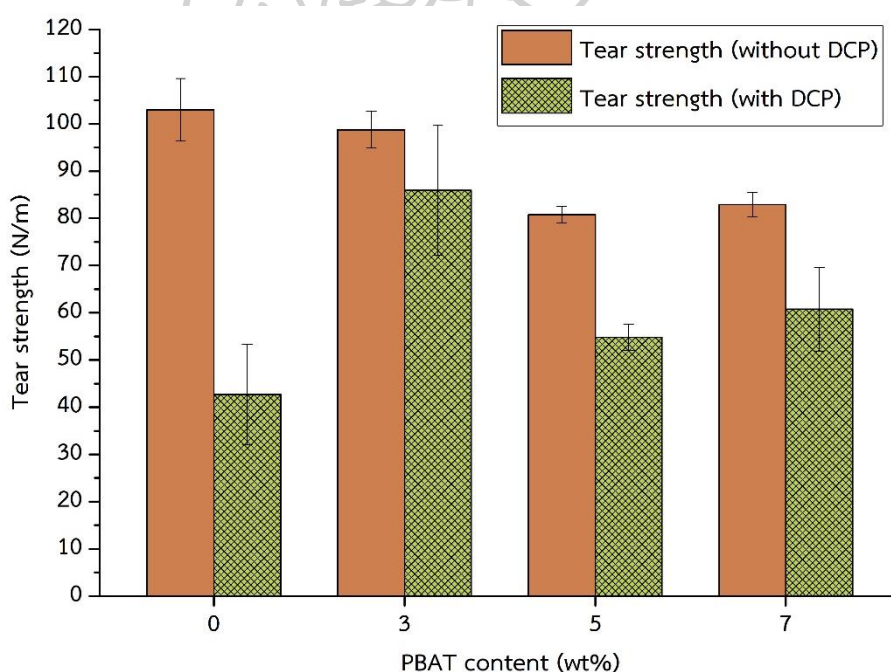
ภาพที่ 4.1 ความแข็งแรงต่อการดึงยึดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติมและไม่เติม DCP



ภาพที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การยืดตัวก่อนการแตกหักของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP

นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้ศึกษาความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาด้วยการผสมสารใน Internal mixer ซึ่งแสดงผลการศึกษาไว้ในภาคผนวก

สำหรับความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมและเติม DCP แสดงดังภาพที่ 4.3 พิจารณาผลของการเติม PBAT พบว่าการเติม PBAT ลงใน PBS จะทำให้ค่า tear strength ลดลงตามปริมาณ PBAT ที่มากขึ้น แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT มีความไม่เข้ากัน (immiscible) สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากเทคนิค SEM ซึ่งแสดงการแยกกันของสองวัสดุ นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์ม PBS ที่เติม DCP จะมีค่า tear strength ลดลงอย่างมาก คาดว่าบริเวณที่เกิดการเชื่อมขวางในเมทริกซ์ของ PBS อาจเกิดเป็นจุดศูนย์รวมความเค้น (stress concentration) และสำหรับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติม DCP จะมีค่า tear strength ต่ำกว่าแบบที่ไม่เติม DCP ในทุกสัดส่วน ถึงแม้ว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจะถูกปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุ และความสามารถในการยึดตัว แต่อย่างไรก็ตาม ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในระบบนี้มีค่า tensile strength ต่ำ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่โมเลกุล PBS จึงอาจทำให้การฉีกขาดระหว่างการเกิด propagation ง่ายขึ้น



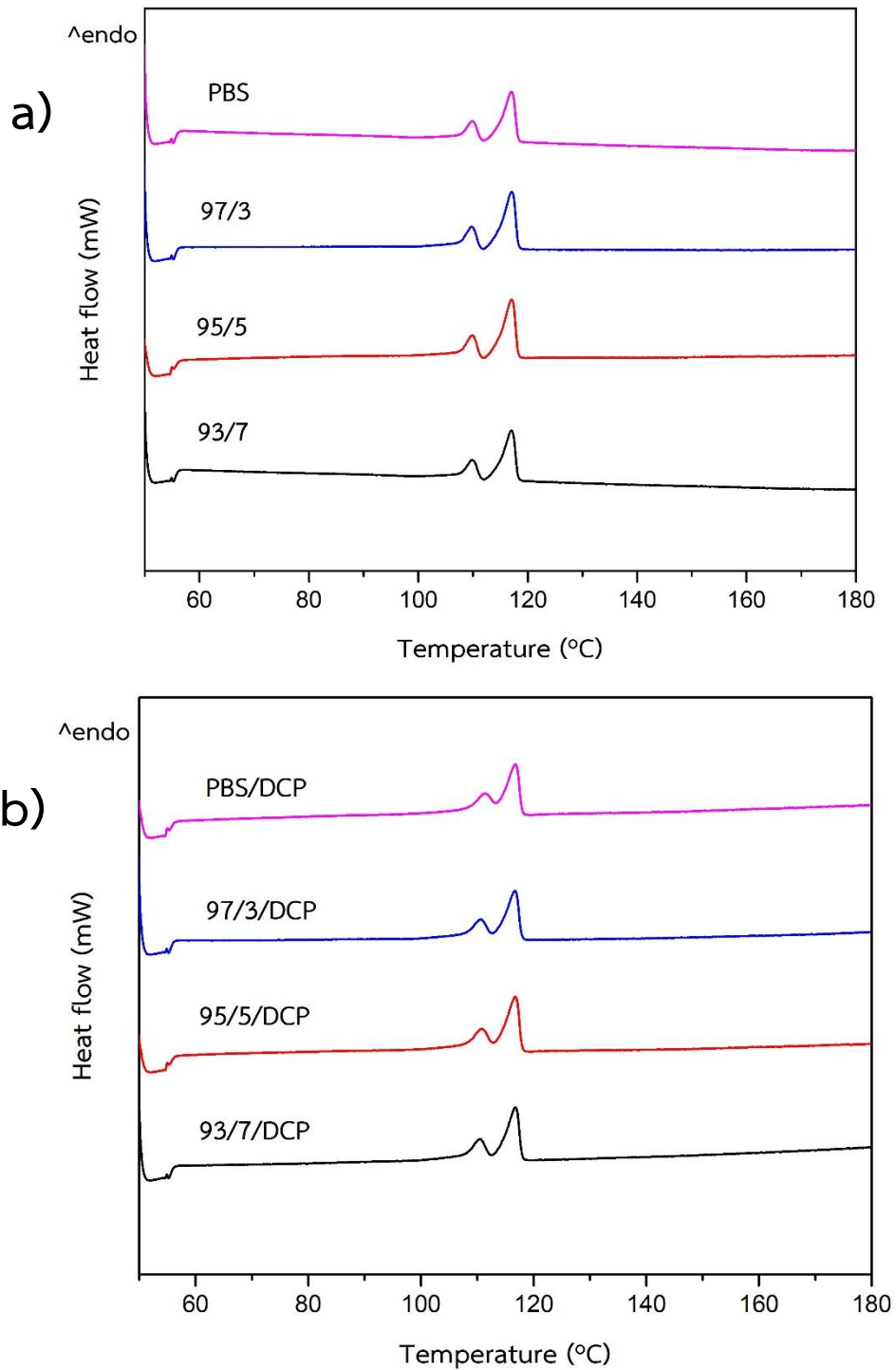
ภาพที่ 4.3 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP

4.1.2 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)

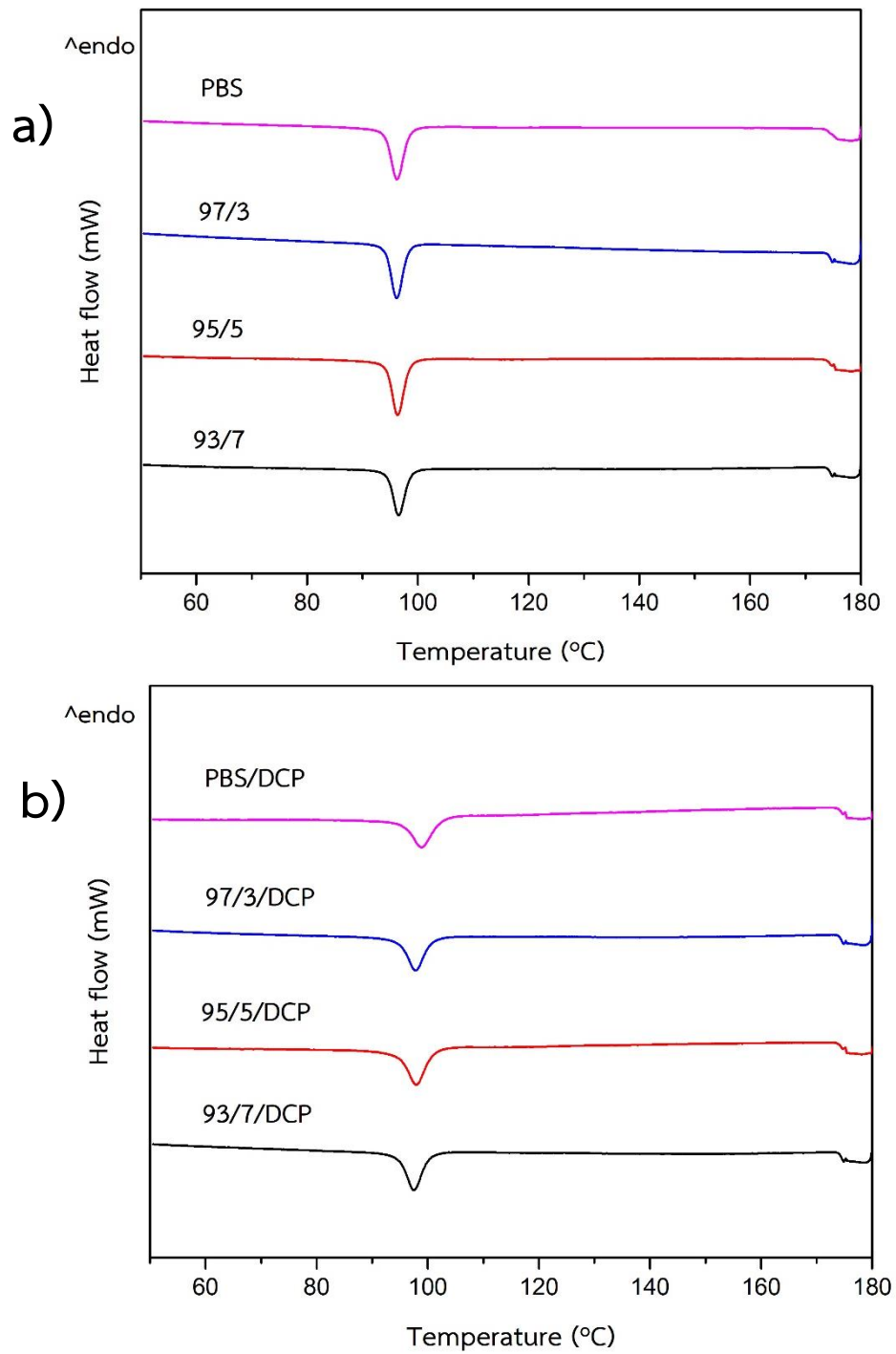
สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง Perkin-Elmer DSC ในโหมดให้ความร้อน-เย็นตัว-ให้ความร้อน ที่ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 180 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียส/นาที ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลจากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง แสดงดังภาพที่ 4.4 - ภาพที่ 4.5 และแสดงเชิงตัวเลขไว้ในตารางที่ 4.1 พิจารณาอุณหภูมิการตกผลึก (Crystallization temperature, T_c) ของฟิล์ม PBS และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติม DCP พบว่าอุณหภูมิการตกผลึกมีความแตกต่างกันไม่มีนัยสำคัญ ในขณะที่ฟิล์ม PBS และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติม DCP แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิไปในทิศทางที่อุณหภูมิต่ำลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณการเติม PBAT มากขึ้น จาก 98.9 เป็น 97.5 องศาเซลเซียส เมื่อปริมาณการเติม PBAT เป็น 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้จะพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติม DCP จะมีอุณหภูมิการตกผลึกสูงกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติม DCP จากผลการทดลอง สามารถอธิบายได้ว่า DCP ทำให้เกิดปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่โมเลกุล PBS ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลสั้นลง ดังนั้นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติม DCP จะสามารถตกผลึกได้ง่ายกว่าแบบที่ไม่เติม DCP

พิจารณาผลของอุณหภูมิลอมเหลว (melting temperature, T_m) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม PBS/PBAT ทั้งที่ไม่เติมและเติม DCP จะพบพีค 2 พีค คือ พีคที่อุณหภูมิต่ำ (T_{m1}) ที่อุณหภูมิประมาณ 109 - 111 องศาเซลเซียส แสดงถึงการหลอมผลึกที่มีความสมบูรณ์น้อย และพีคที่อุณหภูมิสูง (T_{m2}) ที่อุณหภูมิประมาณ 117 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงการหลอมเหลวผลึกอย่างสมบูรณ์ เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของคุณ E.S. YOO และคณะ ได้รายงานการพบพีค 2 พีค ในระหว่างขั้นตอนการให้ความร้อน โดยระบุไว้ว่า T_{m1} คือ อุณหภูมิการหลอมผลึกที่มีอยู่ดั้งเดิม และ T_{m2} คือ อุณหภูมิการหลอมผลึกอีกครั้ง (recrystallized) [48] จากตารางสามารถสังเกตได้ว่าอุณหภูมิลอมเหลวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทั้งที่ไม่เติมและเติม DCP มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์ม PBS มาก แสดงว่ารูปแบบผลึก (crystal structure) ของ PBS ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อเติม PBAT หรือ DCP ในพอลิเมอร์ผสม

สำหรับปริมาณการเกิดผลึก (degree of crystallinity, X_c) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP พบว่าจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณการเติม PBAT มากขึ้น เนื่องจากการเติม PBAT ปริมาณมากขึ้น จะขัดขวางการเติบโตของผลึก PBS ในทางกลับกัน พบว่าการเติม DCP จะไม่ส่งผลต่อปริมาณการเกิดผลึกของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยทั้งแนวทางที่เติมและไม่เติม DCP จะมีปริมาณผลึกใกล้เคียงกันมาก



ภาพที่ 4.4 DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง
ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT a) ไม่เติม DCP b) เติม DCP



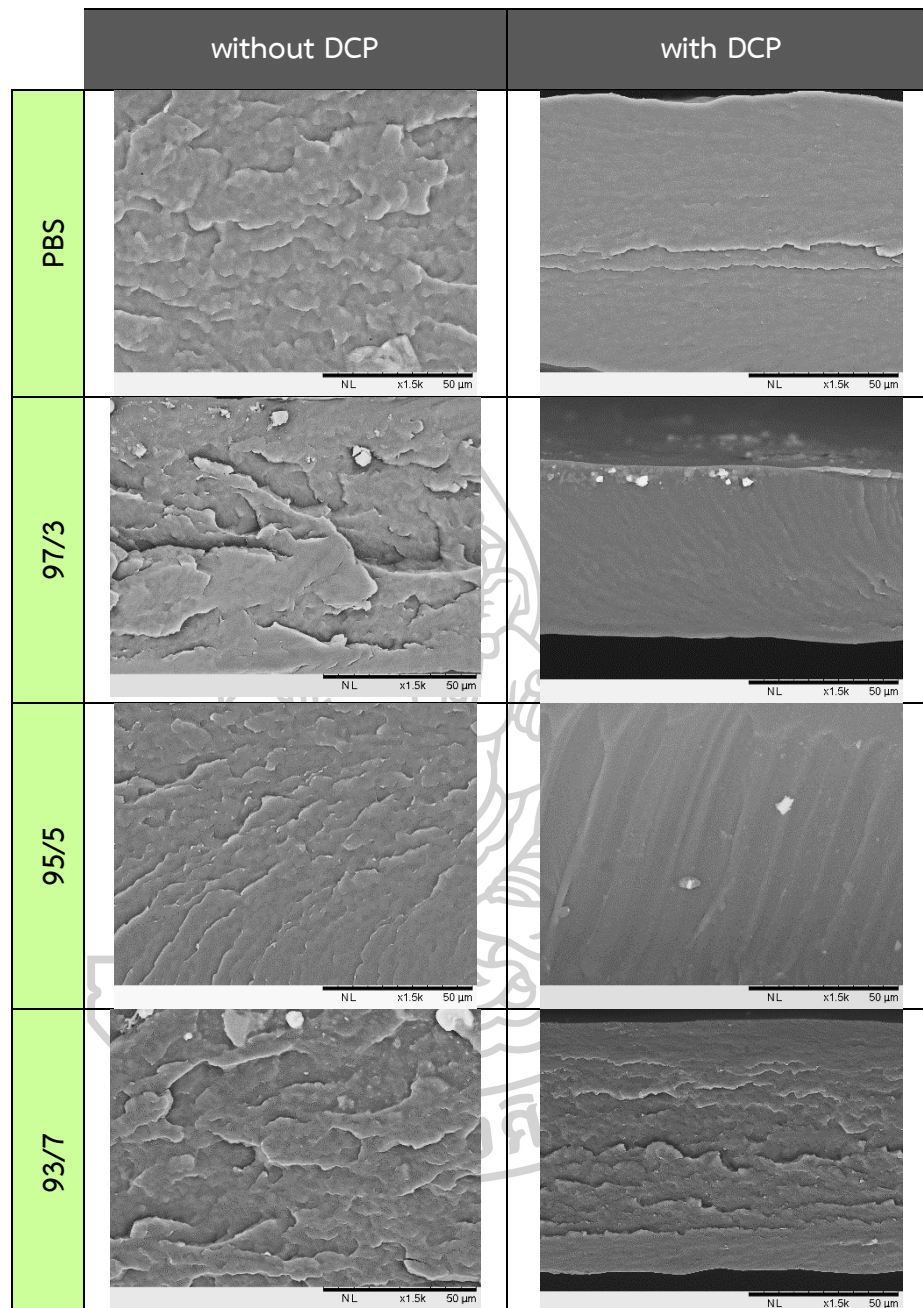
ภาพที่ 4.5 DSC thermogram ในขั้นตอนการทำให้เย็นตัว
ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT a) ไม่เติม DCP b) เติม DCP

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP สัดส่วนต่างๆ

Sample	T _c (°C)	T _{m1} (°C)	T _{m2} (°C)	X _c (%)
Neat PBS	96.3	109.8	117.0	55.1
97/3	96.2	109.8	117.1	55.0
95/5	96.3	109.9	117.1	54.3
93/7	96.6	109.9	117.1	51.5
PBS/DCP	98.9	111.4	116.7	54.9
97/3/DCP	97.8	110.5	116.7	54.5
95/5/DCP	97.9	110.7	116.7	54.3
93/7/DCP	97.5	110.5	116.7	51.5

4.1.3 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ในอัตราส่วนคงที่ที่ 0.001 phr โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ขึ้นงานฟิล์มตัวอย่างจะถูกนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลว และทำให้ขึ้นงานแตกหักอย่างรวดเร็ว ภาพถ่ายที่ได้จากเทคนิค SEM แสดงดังภาพที่ 4.6 จากภาพถ่าย พบว่า ฟิล์ม PBS แสดงการแตกหักของพื้นผิวค่อนข้างขรุขระ ซึ่งแสดงถึงการแตกหักแบบเหนียว (ductile failure) และเมื่อพิจารณาผลของการเติม PBAT ปริมาณ 3 - 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าการเติม PBAT ลงใน PBS จะทำให้พื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความขรุขระมากขึ้น ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าการแยกกันของทั้งสองวัสดุระหว่าง PBS ซึ่งเป็นวัสดุหลัก และ PBAT ซึ่งเป็นวัสดุกระจายตัวในทางตรงกันข้าม ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่มีการเติม DCP จะแสดงการแตกหักของพื้นผิวที่เรียกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติม DCP ดังนั้น การเติม DCP ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา จะสามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PBS และ PBAT เมื่อปริมาณการเติม PBAT เป็น 3 - 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.6 ภาพถ่ายที่ได้จากเทคนิค SEM แสดงภาคตัดขวาง (cross section) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติมและไม่เติม DCP ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

จากผลการศึกษาทั้งหมดที่ได้รายงานไว้ข้างต้น พบว่าการเติม DCP ในอัตราส่วนคงที่ที่ 0.001 phr ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ให้ดีขึ้นได้ เนื่องจาก DCP มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับ PBS อย่างมาก ทำให้ความสามารถในการขึ้นรูป (processibility) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมไม่ดี เกิดเป็นจุดเจลา ควบคุมความสม่ำเสมอได้ยาก และหากขึ้นรูปเป็นระยะเวลาสั้นจะไม่สามารถขึ้นรูปต่อไปได้ โดยลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติม DCP แสดงดังภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติม DCP ในระหว่างกระบวนการ cast film extrusion

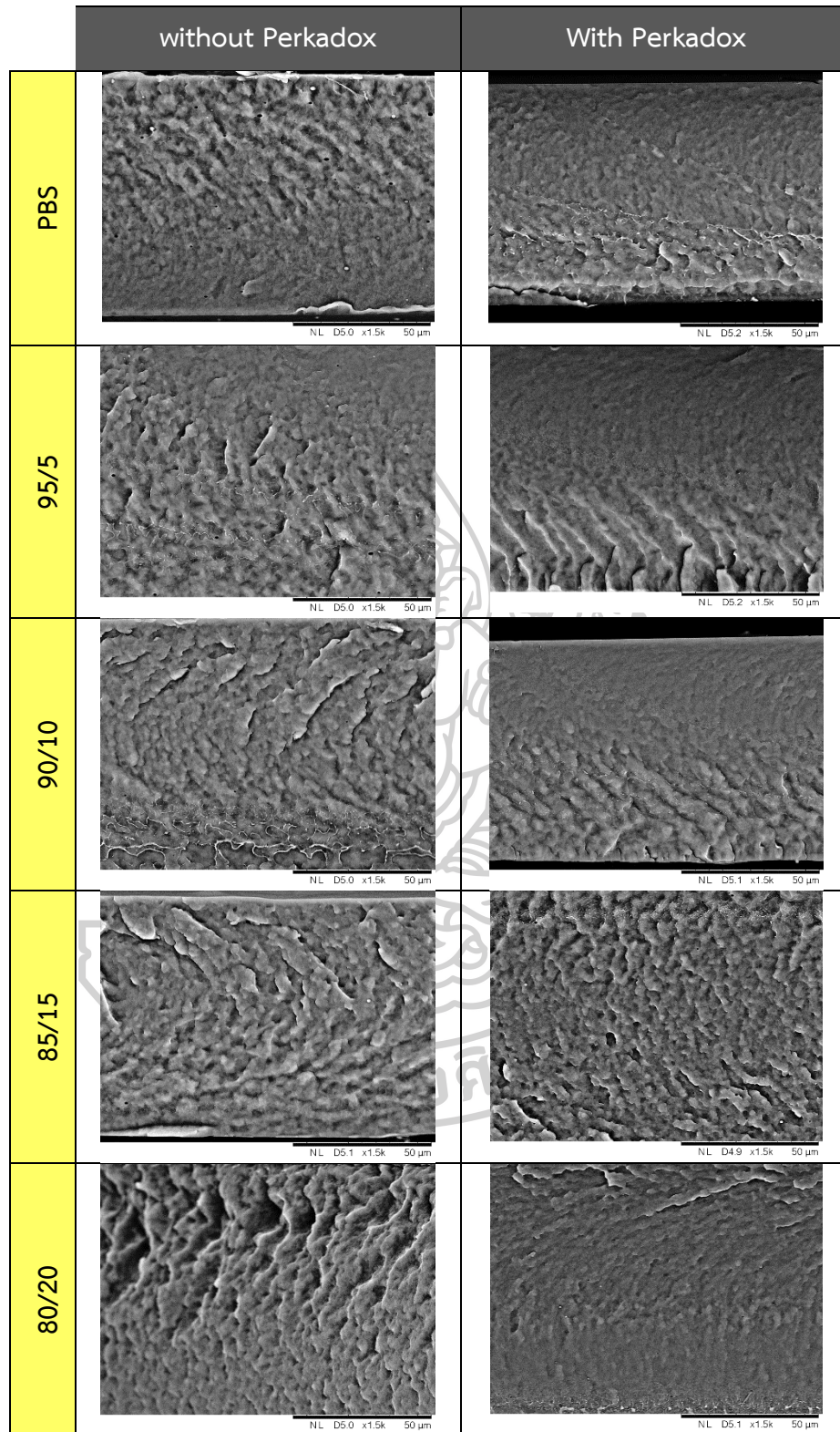
ดังนั้นผู้วิจัยจึงเปลี่ยนชนิดของเปอร์ออกไซด์จากเดิมที่ใช้ DCP เป็น Perkadox โดยมีปริมาณของเปอร์ออกไซด์เป็นส่วนประกอบอยู่ 40 % ซึ่งน้อยกว่า DCP จึงคาดว่าจะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่า DCP โดยผลการศึกษาจะถูกรายงานไว้ในส่วนที่ 2

4.2 การศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

4.2.1 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)

โดยทั่วไป ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทั้งสองชนิด พารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์แต่ละองค์ประกอบ และความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ผสม ถ้าพอลิเมอร์ผสมมีความหนืดใกล้เคียงกัน ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะเรียบและมีกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แต่สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่มีความหนืดแตกต่างกัน เช่น วัฏภาคกระจายตัวมีความหนืดมากกว่าหรือน้อยกว่าเมื่อเทียบกับวัฏภาคหลัก จะทำให้เกิดเป็นโดเมนที่มีลักษณะเป็นทรงกลม หรือเกิดการกระจายตัวในลักษณะเป็นพื้นผิวขรุขระบนวัฏภาคหลัก [49]

สำหรับการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox ในอัตราส่วนคงที่ที่ 0.001 phr โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) แสดงดังภาพที่ 4.11 ภาพถ่ายที่ได้จากภาคตัดขวางของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ถูกนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลว และทำให้ชิ้นงานแตกหักอย่างรวดเร็วที่กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่า PBS บริสุทธิ์แสดงลักษณะการแตกหักแบบเหนียว (ductile failure) และเมื่อเติม PBAT ในปริมาณมากขึ้นจะทำให้พื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความขรุขระมากขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดมีความหนืดขณะหลอมเหลวแตกต่างกัน โดย PBS ซึ่งเป็นวัฏภาคหลักมีความหนืดมากกว่า PBAT ซึ่งเป็นวัฏภาคกระจายตัว ดังนั้นการผสมพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันจึงไม่สามารถผสมเข้ากันได้ดี กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และอาจเกิดการแยกกันของทั้ง 2 วัฏภาค เมื่อพิจารณาผลของการเติม Perkadox เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจะมีความเรียบมากขึ้น และสังเกตได้ชัดเจนที่สัดส่วน 80/20/Perkadox ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก Perkadox ทำให้เกิดปฏิกิริยาตัดสายโซ่โมเลกุลของ PBS ส่งผลให้วัฏภาคของ PBS มีความหนืดลดลง ดังนั้นความหนืดระหว่างทั้ง 2 วัฏภาคจะแตกต่างกันน้อยลง นอกจากนี้ การเติม Perkadox ยังสามารถช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้โดยการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของสายโซ่ PBS กับ PBS หรือ PBS กับ PBAT ผ่านปฏิกิริยาฟรีเรดิคอล (free radical) โดยเมื่อ Perkadox ได้รับความร้อนจากกระบวนการขึ้นรูปจะแตกตัวเป็น free radical จากนั้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับสายโซ่ PBS และ PBAT ทำให้มี free radical เกิดขึ้นบนสายโซ่ โดยสายโซ่พอลิเมอร์ที่มี free radical อาจเกิดการ terminate ของสายโซ่ผ่านกระบวนการ coupling ซึ่งจะเกิดการรวมกันของ free radical ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ จึงทำให้เกิดการเชื่อมโยง



ภาพที่ 4.11 ภาพถ่ายที่ได้จากเทคนิค SEM แสดงภาคตัดขวาง (cross section) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติมและไม่เติม Perkadox ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

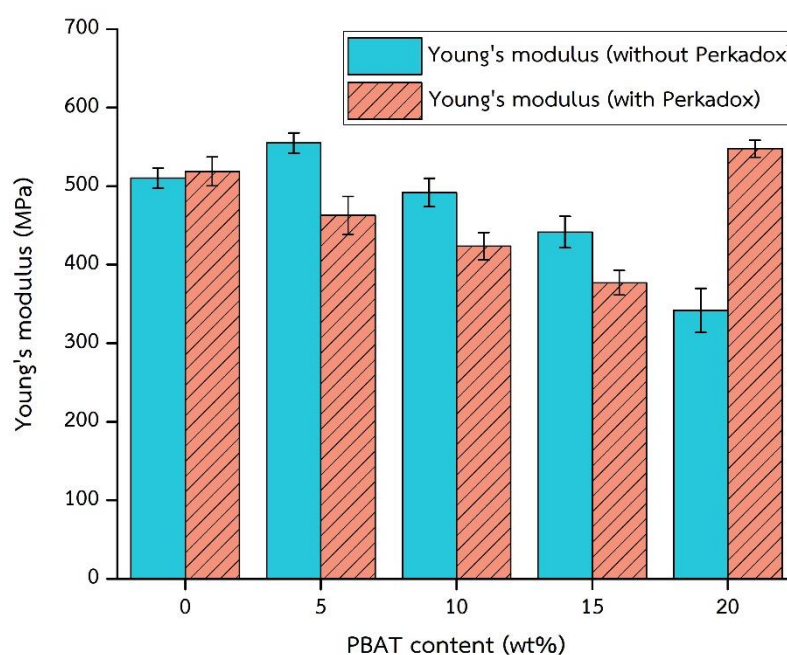
4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

โดยทั่วไปฟิล์มบรรจุภัณฑ์ทางด้านอาหารควรมีความสามารถในการยืดหยุ่นที่ดี เพื่อป้องกันการฉีกขาดในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป กระบวนการขนส่ง รวมถึงเมื่อนำฟิล์มบรรจุภัณฑ์นั้นไปใช้งาน ซึ่งหนึ่งในข้อเสียเปรียบของ PBS คือ มีความแข็งแรงขณะหลอมเหลวและความต้านทานต่อการฉีกขาดไม่ดีนัก ผู้วิจัยจึงทำการเติม PBAT เพื่อเป็นการปรับปรุงปัญหาดังกล่าว อย่างไรก็ตาม การผสมพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดอาจเกิดการผสมที่ไม่เข้ากัน ซึ่งจะทำให้สมบัติด้านใดด้านหนึ่งของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ได้ต่ำกว่าพอลิเมอร์องค์ประกอบแต่ละชนิด ดังนั้นการเติม Perkadox ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) จึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งคาดว่าจะสามารถปรับปรุงสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมให้ดีขึ้น โดยผลการศึกษาสมบัติเชิงกลแสดงดังภาพที่ 4.12 - ภาพที่ 4.15 ทั้งนี้ได้แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไว้ในตารางผนวก ก.2

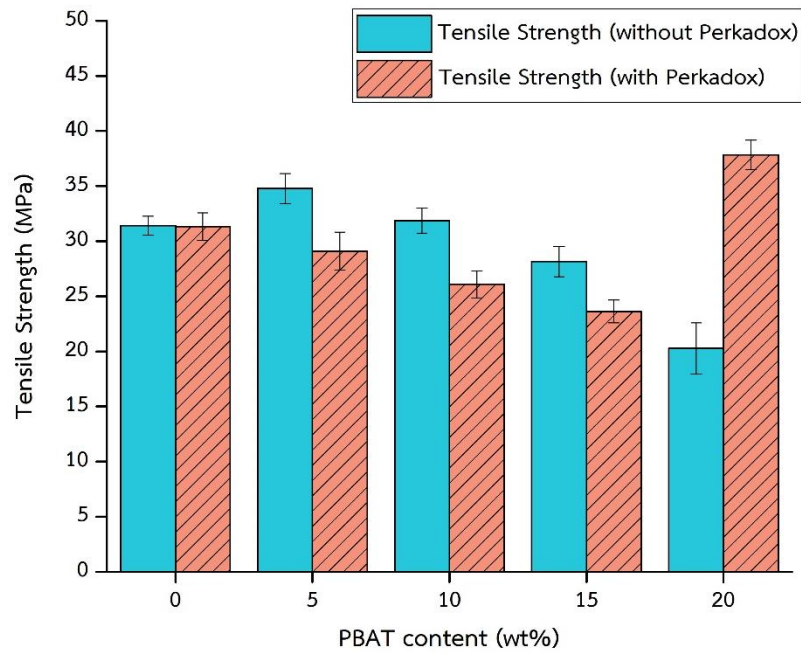
จากผลการศึกษาความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูป (Young's modulus) และความต้านทานต่อแรงดึงยึด (Tensile strength) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติมและไม่เติม Perkadox สัดส่วนต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 4.12 และ ภาพที่ 4.13 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาผลของการเติม PBAT พบว่าการเติม PBAT ในปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้ Young's modulus และ Tensile strength มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ลดลง เนื่องจาก PBAT มีค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ PBS โดยโครงสร้างของ PBAT ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ บิวทิลีนทาเรพทาเลท (BT) และบิวทิลีนอะดิเพท (BA) โดยส่วนที่เป็น BA จะเป็นส่วนที่มีความยืดหยุ่นสูง และเมื่อพิจารณาผลของการเติม Perkadox พบว่าฟิล์ม PBS บริสุทธิ์ที่ไม่เติมและเติม Perkadox แสดงค่า Young's modulus และ Tensile strength ที่แตกต่างกันไม่มากนัก ในทางกลับกันฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในระบบที่เติม Perkadox จะมีค่า Young's modulus และ Tensile strength ที่มีแนวโน้มลดลงมากกว่าในระบบฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติม Perkadox อาจเป็นผลมาจาก Perkadox เป็นตัวริเริ่มทำให้เกิดปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่โมเลกุล PBS ซึ่งเป็นเมทริกซ์ ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง ยกเว้นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 80/20/Perkadox จะพบว่ามีค่า Young's modulus และ Tensile strength เพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่เติม Perkadox คาดว่าเป็นผลมาจากสายโซ่โมเลกุลของ PBS กับ PBS หรือ PBAT มีการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคที่แข็งแรงมากขึ้น

จากผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์การยืดตัวก่อนการแตกหัก (%Elongation at break) ของฟิล์มพอลิเมอร์ระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox สัดส่วนต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 4.14 พิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระบบที่ไม่เติม Perkadox พบว่าการเติม PBAT ในปริมาณมากขึ้นไม่ส่งผลต่อค่า Elongation at break สาเหตุเนื่องจากอนุภาคของ PBAT ซึ่งเป็นวัฏภาคกระจายตัว (disperse phase) มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคกับ PBS ซึ่งเป็นเมทริกซ์ที่ไม่แข็งแรง หรือเป็นไปได้

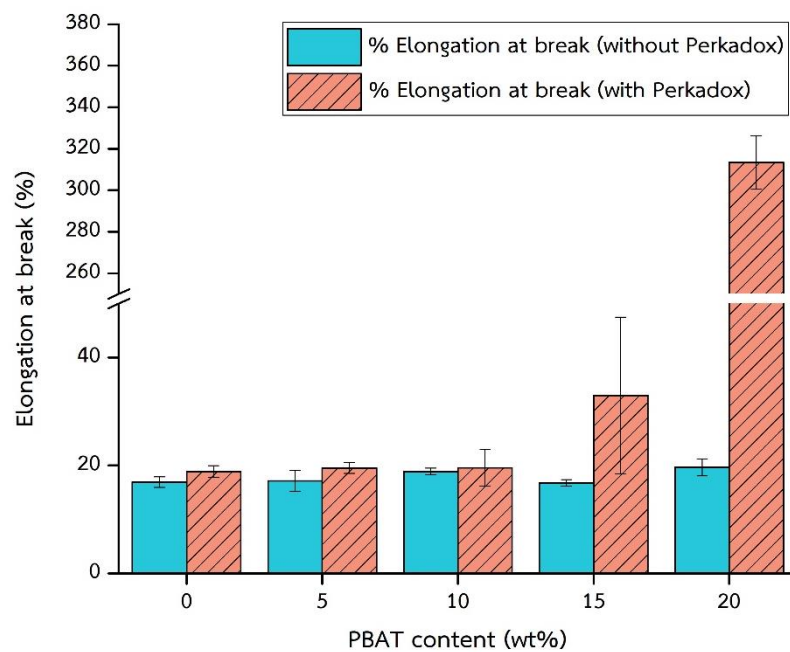
ได้ว่าอาจเกิดการแยกกันของทั้งสองวัสดุ จึงทำให้กลไกการถ่ายโอนแรงระหว่างวัสดุเกิดได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวเกิดเป็นจุดศูนย์รวมความเค้น (stress concentrator) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดการขาดออกจากกันอีกด้วย แต่เมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Perkadox พบว่าค่า Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PBAT ที่เพิ่มขึ้น และจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากในอัตราส่วนที่มีการเติม PBAT เป็น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นผลมาจากสายโซ่โมเลกุลของ PBS กับ PBAT มีการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุที่แข็งแรงมากขึ้น จากการเติม Perkadox เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา อีกทั้ง PBAT เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดึงยืดสูง (elongate phase) ทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเมื่อได้รับแรงดึงยืดจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนผ่านกันของสายโซ่ (chain slippage) ยากขึ้น สอดคล้องกับผลการทดสอบ Young's modulus และ Tensile strength ที่เพิ่มขึ้นดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้



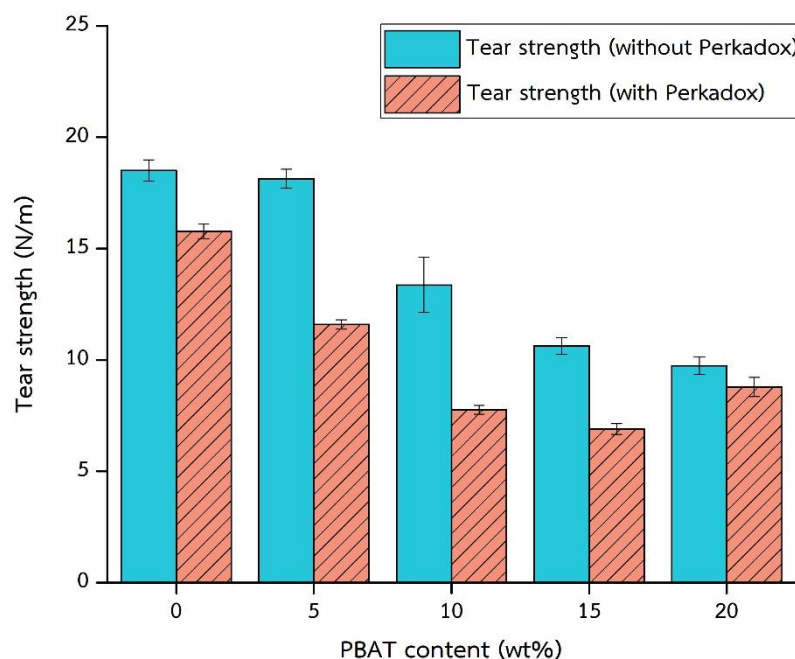
ภาพที่ 4.12 ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox



ภาพที่ 4.13 ความแข็งแรงต่อการดึงยึดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox



ภาพที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์การยืดตัวก่อนการแตกหักของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox



ภาพที่ 4.15 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox

สำหรับการศึกษาความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะถูกตัด ซึ่งการทำรอยตัดนี้เพื่อเป็นการสร้างจุดเริ่มต้นของการฉีกขาด ชิ้นงานบริเวณที่ตัดจะถูกจับยึดด้วยอุปกรณ์ทดสอบส่วนบนและล่าง เมื่อเริ่มทดสอบชิ้นงานจะเคลื่อนที่ออกจากกัน บริเวณรอยตัดจนขาดออกจากกัน ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบแสดงถึงการเชื่อมต่อระหว่างวัฏภาค รวมถึงความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติมและไม่เติม Perkadox แสดงดังภาพที่ 4.15 พบว่าการเติม PBAT ในปริมาณมากขึ้นส่งผลให้ค่า tear strength มีแนวโน้มเปลี่ยนไปในทิศทางที่ลดลง เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS และ PBAT อาจเกิดการผสมที่ไม่เข้ากัน และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคไม่ดี สอดคล้องกับภาพที่ได้จากเทคนิค SEM ซึ่งแสดงให้เห็นการแยกกันของสองวัฏภาค นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลของการเติม Perkadox พบว่าการเติม Perkadox ลงในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมกลับทำให้ค่า tear strength มีค่าลดลงมากกว่าในระบบที่ไม่เติม Perkadox ถึงแม้ว่าการเติม Perkadox จะช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างวัฏภาคก็ตาม ซึ่งอาจจะเกิดได้จาก 2 ปฏิกริยา คือ ปฏิกริยาการขาดของสายโซ่ (chain scission) และปฏิกริยาการเชื่อมขวาง (crosslink/branch) คาดว่าการเติม Perkadox ทำให้เกิดปฏิกริยาการขาดของสายโซ่ PBS ทำให้สายโซ่โมเลกุลสั้นลง ดังนั้นจึงฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจึงฉีกขาดได้ง่ายขึ้น และในกรณีฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ซึ่งมีค่า elongation at break สูง คาดว่าจะต้านทานต่อ

การฉีกขาดได้ดี ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่า tear strength มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในสัดส่วน 90/10/Perkadox และ 85/15/Perkadox เป็นผลมาจากมีการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางภายในเมทริกซ์หลัก ส่งผลให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างภูมิภาคที่ดี ดังนั้นในระหว่างการ propagation จึงทำให้ฟิล์มขาดได้ยากขึ้น หรือมีความต้านทานการฉีกขาดที่ดีขึ้น สอดคล้องกับผลของ Young's modulus และ Tensile strength

4.2.3 ผลการศึกษาค่ามุมสัมผัสน้ำ (Water contact angle)

การวัดค่ามุมสัมผัสน้ำจะสามารถบ่งบอกถึงความชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ของพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ซึ่งเป็น substrate ได้ โดยเทคนิคนี้จะเป็นการวัดมุมระหว่างพื้นผิวของ substrate และเส้นตรงที่ลากสัมผัสกับผิวของหยดน้ำบริเวณที่ติดกับ substrate ค่ามุมสัมผัสน้ำที่วัดได้ แสดงถึงความสามารถในการเปียกผิว (wettability) หากค่ามุมสัมผัสน้ำมีค่าสูง แสดงว่ามีแรงดึงผิวสูง ความสามารถในการเปียกผิวต่ำ ซึ่งก็คือมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำนั่นเอง

จากผลการทดสอบค่ามุมสัมผัสน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติมและไม่เติม Perkadox แสดงดังภาพที่ 4.16 พบว่าฟิล์ม PBS บริสุทธิ์แสดงค่ามุมสัมผัสน้ำที่สูงกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในสัดส่วนอื่น ๆ และเมื่อพิจารณาผลของการเติม PBAT ในปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสน้ำมีค่าลดลง เป็นผลมาจาก PBAT มีความเป็นขี้วมมากกว่า PBS เล็กน้อย สอดคล้องกับงานวิจัยของคุณ Rajendran Muthuraj [49] และคณะ ได้รายงานค่า solubility parameter ของ PBS และ PBAT พบว่าค่า solubility parameter ของ PBS และ PBAT เป็น 20.93 และ 22.28 จูล^{1/2} เซนติเมตร^{3/2} โดยที่น้ำมีค่าเป็น 48.16 จูล^{1/2} เซนติเมตร^{3/2} ซึ่ง PBAT ใกล้เคียงกับน้ำมากกว่า ดังนั้นเมื่อเติม PBAT ลงในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น จะทำให้มีความสามารถในการเปียกผิวที่ดีขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของการเติม Perkadox พบว่าการเติม Perkadox จะส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสน้ำมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่เติม เป็นผลมาจากการเติม Perkadox ทำให้เกิดปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่โมเลกุล PBS ซึ่งหมู่ปลายของสายโซ่โมเลกุล คือ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) ทำให้มีความชอบน้ำสูงขึ้น ดังนั้นค่ามุมสัมผัสน้ำจึงต่ำกว่าระบบที่ไม่เติม Perkadox

อย่างไรก็ตามค่ามุมสัมผัสน้ำที่ได้จากการทดสอบในทุกสัดส่วนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีค่ามุมสัมผัสน้ำที่น้อยกว่า 90 องศา แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทุกสัดส่วนมีความสามารถในการเปียกผิวที่ดี เนื่องจาก PBS จัดอยู่ในกลุ่มของพอลิเอสเทอร์ ดังนั้นจึงมีความเป็นขี้วมมากกว่าเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ในกลุ่มของพอลิโอเลฟินส์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร

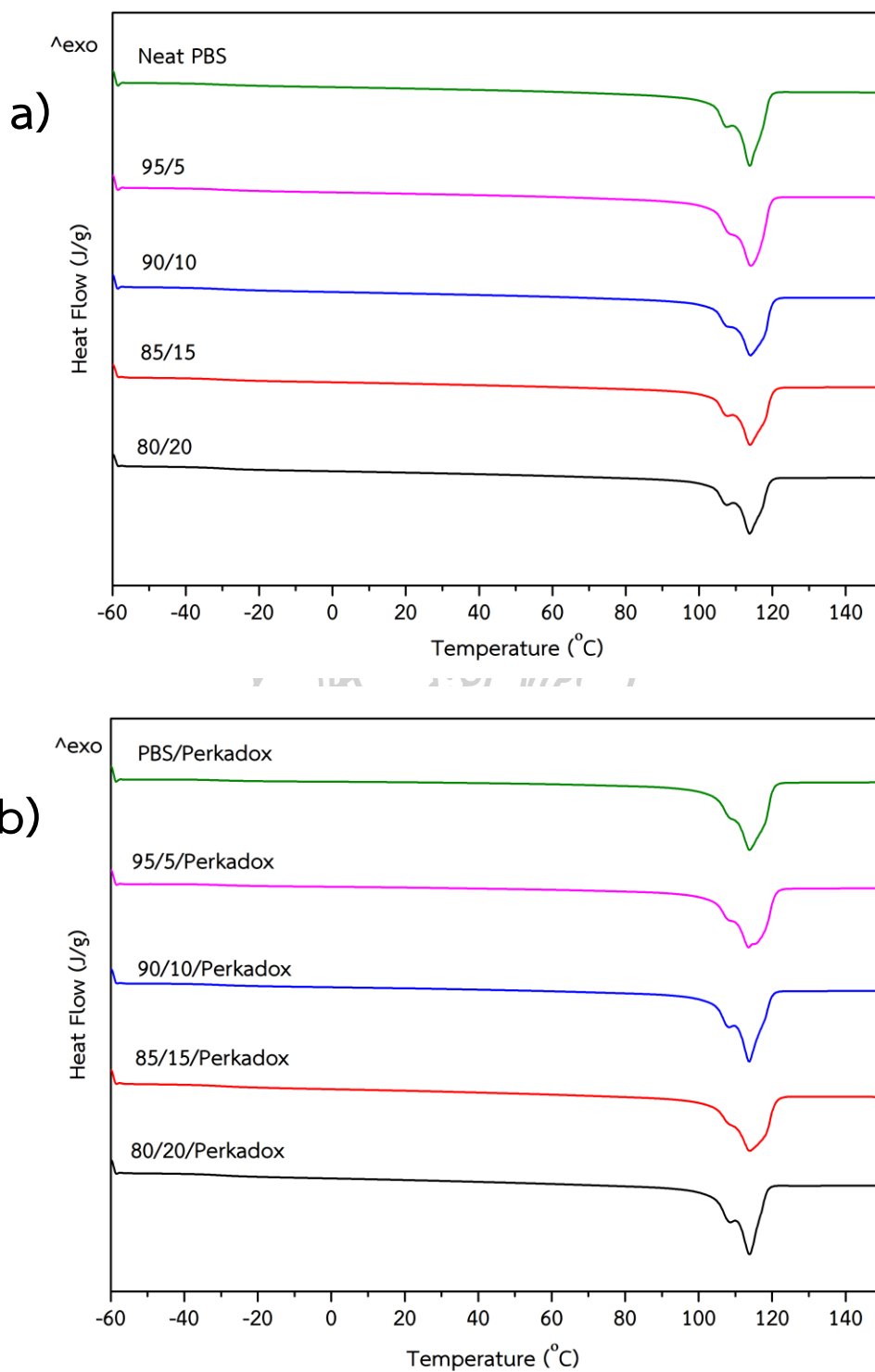


ภาพที่ 4.16 ค่ามุมสัมผัสผิวน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox

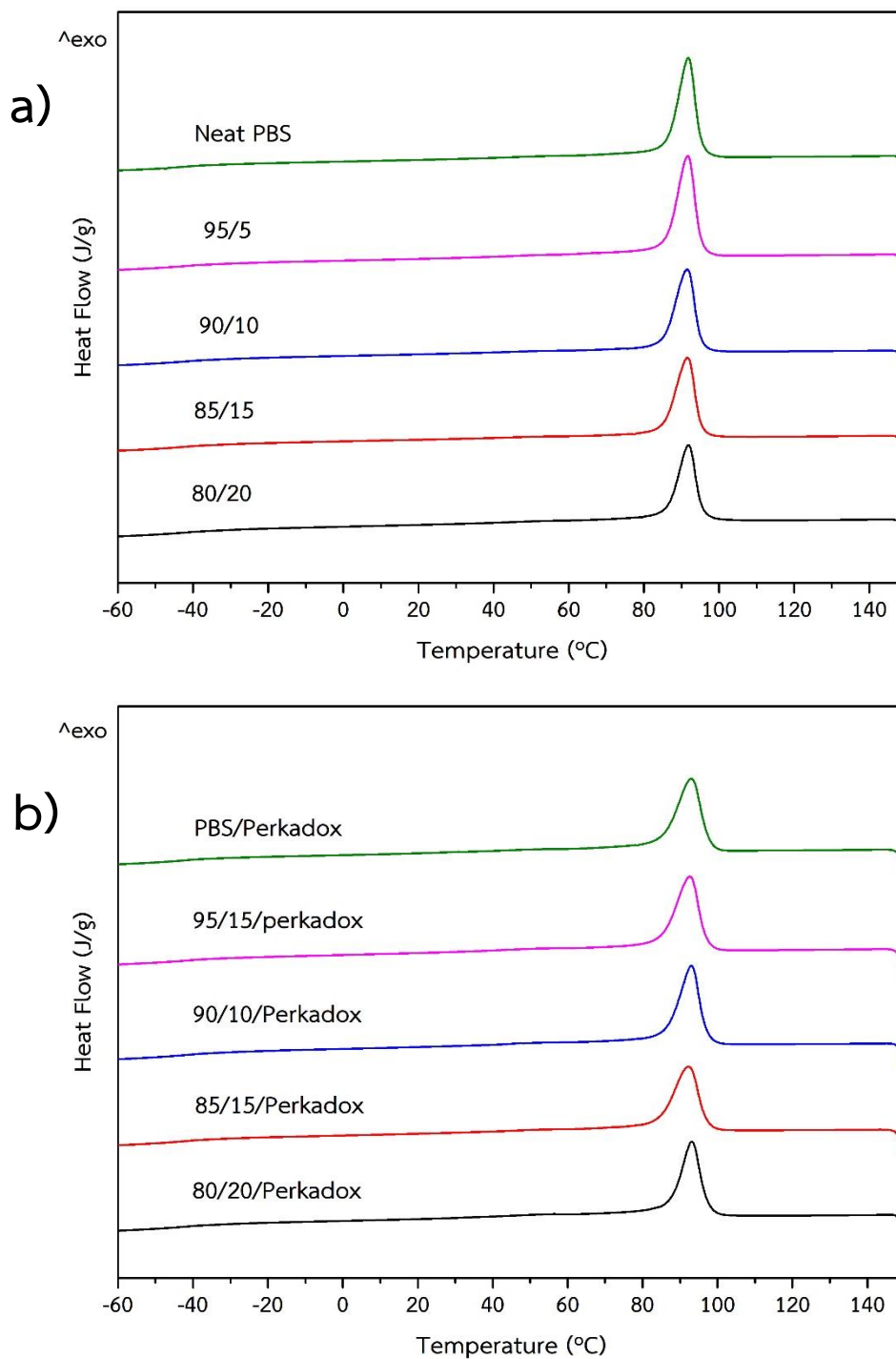
4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)

สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox ที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC ในโหมดให้ความร้อน-เย็นตัว-ให้ความร้อน ในช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 150 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลจากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองและขั้นตอนการทำให้เย็นตัว แสดงดังภาพที่ 4.17 - ภาพที่ 4.18 และแสดงเชิงตัวเลขไว้ในตารางที่ 4.2 พบว่าฟิล์ม PBS บริสุทธิ์ แสดงอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ที่ -33.95 องศาเซลเซียส และปรากฏช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ซึ่งมีลักษณะแยกเป็น 2 พีค คือพีคอุณหภูมิต่ำ (T_{m1}) ที่ประมาณ 107.43 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงการหลอมเหลวผลึกที่มีความสมบูรณ์น้อย และพีคอุณหภูมิสูง (T_{m2}) ที่ประมาณ 113.42 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงการหลอมเหลวผลึกอย่างสมบูรณ์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ในขั้นตอนการทำให้เย็นตัวด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที อาจทำให้ PBS เกิดการตกผลึกได้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง จึงแสดงพีคของการคายพลังงาน (exotherm) ซึ่งบ่งบอกถึงการมีบางส่วนที่ยังตกผลึกที่ไม่สมบูรณ์ จากนั้นเมื่อผลึกส่วนที่มีความสมบูรณ์น้อยนี้ได้รับความร้อนสูงขึ้นจะหลอมรวมกับผลึกที่เกิดขึ้นทั้งหมดอีกครั้ง (recrystallized) จึงทำให้พีคของการดูดความร้อน (endotherm) แสดงการหลอมผลึกอย่างสมบูรณ์

เมื่อพิจารณาผลของการเติม PBAT พบว่าการเติม PBAT ในปริมาณมากขึ้น จะทำให้ T_g มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจาก T_g ของ PBS และ PBAT มีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงเกิดการ overlap กัน ดังนั้นในระบบพอลิเมอร์ผสมนี้จึงพบค่า T_g เพียงค่าเดียว สำหรับอุณหภูมิในการเกิดผลึก (T_c) และ T_m ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เนื่องมาจากในขั้นตอนการทำให้เย็นตัวจะพบว่า PBAT ไม่ส่งผลต่อการตกผลึกของ PBS ทำให้วัฏภาคของ PBS เกิดผลึกที่อุณหภูมิใกล้เคียงกัน จึงทำให้ขนาดและรูปแบบของผลึกไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ผลึก ($\%X_c$) พบว่าการเติม PBAT ลงในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมปริมาณ 5 - 10 โดยน้ำหนัก PBAT เหนี่ยวนำให้ PBS สามารถเกิดผลึกได้มากขึ้น แต่เมื่อปริมาณการเติม PBAT มากขึ้น จะขัดขวางการเคลื่อนที่เข้ามาจัดเรียงตัวเป็นผลึกในวัฏภาคของ PBS ทำให้ความเป็นผลึกของ PBS ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง



ภาพที่ 4.17 DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง
ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT a) ไม่เติม Perkadox b) เติม Perkadox



ภาพที่ 4.18 DSC thermogram ในขั้นตอนการให้เย็นตัว
ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT a) ไม่เติม Perkadox b) เติม Perkadox

ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox สัดส่วนต่างๆ

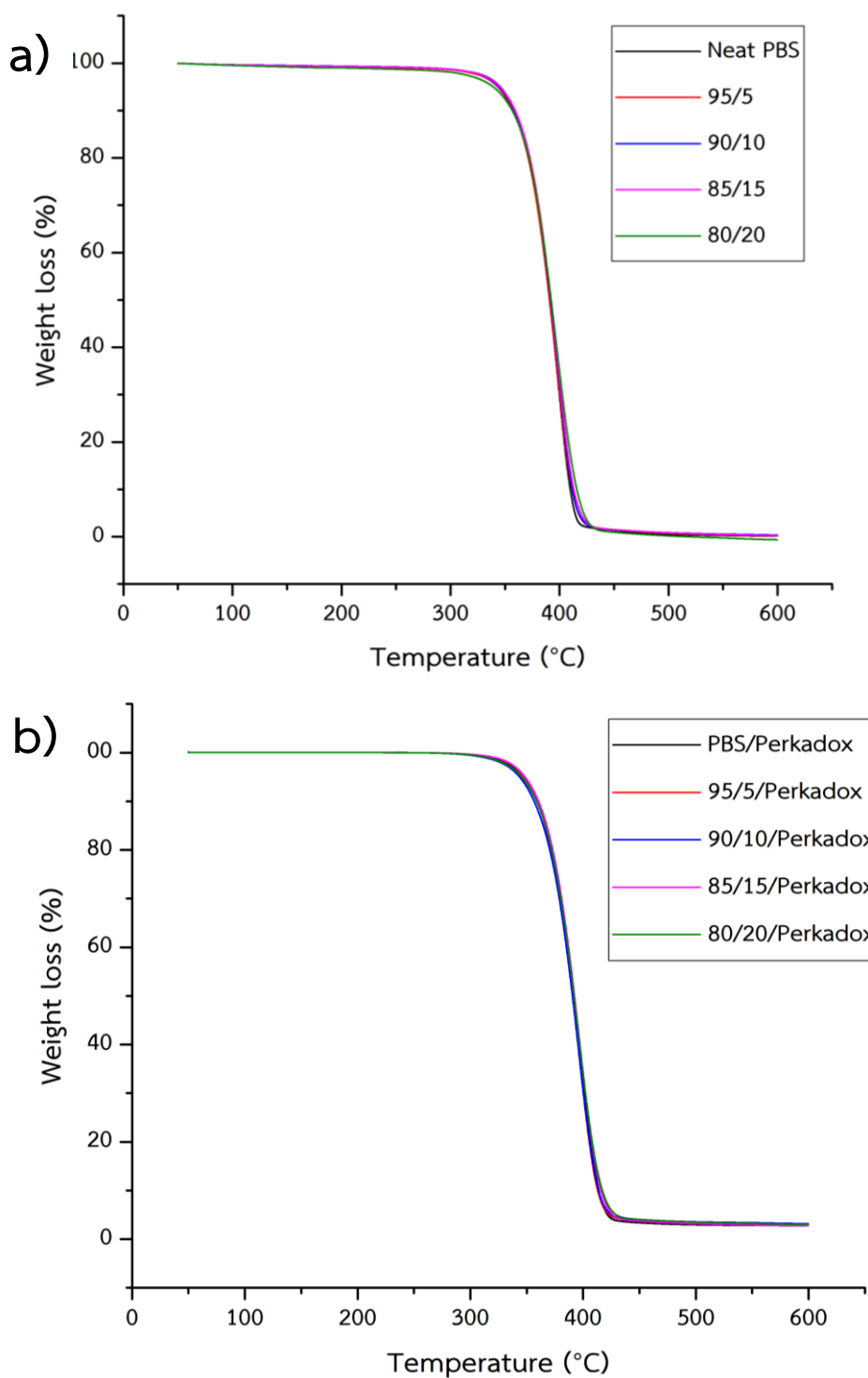
Sample	T_g (°C)	T_c (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
Neat PBS	-33.95	92.36	107.43	113.42	76.36	69.23
95/5	-32.92	92.20	108.35	113.77	75.41	71.97
90/10	-31.92	91.95	107.69	113.82	69.70	70.21
85/15	-31.66	92.10	107.62	113.65	64.59	68.89
80/20	-31.32	92.26	107.46	113.49	56.74	64.30
PBS/Perkadox	-33.11	93.41	108.52	113.44	74.19	67.26
95/5/Perkadox	-33.50	93.08	108.36	113.14	71.29	68.03
90/10/Perkadox	-31.77	93.44	108.07	113.41	68.21	69.71
85/15/Perkadox	-31.55	92.71	107.86	113.65	62.54	66.71
80/20/Perkadox	-31.17	93.59	108.40	113.42	59.13	67.01

เมื่อพิจารณาผลของการเติม Perkadox พบว่าการเติม Perkadox ลงในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม จะพบว่าไม่ส่งผลต่อ T_g และ T_m แต่จะส่งผลต่อ T_c ซึ่งจะพบว่ามีแนวโน้มเลื่อนไปทางที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติม Perkadox เริ่มเกิดผลึกได้ง่ายขึ้น เป็นผลมาจากสายโซ่โมเลกุลของ PBS สั้นลง จากการถูกตัดสายโซ่โดย Perkadox และในส่วนของ $\%X_c$ จะมีค่าแตกต่างจากฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติม Perkadox เล็กน้อย เนื่องมาจากการเติม Perkadox ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของ PBS บางส่วน อาจทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างสายโซ่ การที่สายโซ่โมเลกุลเกิดการเชื่อมโยงจะขัดขวางการจัดเรียงตัวเป็นผลึก เนื่องจากสายโซ่จะเคลื่อนที่ยากขึ้น ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ผลึกจึงลดลงเล็กน้อย

4.2.5 ผลการศึกษาเสถียรภาพความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ของฟิล์ม PBS บริสุทธิ์ และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox ถูกดำเนินการทดสอบภายใต้สภาวะไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 50 ถึง 600 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 °C/min โดยจะวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พารามิเตอร์ที่แสดงข้อมูลพฤติกรรมทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ได้แก่ อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการสลายตัวทางความร้อน (onset degradation temperature, T_{onset}) และอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนสูงสุด (degradation temperature, T_d) จะถูกรายงานไว้ในตารางที่ 4.3 และ ภาพที่ 4.19

โดยทั่วไป PBS และ PBAT จะมีกลไกในการสลายตัวทางความร้อนที่ตำแหน่งของหมู่เอสเทอร์ คือ C-O และ C-C บนสายโซ่หลัก (backbone) ของพอลิเมอร์ เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนักของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วนต่าง ๆ ที่เติมและไม่เติม Perkadox (ภาพที่ 4.19 a) และ b) ตามลำดับ) พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ทุกสัดส่วนการผสมแสดงการสลายตัวเพียงขั้นตอนเดียว โดยจะเริ่มเกิดการสลายตัวทางความร้อน (onset degradation temperature, T_{onset}) ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 370 ถึง 373 °C และจะเกิดการสลายตัวสูงสุด (degradation temperature, T_d) ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 398 ถึง 400 °C แสดงดังตารางที่ 4.3 การที่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมแสดงเสถียรภาพทางความร้อนที่ไม่แตกต่างกันเนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด คือ PBS และ PBAT มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ใกล้เคียงกันมาก นอกจากนี้การเติม Perkadox ลงในพอลิเมอร์ผสมไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบ TGA จะพบว่าฟิล์ม PBS และฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในทุกสัดส่วนมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงกว่า 300 °C แสดงให้เห็นว่ามีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี



ภาพที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนักที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค TGA a) फिल्मพอลิเมอร์ผสม PBS/PBAT b) फिल्मพอลิเมอร์ผสม PBS/PBAT/Perkadox

ตารางที่ 4.3 แสดงอุณหภูมิที่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมและเติม Perkadox สัดส่วนต่าง ๆ เริ่มเกิดการสลายตัวทางความร้อน (T_{onset}) และอุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนสูงสุด (T_d)

Sample	T_{onset} (°C)	T_d (°C)
Neat PBS	371.04	399.16
95/5	372.11	400.50
90/10	372.02	400.59
85/15	372.84	400.35
80/20	372.29	400.06
PBS/Perkadox	372.13	400.92
95/5/Perkadox	370.94	398.91
90/10/Perkadox	369.97	398.98
85/15/Perkadox	371.79	400.19
80/20/Perkadox	370.43	398.75

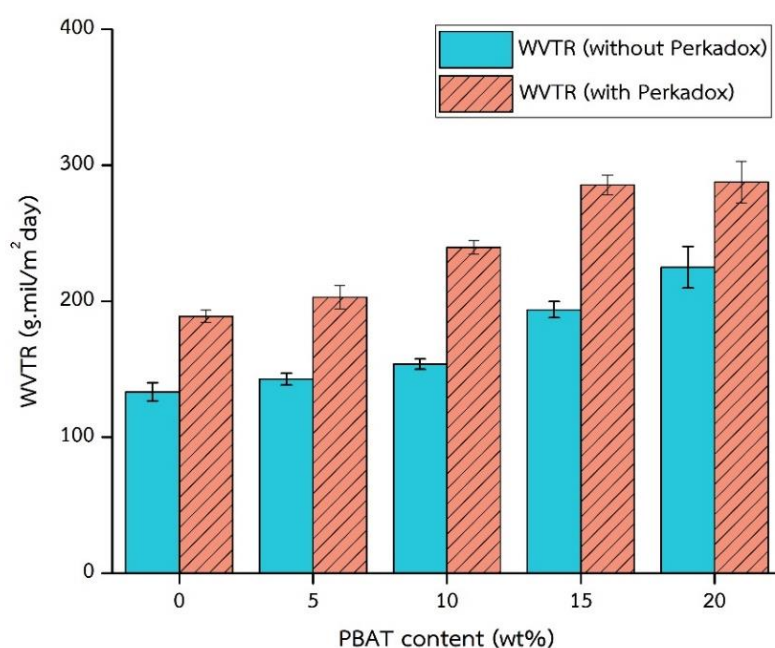
4.2.6 ผลการศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR)

การทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำนับได้ว่าเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟิล์มพลาสติกที่เกี่ยวข้องกับบรรจุภัณฑ์ด้านอาหาร ซึ่งฟิล์มพลาสติกจะต้องมีความสามารถในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำที่เหมาะสม เพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของอาหารให้นานขึ้น และคงสภาพของอาหารให้มี สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และคุณสมบัติอื่น ๆ ไม่ให้เปลี่ยนแปลงไปมากนัก เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในปัจจุบันที่เริ่มหันมาให้ความสำคัญกับคุณค่าทางอาหาร และคุณภาพความปลอดภัยของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการบรรจุอาหาร ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีการศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติมและเติม Perkadox สัดส่วนต่าง ๆ โดยค่าที่ได้จากการทดสอบถูกรายงานไว้ในภาพที่ 4.20 และแสดงข้อมูลเชิงตัวเลขไว้ในตารางที่ 4.4

จากผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox พบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์ม PBS บริสุทธิ์มีค่าต่ำกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วนอื่น ๆ เนื่องจาก PBS สามารถเกิดผลึกได้ง่ายและมีปริมาณผลึกสูง จึงขัดขวางการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี พิจารณาการเติม PBAT ลงในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในปริมาณมากขึ้น

พบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากไอน้ำสามารถเคลื่อนที่แพร่ผ่านวัฏภาคของ PBAT ได้ง่าย เนื่องจาก PBAT มีความเป็นอริสโตเมอร์คล้ายยาง ทำให้มีส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) มากกว่า PBS ไอน้ำจึงแพร่ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้ง่าย นอกจากนี้ ผลการทดสอบที่ได้ยังสอดคล้องกับผลการทดสอบค่ามัมสัมผัสน้ำที่ว่า เมื่อเติม PBAT ปริมาณมากขึ้นค่ามัมสัมผัสน้ำจะมีค่าลดลง หรือมีความชอบน้ำมากขึ้น ดังนั้นอัตราการซึมผ่านของไอน้ำจึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

พิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่มีการเติม Perkadox พบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เติม Perkadox จากการเติม Perkadox ทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของ PBS บริสุทธิ์ และ PBS/Perkadox เพิ่มขึ้นจาก 133.29 เป็น 188.94 $\text{g}\cdot\text{mil}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ ซึ่งเพิ่มขึ้นถึง 41.75 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลมาจากการเติม Perkadox จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่โมเลกุล PBS จึงส่งผลให้มีจำนวนหมู่ปลายสายโซ่ที่มีขั้วมากขึ้น น้ำจึงสามารถดูดซับที่พื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้ง่าย นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติม PBAT ในปริมาณมากขึ้นอัตราการซึมผ่านของไอน้ำจะมีค่ามากขึ้น เหตุผลเช่นเดียวกันกับที่กล่าวไว้ข้างต้น



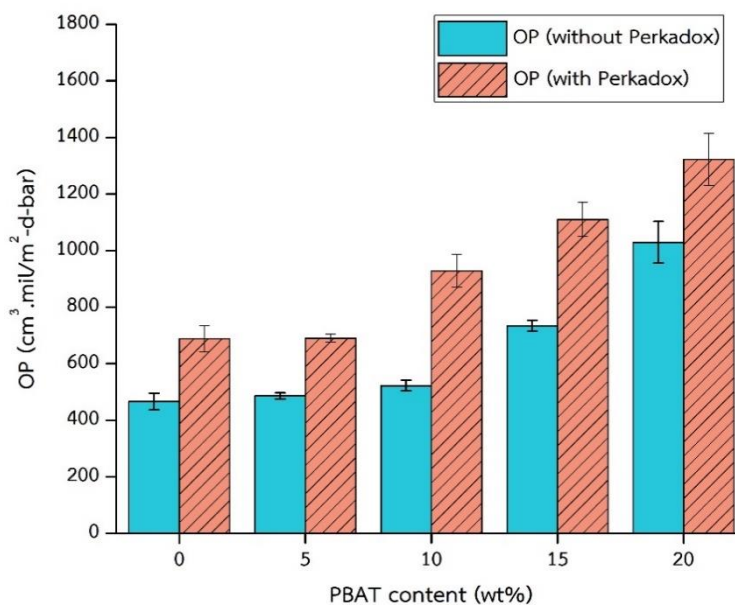
ภาพที่ 4.20 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติมและไม่เติม Perkadox

4.2.7 ผลการศึกษาอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Oxygen Permeability, OP)

การทดสอบอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนถือเป็นการทดสอบอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับวัสดุบรรจุภัณฑ์ทางด้านอาหาร ในแง่ของการปกป้องอาหารจากสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ วัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ดีควรมีค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนที่เหมาะสม จะช่วยชะลอการหายใจ การคายน้ำ ทำให้ยืดอายุอาหารและเก็บรักษาได้ยาวนานมากขึ้น โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์อาหารที่ไวต่อออกซิเจน เช่น ผัก ผลไม้ และเนื้อสด เป็นต้น สำหรับหลักการในการซึมผ่านของแก๊สผ่านฟิล์มจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยขั้นตอนสำคัญ 4 ขั้นตอน เริ่มจากโมเลกุลของแก๊สออกซิเจนเกิดการดูดซับ (sorption) บนพื้นผิวของฟิล์ม หลังจากนั้นจะเกิดการละลาย (dissolution) ของแก๊สออกซิเจนบนเนื้อฟิล์ม ขั้นตอนต่อไปโมเลกุลของแก๊สจะเกิดการแพร่ (diffusion) ผ่านฟิล์ม โดยจะแพร่ผ่านส่วนที่เป็น amorphous ในเนื้อพอลิเมอร์ และเกิดการคายซับ (desorption) โมเลกุลของแก๊สที่ผิวหน้าอีกด้านหนึ่งของฟิล์ม

สำหรับการทดสอบอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่จะส่งผลกระทบต่อค่าที่ได้จากการทดสอบ คือ ความหนาของฟิล์ม ดังนั้นจึงต้องทำการ normalised เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบ โดยตัดปัจจัยเรื่องความหนาของฟิล์มออกไปได้ ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 4.21 และตารางที่ 4.4

พิจารณาอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติม Perkadox พบว่าฟิล์ม PBS บริสุทธิ์ มีอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนต่ำ หลังจากทำการผสมกับ PBAT ทำให้อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณการเติม PBAT ที่มากขึ้น เนื่องจากปริมาณการเติม PBAT มากขึ้น ทำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีส่วนที่เป็นอสัณฐานมากขึ้น โมเลกุลของแก๊สออกซิเจนจึงสามารถแพร่ผ่านได้มากขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และเมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติม Perkadox พบว่าการเติม Perkadox ทำให้อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่เติม Perkadox เหตุผลของการเพิ่มขึ้นนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่ว่า การเติม Perkadox จะทำให้เกิดจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่โมเลกุล PBS จึงส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีหมู่ปลายสายโซ่มากขึ้น ทำให้มีปริมาตรอิสระ (free volume) เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้โมเลกุลของแก๊สสามารถแพร่ผ่านในเนื้อฟิล์มพอลิเมอร์ได้มากขึ้น จึงนำไปสู่อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox มีอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนสูงที่สุด ดังนั้นในสัดส่วนนี้จะมีสมบัติการต้านทานการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนต่ำกว่าสัดส่วนอื่น ๆ



ภาพที่ 4.21 อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox

ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สออกซิเจนเฉลี่ยที่ผ่านการ normalised และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox

Sample	WVTR _{normalised} (g·mil/m ² ·day)	OP (cm ³ ·mil/m ² ·d·bar)
Neat PBS	133.29±6.62	466.19±29.34
95/5	142.74±4.35	486.18±10.63
90/10	153.64±3.73	522.25±18.83
85/15	193.68±6.00	733.98±19.56
80/20	224.88±15.29	1029.30±73.16
PBS/Perkadox	188.94±4.40	688.01±45.67
95/5/Perkadox	202.93±8.68	690.23±14.19
90/10/Perkadox	239.61±5.15	928.65±58.90
85/15/Perkadox	285.49±7.30	1109.90±60.61
80/20/Perkadox	287.48±15.32	1322.16±91.54

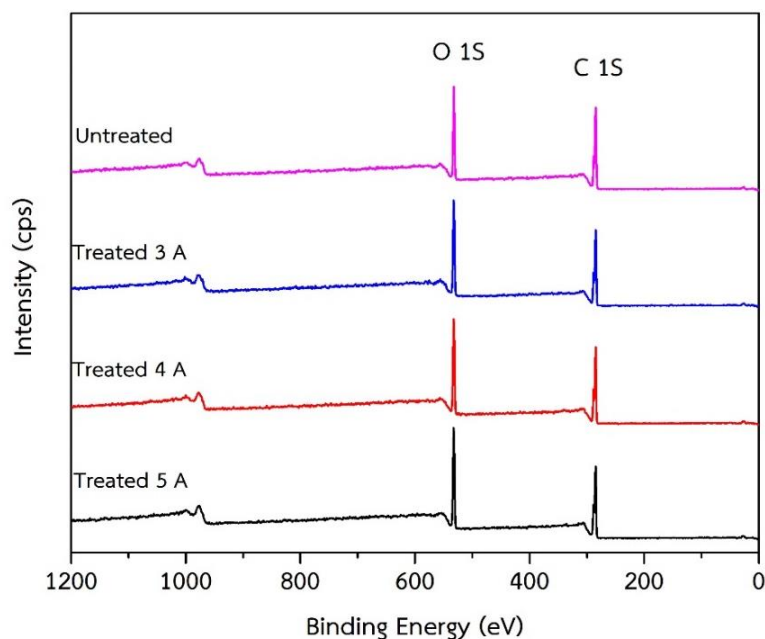
4.3 การศึกษาผลของการเคลือบผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย

จากผลการทดลองในส่วนที่ 2 การศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox มีลักษณะทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และค่ามัมสัมผัสน้ำที่เหมาะสม ดังนั้นในส่วนที่ 3 จึงเลือกฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในสัดส่วนดังกล่าวมาทำการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะของสารต้านทานแบคทีเรีย โดยฟิล์มที่ปรับปรุงพื้นผิวที่จะถูกเคลือบด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย ได้แก่ อนุภาคซิงค์ออกไซด์ หรือโคโตซานที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 1 และ 2 %w/v จากนั้นจะทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิว ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติการกั้นผ่านของออกซิเจน อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ค่ามัมสัมผัสน้ำ สมบัติเคมีที่ผิว สมบัติทางความร้อน ลักษณะสัญญาณวิทยา สมบัติการต่อต้านแบคทีเรีย และความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร

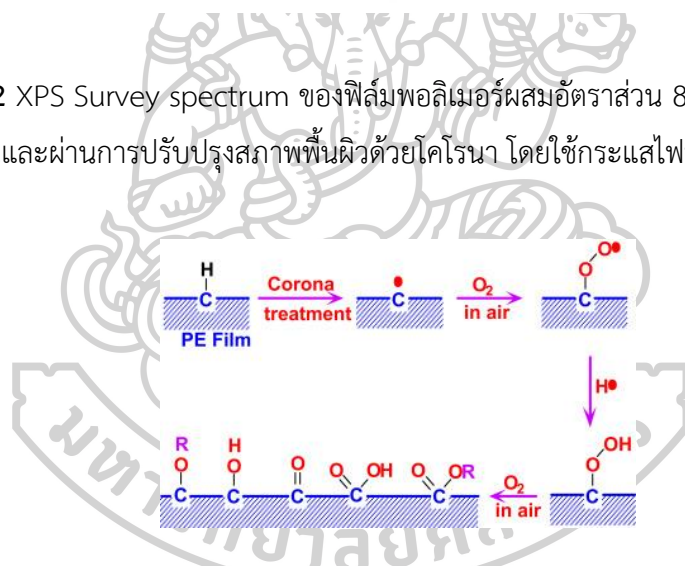
4.3.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบเคมีที่พื้นผิวด้วยเทคนิค X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)

ผลการศึกษาองค์ประกอบเคมีที่พื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา โดยใช้กระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน คือ 3 4 และ 5 แอมแปร์ จะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS โดยจากภาพที่ 4.22 แสดง XPS survey spectrum ที่ได้จากการทดสอบ พบว่าสเปกตรัมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทั้งที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนาจะปรากฏพีคหลัก 2 พีค คือที่ตำแหน่ง 285 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นพีค C 1s แสดงการมีอยู่ของพันธะคาร์บอน C-C/C-H และ 533 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นพีค O 1s แสดงการมีอยู่ของพันธะออกซิเจน C-O/C-OH/C=O เนื่องจากโครงสร้างของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมประกอบด้วยคาร์บอนและออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก [36]

ในขณะที่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้รับการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา ซึ่งมีความต่างศักย์และความถี่สูง โมเลกุลและพื้นผิวของฟิล์มจะเกิดการออกซิไดซ์ (oxidize) จากการที่พลังงานกระตุ้นให้ออกซิเจนในอากาศเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระของออกซิเจน (O^{\bullet}) 2 อะตอม โดย O^{\bullet} ส่วนหนึ่งจะรวมกับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นแก๊สโอโซน (O_3 gas) และอีกส่วนหนึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยาการตัดสายโซ่โมเลกุลที่พื้นผิวของพอลิเมอร์ โดยจากงานวิจัยของคุณ Khang [50] ได้รายงานหมู่ฟังก์ชันที่มีโอกาสเกิดขึ้นจากการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาของพอลิเอทิลีน (PE) คือ C=O, C-O, COOH, COOR, COH หรือ COR เป็นต้น แสดงภาพที่ 4.23



ภาพที่ 4.22 XPS Survey spectrum ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา โดยใช้กระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.23 กระบวนการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนาและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น [50]

ในส่วนของตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนอะตอมระหว่างคาร์บอนต่อออกซิเจน (O/C ratio) พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา โดยใช้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ มีอัตราส่วนอะตอมระหว่าง O/C มากที่สุด เนื่องจากในขั้นตอนการปรับปรุงสภาพพื้นผิวเมื่ออนุมูลอิสระของออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาตัดสายโซ่ที่พื้นผิวของฟิล์ม จะทำให้มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วเกิดขึ้น ส่งผลให้หลังผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนาพื้นผิวของฟิล์มจะมีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วมากขึ้น แต่เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 4 และ 5 แอมแปร์ อัตราส่วนอะตอมระหว่าง O/C มีแนวโน้มลดลง เป็นผลมาจากการใช้กระแสไฟฟ้าที่สูงเกินไป อาจทำให้พื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

เกิดการสลายตัวทางความร้อน จากการใช้กระแสไฟฟ้าจนถึงสภาวะที่เกิดการอิ่มตัว (saturation state) จะมีการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ไปเป็นดีคาร์บอกซีเลชัน (decarboxylation) โดยจะมีการปลดปล่อยโมเลกุลของสารระเหย (volatile species) เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกมา จึงทำให้หมู่ฟังก์ชันที่มีจำนวนพันธะ เช่น หมู่ C-O, C=O และ C-O-O ลดลงตามไปด้วย [21]

ตารางที่ 4.5 แสดงองค์ประกอบทางเคมี และอัตราส่วนอะตอมของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา โดยใช้กระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน

Sample	Chemical composition		Atomic ratio
	%O	%C	O/C
Untreated	24.45	75.55	0.324
Treated 3 A	27.56	72.44	0.380
Treated 4 A	26.86	73.14	0.367
Treated 5 A	26.45	73.55	0.360

ดังนั้นจากการทดสอบ XPS จะพบว่าฟิล์มที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา โดยใช้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ จะมีอัตราส่วน O/C มากที่สุด ในลำดับถัดไปจะนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ที่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา โดยใช้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ ไปทำการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย และศึกษาสมบัติต่าง ๆ ต่อไป

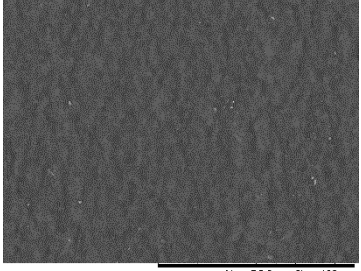
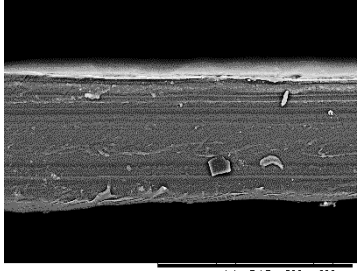
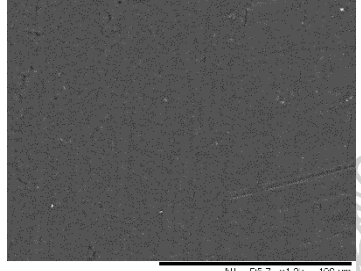
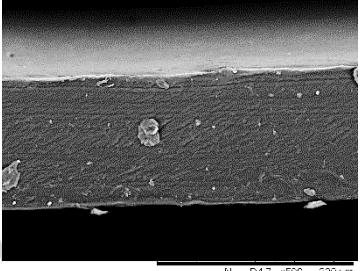
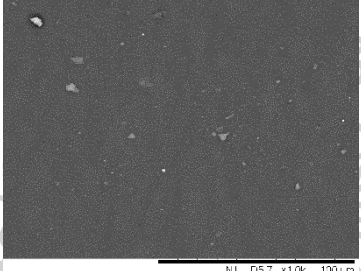
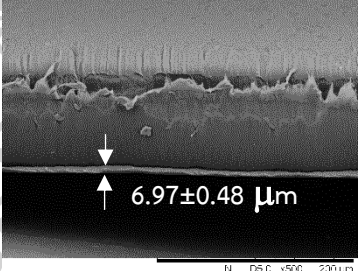
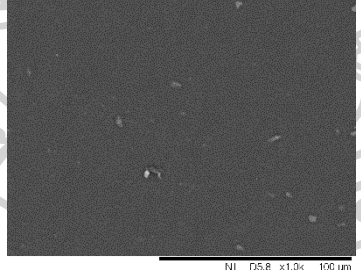
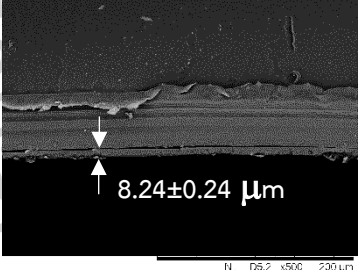
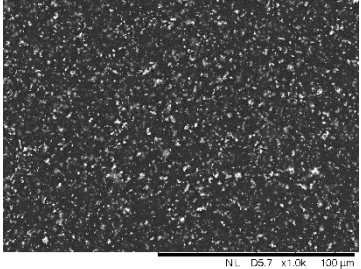
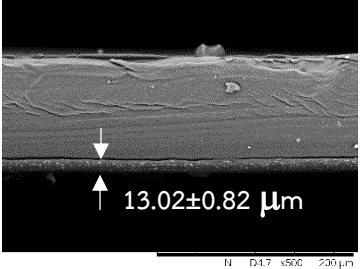
4.3.2 ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่าน

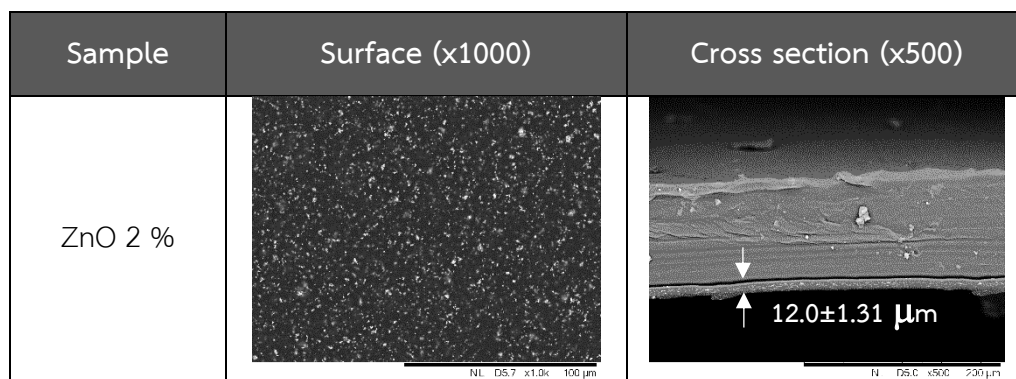
การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่าน และผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย โดยจะควบคุมความหนาในการเคลือบเท่ากับ 50 ไมโครเมตร หลังจากเคลือบและปล่อยให้แห้งแล้ว จะทำการวัดความหนาของชั้นเคลือบที่เหลือ แสดงดังภาพที่ 4.24

จากภาพที่ 4.24 เมื่อพิจารณาผลของการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา โดยใช้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ (Treated 3 A) พบว่าพื้นผิวของฟิล์มแสดงลักษณะที่ราบเรียบ เช่นเดียวกันกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา (Untreated) และเมื่อสังเกตภาคตัดขวางของทั้ง Untreated และ Treated 3 A จะพบว่าปรากฏเพียงชั้นของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเท่านั้น ซึ่งจะใช้ในการเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ทำการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

พิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบผิวด้วยโคโตซาน พบว่าการเคลือบผิวด้วยโคโตซาน 1 และ 2 %w/v จะแสดงพื้นผิวที่ราบเรียบคล้ายคลึงกับพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ถูกเคลือบด้วยโคโตซาน ส่วนภาคตัดขวางจะพบชั้นของโคโตซานมีความหนาเท่ากับ 6.97 และ 8.42 ไมโครเมตร ซึ่งมีความหนาลดลงจากการปาดเคลือบ 86.06 และ 83.52 % ตามลำดับ โดยความหนาจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโคโตซานที่ใช้ แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เคลือบด้วยโคโตซาน 2 %w/v จะมีปริมาณโคโตซานที่ติดอยู่บนพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมากกว่า 1 %w/v

สำหรับผลของการเคลือบผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ จะพบการกระจายตัวของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ทั่วพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสมทั้งความเข้มข้น 1 และ 2 %w/v และเมื่อทำการวัดความหนาของชั้นเคลือบ (coating layer) จะมีความหนาเป็น 13.02 และ 12.0 ไมโครเมตร โดยมีความหนาลดลงจากการปาดเคลือบ 73.96 และ 76 % ตามลำดับ ซึ่งจะมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากอนุภาคซิงค์ออกไซด์ถูกกระจายตัวอยู่ใน PVA ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลาง โดยจะควบคุมความหนืดของ PVA ทั้ง 1 และ 2 %w/v ให้เท่ากัน ดังนั้นเมื่อปาดสารเคลือบลงบนพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม จึงทำให้ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบด้วยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ไม่แตกต่างกัน

Sample	Surface (x1000)	Cross section (x500)
Untreated		
Treated 3 A		
Chitosan 1 %		
Chitosan 2 %		
ZnO 1 %		



ภาพที่ 4.24 ภาพถ่ายที่ได้จากเทคนิค SEM แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย ได้แก่ ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 500 เท่า และพื้นผิวที่กำลังขยาย 1000 เท่า

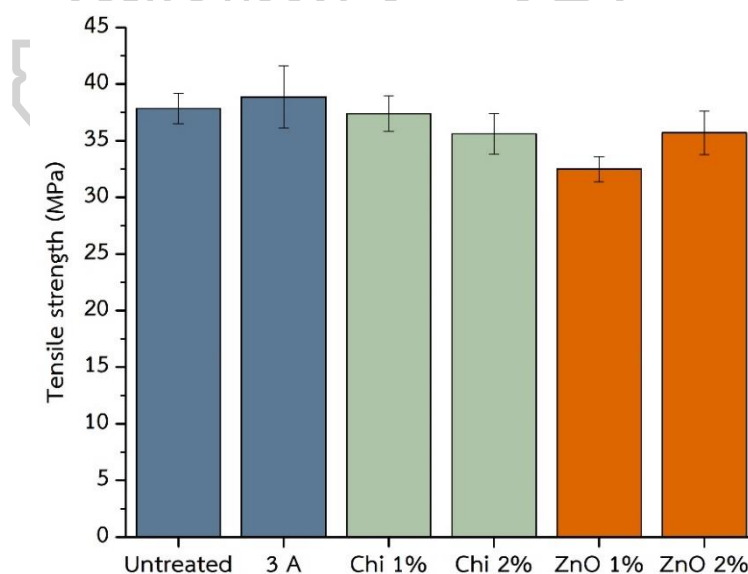
4.3.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการเคลือบผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย ได้แก่ โคโตซาน หรืออนุภาคซิงค์ออกไซด์ ความเข้มข้น 1 และ 2 %w/v แสดงดังภาพที่ 4.25 - ภาพที่ 4.27 และแสดงเชิงตัวเลขไว้ในตารางผนวก ก.5

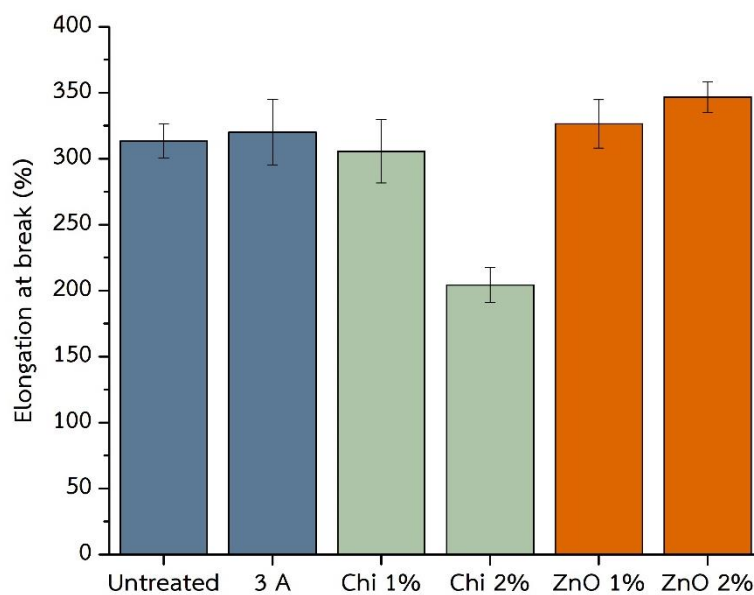
จากการศึกษาความแข็งแรงต่อการดึงยึด (Tensile strength) และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวก่อนการแตกหัก (%Elongation at break) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา พบว่ามีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล ถึงแม้ว่าผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจะมีการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วที่พื้นผิวก็ตาม เมื่อนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา โดยใช้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ มาทำการเคลือบผิวด้วยสารละลายโคโตซาน พบว่าการเคลือบผิวด้วยโคโตซานความเข้มข้น 1 %w/v ไม่ส่งผลต่อค่า Tensile strength และ %Elongation at break ในทางกลับกันการเคลือบผิวด้วยโคโตซานความเข้มข้น 2 %w/v กลับทำให้ค่า %Elongation at break ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ทำการเคลือบ อาจเป็นผลมาจากชั้นเคลือบโคโตซานที่หนาขึ้น ทำให้ชั้นเคลือบยึดตรึงการยืดตัวของฟิล์ม ก่อให้เกิดภาวะการสะสมแรงเค้นที่จุดรอยต่อของชั้นเคลือบและผิวฟิล์ม จนทำให้เกิดฟิล์มขาดออกจากกันได้ง่าย โดยไม่เกิดการหลุดของชั้นเคลือบในระหว่างการทดสอบ และเมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบผิวด้วยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ พบว่าค่า Tensile strength ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ความเข้มข้น 2 %w/v จะมีค่าสูงกว่า 1 %w/v เล็กน้อย เนื่องจากมีอนุภาคซิงค์ออกไซด์เคลือบติดบนผิวมากขึ้น ส่วน

%Elongation at break จะมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว

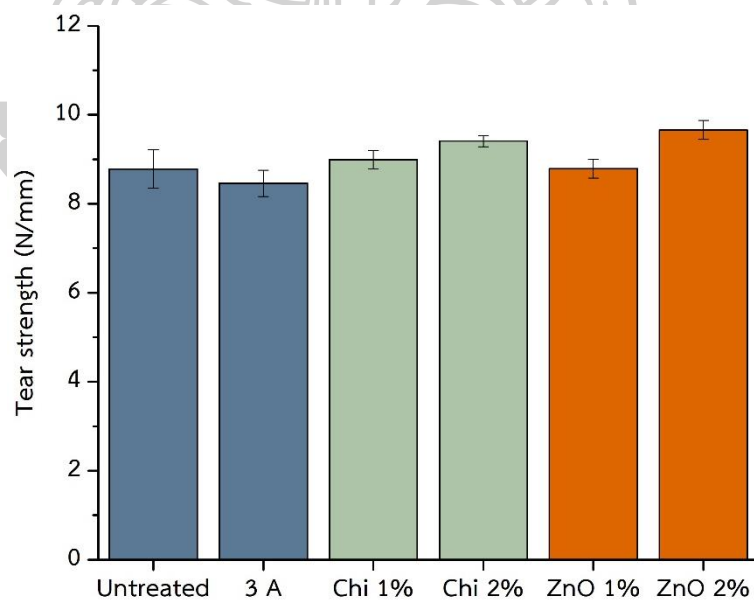
จากผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) แสดงดังภาพที่ 4.27 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนาโดยใช้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ ส่งผลต่อค่า tear strength อย่างไม่มีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา เนื่องจากการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาจะส่งผลเพียงแค่พื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเท่านั้น แต่ไม่ส่งผลต่อเนื้อฟิล์มพอลิเมอร์ภายใน เช่นเดียวกันกับการเคลือบผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย 2 ชนิด ทั้งไคโตซานและอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 %w/v ไม่ส่งผลต่อค่า tear strength แต่ในทางกลับกันการเคลือบผิวโดยใช้ความเข้มข้น 2 %w/v ส่งผลทำให้ tear strength มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยในกรณีของไคโตซาน เป็นผลมาจากการมีความหนาของชั้นไคโตซานที่เคลือบติดบนพื้นผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น โดยการมีไคโตซานมากขึ้นจะทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น จึงต้านทานต่อการฉีกขาดได้ดี ส่วนในกรณีของซิงค์ออกไซด์ พบว่าความหนาของชั้นเคลือบไม่แตกต่างกันมากนัก ถึงแม้จะใช้ปริมาณของอนุภาคซิงค์ออกไซด์แตกต่างกัน แสดงว่าชั้นเคลือบอนุภาคซิงค์ออกไซด์ 2 %w/v มีปริมาณอนุภาคซิงค์ออกไซด์กระจายในชั้นเคลือบมากกว่า จึงขัดขวางการฉีกขาดของชั้นเคลือบจากการเพิ่มความแข็งแรงเล็กน้อยให้แก่ชั้นเคลือบที่ใช้ PVA เป็นตัวกลางของการเคลือบอนุภาคชนิดนี้



ภาพที่ 4.25 ความแข็งแรงต่อการดึงยึดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย



ภาพที่ 4.26 เปอร์เซ็นต์การยืดตัวก่อนการแตกหักของของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย



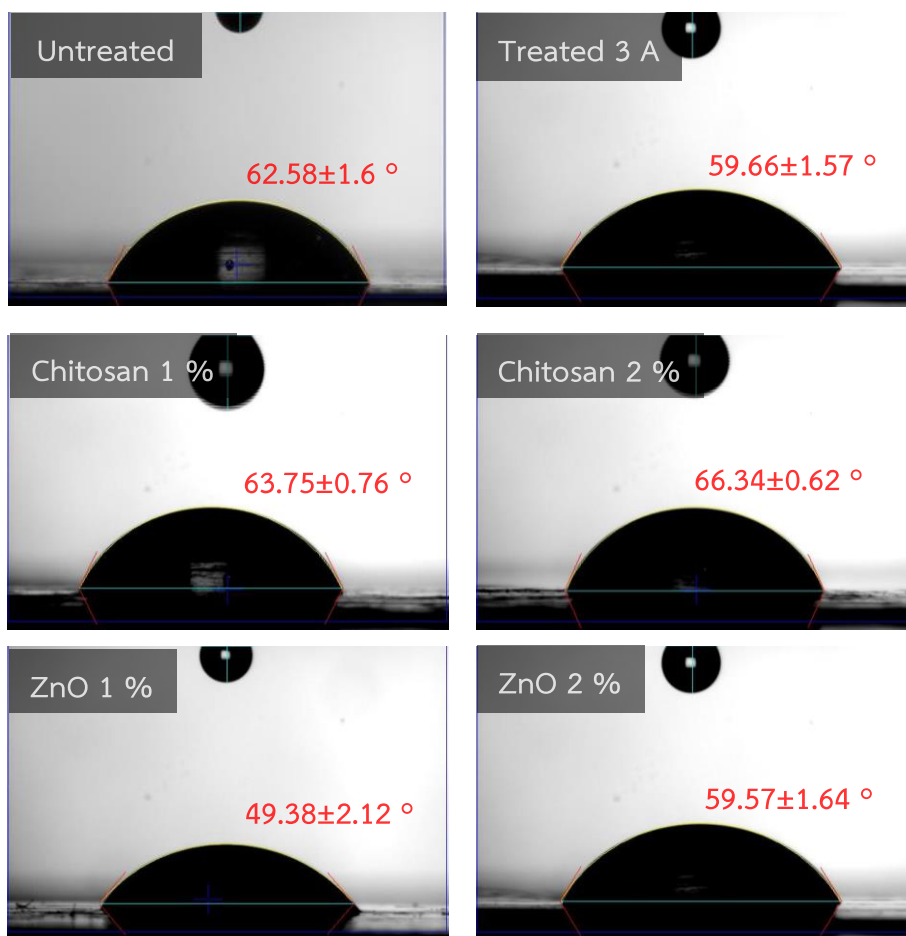
ภาพที่ 4.27 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย

4.3.4 ผลการศึกษาค่ามุมสัมผัสน้ำ (Water contact angle)

ค่ามุมสัมผัสน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา โดยใช้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ และฟิล์มที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย คือ ไคโตซาน หรืออนุภาคซิงค์ออกไซด์ ปริมาณ 1 และ 2 %w/v แสดงดังภาพที่ 4.28 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวแสดงค่ามุมสัมผัสน้ำ 62.58° หลังจากนำไปผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิว ทำให้ค่ามุมสัมผัสน้ำลดลงเหลือ 59.66° เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว ส่งผลให้มีฟิล์มพอลิเมอร์ผสมหลังผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนามีความชอบน้ำมากขึ้น

เมื่อพิจารณาค่ามุมสัมผัสน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไคโตซานปริมาณ 1 และ 2 %w/v แสดงค่ามุมสัมผัสน้ำเป็น 63.75° และ 66.34° ตามลำดับ ซึ่งมุมสัมผัสน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิว สอดคล้องกับงานวิจัยของคุณ Cholwasa Bangyekan และคณะ [51] ได้ทำการศึกษาการเคลือบผิวด้วยสารละลายไคโตซาน ความเข้มข้นแตกต่างกันลงบนฟิล์มที่ทำจากแป้ง (starch) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายไคโตซานมากขึ้น ทำให้ค่ามุมสัมผัสน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากผิวของฟิล์มที่เคลือบด้วยไคโตซานมีความเป็น hydrophobic มากขึ้น เนื่องจากการมีอยู่ของหมู่อะซิโตนสายโซ่หลัก ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันไม่มีขั้วที่หลีกเลี่ยงการเปลี่ยนโคตินเป็นไคโตซาน อีกทั้งการมีปริมาณไคโตซานที่ติดบนผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น จะทำให้พื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้นอีกด้วย

สำหรับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 1 และ 2 %w/v แสดงค่ามุมสัมผัสน้ำเป็น 49.38° และ 59.66° ตามลำดับ ซึ่งค่ามุมสัมผัสน้ำลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิว เนื่องจากอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ถูกแขวนลอยอยู่พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เมื่อนำไปเคลือบบนฟิล์มจึงกลายเป็นชั้นฟิล์ม PVA ซึ่งมีความเป็นขั้วสูง จึงมีความสามารถในการเปียกผิวที่ดี แต่เมื่อปริมาณของอนุภาคซิงค์ออกไซด์เพิ่มจาก 1 เป็น 2 %w/v กลับทำให้ค่ามุมสัมผัสน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีอนุภาคซิงค์ออกไซด์มากขึ้น จึงทำให้พื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีความขรุขระเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่ามุมสัมผัสน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการเคลือบด้วยไคโตซานและอนุภาคซิงค์ออกไซด์ จะพบว่าค่ามุมสัมผัสน้ำของฟิล์มที่เคลือบด้วยอนุภาคซิงค์ออกไซด์มีค่ามากกว่า เป็นผลมาจาก PVA สามารถละลายในน้ำได้ จึงคาดว่ามีความเป็นขั้วใกล้เคียงกับน้ำมากกว่าไคโตซานซึ่งละลายในกรดอ่อน

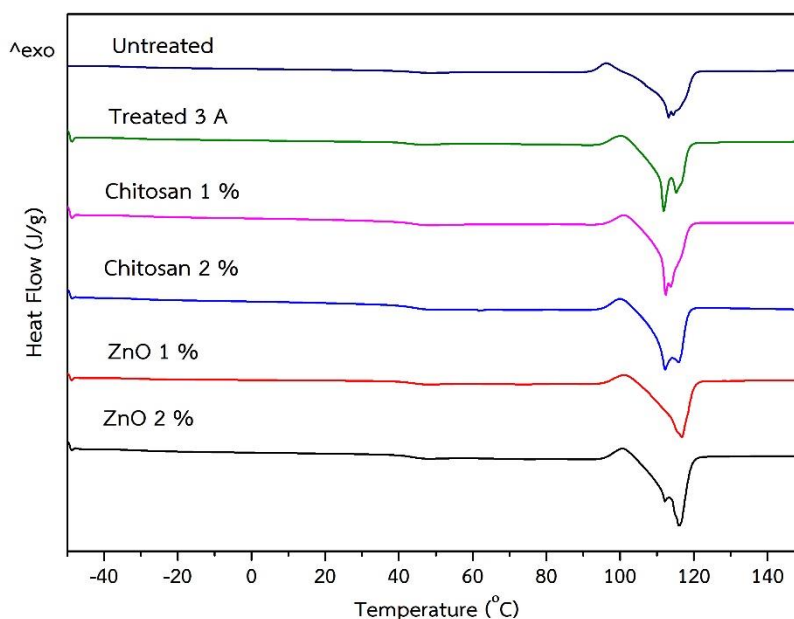


ภาพที่ 4.28 ความมุมสัมผัสของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Prkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

4.3.5 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)

สมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย จะได้จากทดสอบด้วยเทคนิค DSC ในโหมดให้ความร้อน-เย็นตัว-ให้ความร้อน ที่ช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 150 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 แสดงดังภาพที่ 4.29 และแสดงเชิงตัวเลขไว้ในตารางที่ 4.6

จากการศึกษา พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมหลังผ่านการปรับปรุงสภาพผิว ไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน เนื่องจากการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเพียงแค่นบนพื้นผิวของฟิล์มเท่านั้น ส่วนสารต้านทานแบคทีเรียที่ใช้ในการเคลือบผิว ไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนเช่นกัน



ภาพที่ 4.29 DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

ตารางที่ 4.6 แสดงสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

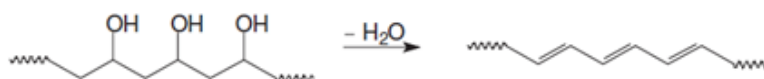
Sample	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
Untreated	-31.01	96.15	112.89	114.23	44.64	34.40
Treated 3 A	-31.03	100.15	111.45	114.87	40.31	31.06
Chitosan 1 %	-31.62	100.96	112.08	113.45	40.48	31.19
Chitosan 2 %	-31.03	99.96	111.79	115.48	38.68	29.81
ZnO 1 %	-31.49	100.99	-	116.53	37.04	28.54
ZnO 2 %	-31.12	100.64	111.88	115.60	40.23	31.00

4.3.6 ผลการศึกษาเสถียรภาพความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย จะถูกดำเนินการทดสอบภายใต้สภาวะไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 50 ถึง 600 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 °C/min พารามิเตอร์ที่แสดงข้อมูลพฤติกรรมทางความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการสลายตัวทางความร้อน (onset degradation temperature, T_{onset}) อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนสูงสุด (degradation temperature, T_d) และเปอร์เซ็นต์ตกค้าง (%Residue) จะถูกรายงานไว้ในภาพที่ 4.31 และตารางที่ 4.7

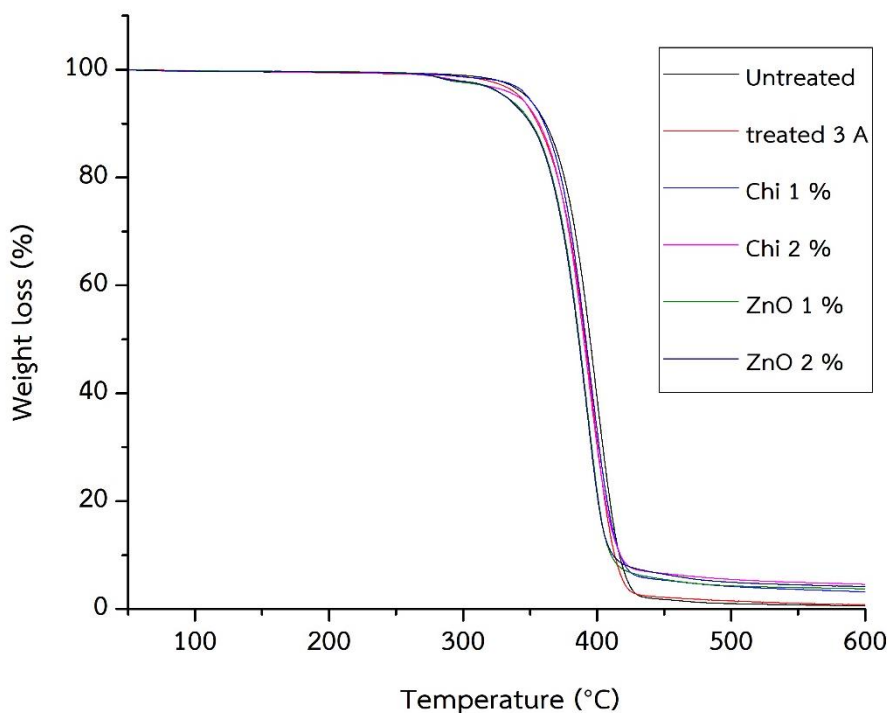
จากผลการศึกษา พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาจะแสดงอุณหภูมิ T_{onset} , T_d และ %Residue แตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากกระบวนการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนมากนัก หลังจากนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนามาเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย พบว่าทั้งไคโตซานและอนุภาคซิงค์ออกไซด์มีอุณหภูมิ T_{onset} และ T_d ลดลง แต่ %Residue เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบผิวด้วยไคโตซาน 1 และ 2 %w/v จะมี T_{onset} ปรากฏที่ 369.42 และ 368.54 °C ตามลำดับ และ T_d ปรากฏที่ 397.12 และ 395.66 °C ตามลำดับ เมื่อสังเกตจากภาพที่ 4.32 กราฟ DTG จะปรากฏพีคในช่วงอุณหภูมิประมาณ 280 – 300 °C คาดว่าเป็นอุณหภูมิที่ไคโตซานสลายตัวทางความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hafida Ferfera-Harra และคณะ [52] ได้รายงานอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงสุดของไคโตซานเท่ากับ 298 °C ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของไคโตซานบนสายโซ่หลัก จึงเหินยวนำให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบผิวด้วยไคโตซานมี T_{onset} และ T_d ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย (untreated) โดยการเคลือบผิวด้วยไคโตซาน 1 และ 2 %w/v จะมีน้ำหนักเหลืออยู่ที่ 4.18 และ 5.56 % ตามลำดับ เนื่องมาจากไคโตซานเมื่อสลายตัวทางความร้อนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของคาร์บอน ออกซิเจน และไนโตรเจน ซึ่งน้ำหนักจะเหลือมากขึ้นตามความเข้มข้นไคโตซานที่เพิ่มขึ้น

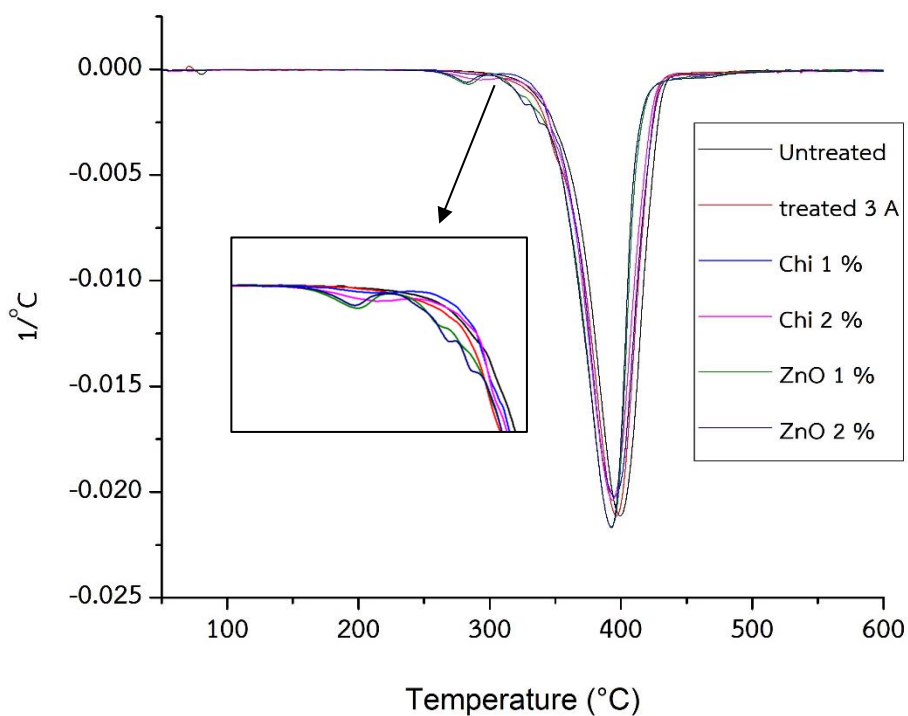


ภาพที่ 4.30 การสลายตัวทางความร้อนของ PVA [53]

พิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบผิวด้วยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ 1 และ 2 %w/v จะปรากฏ T_{onset} ที่อุณหภูมิ 365.90 และ 365.76 °C ตามลำดับ และ T_d ที่อุณหภูมิ 395.04 และ 393.15 °C ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ untreated โดยจากภาพที่ 4.32 กราฟ DTG จะปรากฏพีคที่อุณหภูมิประมาณ 280 °C คาดว่าเป็นผลมาจากตัวกลางในการเคลือบผิว คือ PVA มีการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิดังกล่าว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Haigang Yang และคณะ [53] จึงทำให้ T_{onset} มีค่าลดลง โดยปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของ PVA จะได้ผลพลอยได้ (by product) ส่วนหนึ่งเป็นน้ำ ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเกิดการสลายตัวแบบ hydrolysis แสดงดังภาพที่ 4.30 ดังนั้นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจะมีอุณหภูมิ T_d ต่ำลง และจะพบว่าการเคลือบผิวด้วยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ 1 และ 2 %w/v มี Residue เท่ากับ 4.29 และ 4.98 % ตามลำดับ โดยคาดว่าจะป็นอนุภาคซิงค์ออกไซด์ซึ่งไม่สลายตัวในช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา (สลายตัวที่อุณหภูมิมากกว่า 600 °C) ซึ่งจะมี %Residue มากขึ้นตามความเข้มข้นของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเปอร์เซ็นต์การหายไปของน้ำหนักที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค TGA ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย



ภาพที่ 4.32 กราฟ DTG ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

ตารางที่ 4.7 แสดงอุณหภูมิที่ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรียเริ่มเกิดการสลายตัวทางความร้อน (T_{onset}) อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนสูงสุด (T_d) และเปอร์เซ็นต์ตกค้าง (%Residue)

Sample	T_{onset} (°C)	T_d (°C)	Residue (%)
Untreated	373.81	401.02	0.98
Treated 3 A	370.79	399.69	1.45
Chitosan 1 %	369.42	397.12	4.18
Chitosan 2 %	368.54	395.66	5.56
ZnO 1 %	365.90	395.04	4.29
ZnO 2%	365.76	393.15	4.98

4.3.7 ผลการศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR)

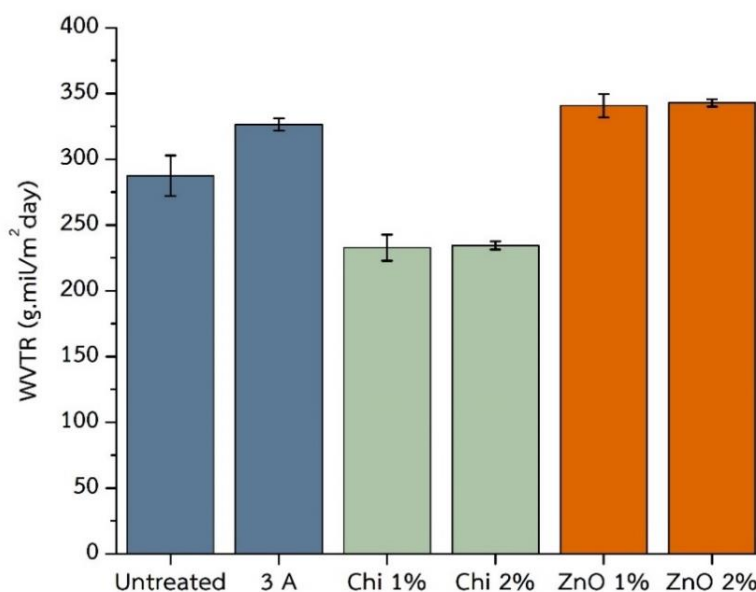
การศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย แสดงดังภาพที่ 4.33 และแสดงเชิงตัวเลขไว้ในตารางที่ 4.8

จากการศึกษา พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา (untreated) แสดงค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำเป็น $287.48 \text{ g}\cdot\text{mil}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ หลังจากนำไปผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา โดยใช้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ แสดงค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นเป็น $326.38 \text{ g}\cdot\text{mil}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ ซึ่งเพิ่มขึ้น 13.5 % เป็นผลมาจากกระบวนการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาทำให้พื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมมีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้วเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษาด้วยเทคนิค XPS และค่ามุมสัมผัสน้ำ การที่ค่ามุมสัมผัสน้ำลดลง แสดงถึงความสามารถในการเปียกผิวที่ดีหรือมีความชอบน้ำ (hydrophilic) ดังนั้นโมเลกุลของไอน้ำจะสามารถดูดซับบนพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวได้ดี อัตราการซึมผ่านของไอน้ำจึงมากกว่าฟิล์มที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว

พิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาและเคลือบผิวด้วยโคโตซานทั้ง 1 และ 2 %w/v พบว่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว เนื่องมาจากโคโตซานเป็นโคพอลิเมอร์ที่เกิดจากกลูโคซามีน (glucosamine) และเอน-แอสติลกลูโคซามีน (N-acetylglucosamine) โดยมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่และสายโซ่ยาว ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญ คือ หมู่เอมีน ($-\text{NH}_2$) ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงระหว่างสายโซ่โมเลกุลและพันธะภายในโมเลกุลของโคโตซาน จึงเกิดเป็นโครงข่ายที่ทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกซึมผ่านชั้นของโคโตซานที่เคลือบอยู่บนผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้น้อยลง อีกทั้งสายโซ่โมเลกุลของโคโตซานยังสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้อีกด้วย ดังนั้นเมื่อโมเลกุลของไอน้ำถูกดูดซับที่พื้นผิวของโคโตซาน และผ่านเข้าไปยังชั้นของโคโตซาน จะเกิดการแพร่ผ่านจนออกมาอีกด้านหนึ่ง ในขั้นตอนที่เกิดการคายซับโคโตซานที่เกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้ดีจะดูดซับโมเลกุลของน้ำไว้บางส่วน น้ำจึงแพร่ผ่านชั้นของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้น้อยลง ดังนั้นอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบด้วยโคโตซานจึงลดลง

พิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาและเคลือบผิวด้วยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ทั้ง 1 และ 2 %w/v พบว่าอัตราซึมผ่านของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว เป็นผลมาจาก PVA ซึ่งเป็นตัวกลางในการเคลือบผิวมีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว คือ หมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) ซึ่งมีความว่องไวต่อความชื้นสูง จึงสามารถดูดซับ

โมเลกุลของน้ำและแทรกตัวผ่านชั้นเคลือบไปยังชั้นของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้ง่ายขึ้น ดังนั้นอัตราการซึมผ่านของไอน้ำจึงเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษาค่ามอดุลสัมพัทธ์น้ำ นอกจากนี้การเคลือบผิวด้วยอนุภาคซิงค์ออกไซด์จะแสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำมากกว่าการเคลือบผิวด้วยไคโตซาน เนื่องจาก PVA มีความชอบน้ำมากกว่าไคโตซาน



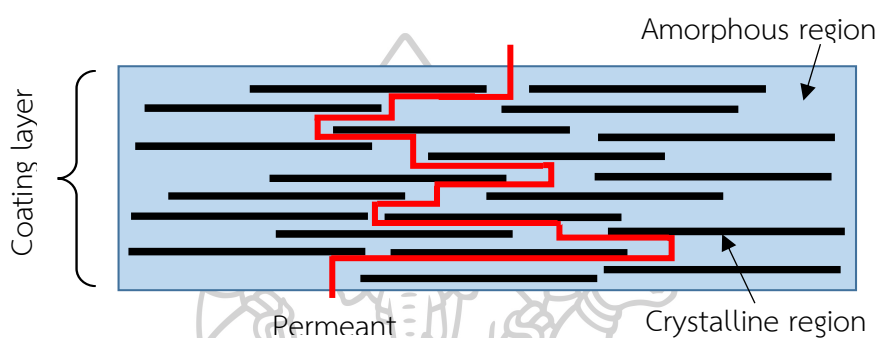
ภาพที่ 4.33 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยไคโรนา และฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

4.3.8 ผลการศึกษาอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Oxygen Permeability, OP)

การศึกษ้อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยไคโรนา และฟิล์มที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย แสดงดังภาพที่ 4.35 และแสดงเชิงตัวเลขไว้ในตารางที่ 4.8

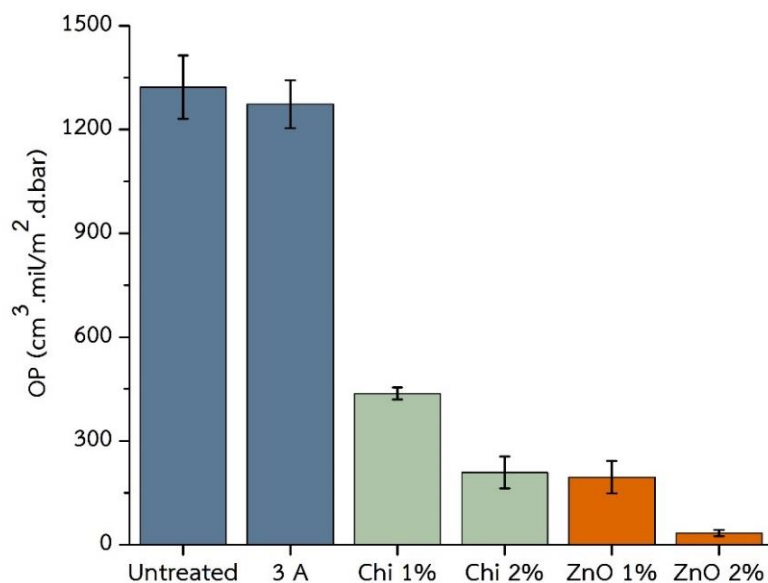
จากการศึกษา พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยไคโรนา โดยใช้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ ไม่ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน แต่เมื่อนำมาเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรียทั้งไคโตซานและอนุภาคซิงค์ออกไซด์กลับทำให้อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนลดลงอย่างมาก เมื่อพิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ที่เคลือบผิวด้วยไคโตซาน 1 และ 2 %w/v พบว่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนลดลงเป็น 66.9 และ 84.2 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยไคโรนา (untreated) เป็นผลมาจากโครงสร้างของไคโตซานสามารถเกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่แข็งแรงได้ ส่งผลให้เมื่อโมเลกุลของออกซิเจนซึ่งทำหน้าที่

เป็นตัวแพร่ จะแพร่ผ่านส่วนที่เป็นอสัณฐานในโครงสร้างของไคโตซาน โดยการแพร่จะมีเส้นทางที่คดโค้ง (tortuous pathway) ดังแสดงในภาพที่ 4.34 เนื่องจากมีส่วนที่เป็นผลึกอยู่ [54, 55] นอกจากนี้ไคโตซานมีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว ซึ่งการที่ไคโตซานมีขั้วจะมีความสามารถในการซึมผ่านของออกซิเจนได้น้อย เนื่องจากมี interaction ระหว่างไคโตซานกับโมเลกุลของแก๊สออกซิเจนน้อย การที่โมเลกุลของแก๊สออกซิเจนจะมาละลายบนเนื้อฟิล์มย่อมน้อยตามไปด้วย เป็นผลให้แพร่ออกมาได้ยากและใช้ระยะเวลาเวลานานขึ้น



ภาพที่ 4.34 จำลองเส้นทางการซึมผ่านของแก๊สที่คดโค้ง (tortuous pathway) ในบริเวณชั้นเคลือบ

พิจารณาฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบด้วยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ 1 และ 2 %w/v พบว่าอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนมีค่าลดลงเป็น 85.24 และ 94.46 % เมื่อเทียบกับ untreated เนื่องจาก PVA ซึ่งเป็นตัวกลางในการเคลือบผิวมีความเป็นขั้วสูง จึงทำให้อัตราการซึมผ่านของออกซิเจนมีค่าลดลงอย่างมาก ดังนั้นการเคลือบผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยไคโตซานและอนุภาคซิงค์ออกไซด์จึงสามารถปรับปรุงสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านออกซิเจนให้ดีขึ้น



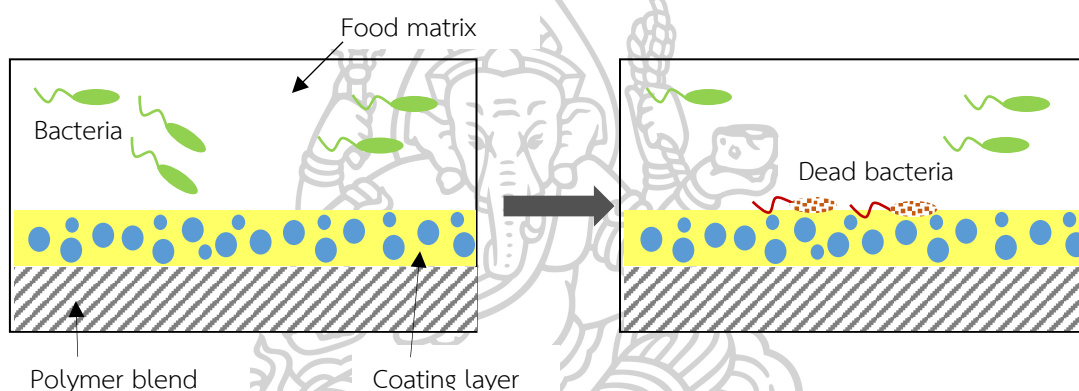
ภาพที่ 4.35 อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

ตารางที่ 4.8 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สออกซิเจนเฉลี่ยที่ผ่านการ normalised และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

Sample	WVTR _{normalised} (g·mil/m ² ·day)	OP (cm ³ ·mil/m ² ·d·bar)
Untreated	287.48±15.32	1322.16±91.5
Treated 3 A	326.38±4.76	1273.04±69.05
Chitosan 1%	232.74±9.94	437.05±17.66
Chitosan 2%	234.41±3.12	208.83±46.16
ZnO 1%	340.65±8.86	195.2±47.33
ZnO 2%	342.83±2.85	33.64±9.56

4.3.9 ผลการศึกษาสมบัติการต้านทานแบคทีเรีย (Antibacteria Activity)

บรรจุภัณฑ์อาหารที่มีความสามารถในการต้านทานแบคทีเรีย ควรเป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติฆ่าหรือยับยั้งการเน่าเสียของอาหาร โดยสารต้านแบคทีเรียจะช่วยลดการเติบโตของจุลินทรีย์และแบคทีเรีย เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา คงคุณภาพ และความปลอดภัยของผู้บริโภค สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้การเคลือบผิวด้วยสารต้านแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ ไคโตซานหรืออนุภาคซิงค์ออกไซด์ ในการยับยั้งแบคทีเรียชนิด *Escherichia Coli* (*E.coli*) ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ และ *Staphylococcus Aureus* (*S.aureus*) ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก ภาพที่ 4.36 จำลองการต้านแบคทีเรียเมื่อนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบด้วยสารต้านทานแบคทีเรียไปสัมผัสกับอาหาร



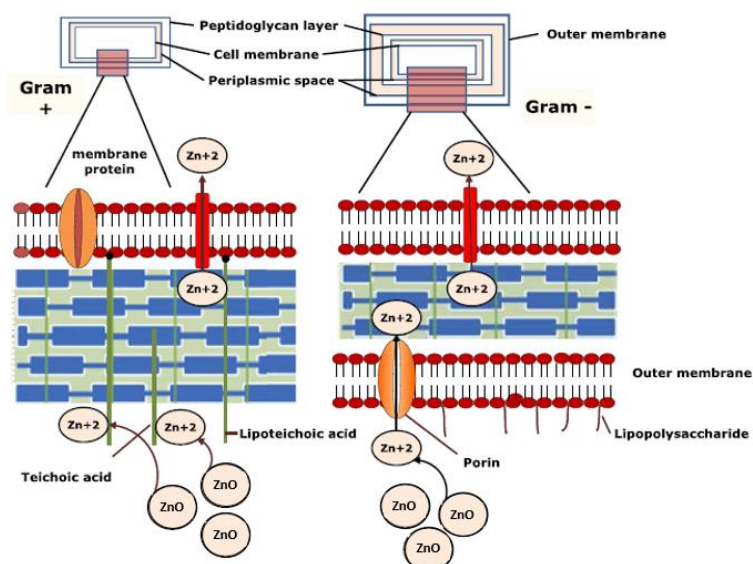
ภาพที่ 4.36 จำลองการต้านแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย [56]

การศึกษาสมบัติการต้านทานแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโครนาและไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย ซึ่งจะทำหน้าที่เป็น Control เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย โดยผลการทดสอบการต้านทานแบคทีเรียชนิด *E.coli* และ *S.aureus* จะถูกรายงานในหน่วยโคโลนีต่อมิลลิลิตร (CFU/ml) แสดงดังภาพที่ 4.38 และได้รายงานเปอร์เซ็นต์การลดลงในเชิงตัวเลขไว้ในตารางที่ 4.9 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโครนาโดยใช้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ ไม่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้ เนื่องจากกระบวนการปรับปรุงสภาพผิวไม่ส่งผลต่อฤทธิ์ในการต้านแบคทีเรีย และเมื่อพิจารณาผลของการเคลือบผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยสารต้านแบคทีเรียทั้งสองชนิด พบว่าสารต้านแบคทีเรียทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียอย่างมีนัยสำคัญ พิจารณาประสิทธิภาพใน

การยับยั้งแบคทีเรียชนิด *E.coli* กล่าวคือ สารละลายโคโตซาน 1 และ 2 %w/v มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรียเท่ากับ 95.87 และ 97.25 % ตามลำดับ ส่วนอนุภาคซิงค์ออกไซด์ 1 และ 2 %w/v มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรียเท่ากับ 84.86 และ 99.06 % ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียชนิด *S.aureus* กล่าวคือ สารละลายโคโตซาน 1 และ 2 %w/v มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรียเท่ากับ 78.94 และ 98.45 % ตามลำดับ ส่วนอนุภาคซิงค์ออกไซด์ 1 และ 2 %w/v มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรียเท่ากับ 92 และ 98.49 % ตามลำดับ โดยผลการทดลองจะแปรผันตามปริมาณสารต้านแบคทีเรียที่เคลือบบนผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม กล่าวคือ การเคลือบผิวด้วยอนุภาคซิงค์ออกไซด์หรือโคโตซาน 2 %w/v จะมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรียมากกว่า 1 %w/v เป็นผลมาจากมีปริมาณของสารต้านทานแบคทีเรียที่เคลือบติดอยู่บนผิวฟิล์มมากกว่า จึงทำให้มีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียที่ดีกว่า นอกจากนี้จะพบว่า การเคลือบผิวด้วยสารต้านแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด คือ สารละลายโคโตซาน 1 %w/v และอนุภาคซิงค์ออกไซด์ 2 %w/v มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรียชนิด *E.coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบมากกว่า *S.aureus* ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวกเล็กน้อย เป็นผลมาจากแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด มีโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ (membrane) ที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างของแบคทีเรียแกรมบวกมีความหนาของผนังเซลล์ชั้นเพปทิโดไกลแคน (Peptidoglycan) มากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ และยังมีกรดไทโคอิก (teichoic) และไลโปไทโคอิก (lipoteichoic) ทำหน้าที่เป็นสารคีเลต (chelating agent) ซึ่งจะช่วยให้การจับกับแร่ธาตุประจุบวกได้อีกด้วย [57]

สำหรับกลไกในการออกฤทธิ์ของสารต้านแบคทีเรียในยับยั้งหรือทำลายแบคทีเรียของสารโคโตซานเกิดจากประจุบวกของหมู่เอมีน ($-NH_2$ group) และประจุลบของผนังเซลล์แบคทีเรีย จะเกิดการดึงดูดกันด้วยแรงไฟฟ้าสถิตย์ ส่งผลให้ผนังเซลล์เกิดความเสียหาย โดยจะไปขัดขวางการรับสารอาหารของเซลล์ ทำให้เกิดการเสียสมดุลและเกิดการรั่วไหลของของไหลภายในเซลล์ เช่น โพแทสเซียมไอออน และสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น กรดนิวคลีอิก และกลูโคส จึงเป็นสาเหตุให้เซลล์เกิดการแตกและตายในที่สุด ส่วนในกรณีของอนุภาคซิงค์ออกไซด์เริ่มต้นจากการเกิดปฏิกิริยาการเร่งด้วยแสง (photocatalytic) ทำให้ซิงค์ออกไซด์เกิดการปลดปล่อย reactive oxygen species (ROS) โดย ROS จะอาจจะเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ไอออน ($O_2^{\bullet-}$) ไฮดรอกซิลไอออน (OH^{\bullet}) ออกซิเจนเดี่ยว ($1O_2$) หรือเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งซูเปอร์ออกไซด์และไฮดรอกซิลไอออนจะไม่สามารถเข้าไปจับกับผนังเซลล์ของแบคทีเรียได้เนื่องจากมีประจุเป็นลบ แต่เปอร์ออกไซด์จะแทรกซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้ง่ายทำให้เซลล์ของแบคทีเรียตาย นอกจากนี้ ROS ยังมีการปลดปล่อยซิงค์ไอออน (Zn^{2+}) ซึ่งจะเข้าไปจับกับประจุลบของผนังเซลล์แบคทีเรีย โดยส่งผลต่อโปรตีน ดีเอ็นเอ (DNA) และลิพิด (lipids) ของ

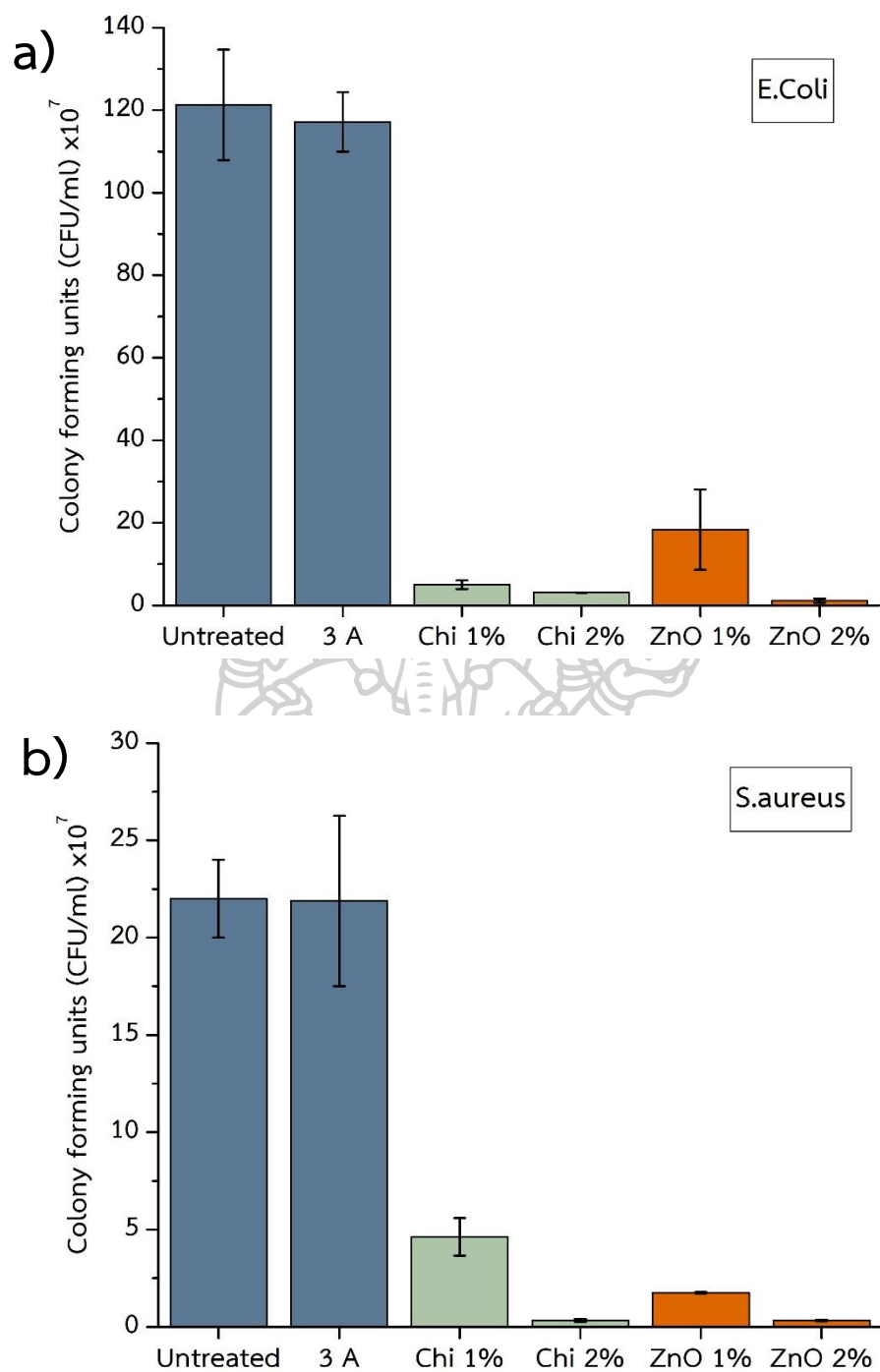
แบคทีเรีย ทำให้เซลล์เกิดการแตกและตายเช่นเดียวกันกับในกรณีของโคโตซาน แสดงดังภาพที่ 4.37 [57-59]



ภาพที่ 4.37 การเข้าทำปฏิกิริยาของอนุภาคซิงค์ออกไซด์กับแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบ [57]

ตารางที่ 4.9 แสดงจำนวนโคโลนีที่นับได้ต่อมิลลิลิตร และเปอร์เซ็นต์การลดลงของแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านและไม่ผ่านการเคลือบด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย ต่อแบคทีเรียชนิด *E.coli* และ *S.aureus*

Sample	<i>E.coli</i>		<i>S.aureus</i>	
	CFU/ml	%Reduction	CFU/ml	%Reduction
Control	$1.21 \pm 0.13 \times 10^9$	0.00	$2.2 \pm 0.02 \times 10^9$	0.00
Treated 3A	$1.17 \pm 0.072 \times 10^9$	3.36	$2.2 \pm 0.44 \times 10^8$	0.57
Chitosan 1%	$5 \pm 1.05 \times 10^7$	95.87	$4.6 \pm 0.97 \times 10^7$	78.94
Chitosan 2 %	$3.13 \pm 0.042 \times 10^5$	97.42	$3.4 \pm 0.7 \times 10^6$	98.45
ZnO 1 %	$1.84 \pm 0.98 \times 10^8$	84.86	$1.76 \pm 0.04 \times 10^7$	92.00
ZnO 2 %	$1.14 \pm 0.53 \times 10^7$	99.06	$3.3 \pm 0.44 \times 10^6$	98.49












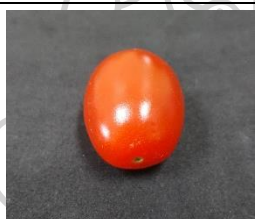
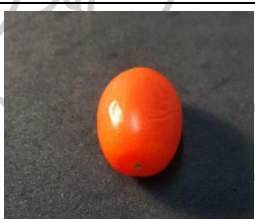
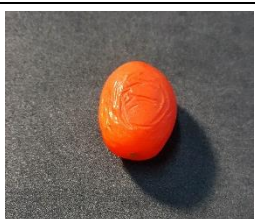
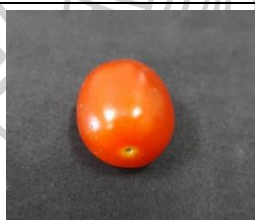
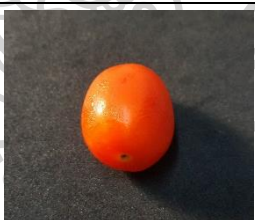
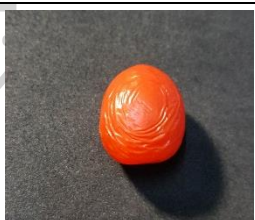
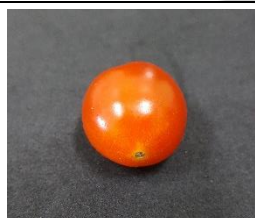

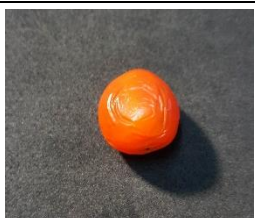
ภาพที่ 4.38 จำนวนโคโลนีที่นับได้ต่อมิลลิลิตร (CFU/ml) ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เคลือบ และเคลือบด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย ต่อแบคทีเรียชนิด a) *E.coli* b) *S.aureus*

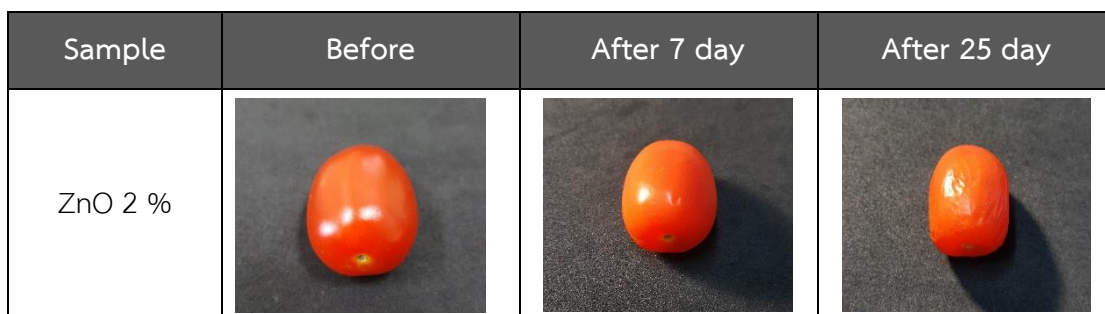
4.3.10 การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร

การเก็บรักษาผักและผลไม้ให้คงความสดไว้ได้นาน ต้องอาศัยการจัดการจัดการหลังการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม เนื่องจากภายหลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตผลยังมีกระบวนการเมตาบอลิซึมต่าง ๆ เช่น การหายใจ การคายน้ำ และการผลิตแก๊สเอทิลีน เป็นต้น ซึ่งพอลิเอทิลีนเป็นหนึ่งในพลาสติกที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ แต่พบว่ามอดูลการซึมผ่านของไอน้ำต่ำ ทำให้ไม่เหมาะสมในการนำมาทำบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุผลผลิตสด จึงมีการเจาะรูเพื่อช่วยระบายไอน้ำ แต่การเจาะรูทำให้บรรจุภัณฑ์ขาดความสวยงาม ทำให้ความแข็งแรงลดลง และฉีกขาดได้ง่าย [60]

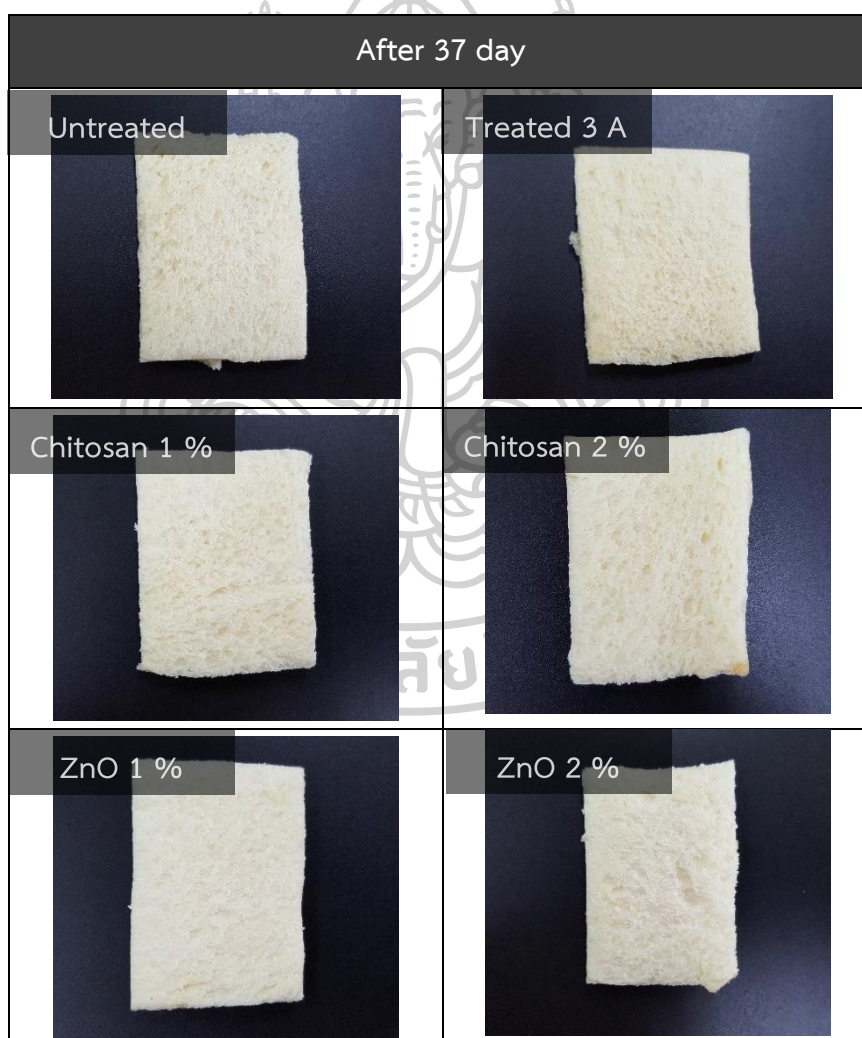
การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรียมาประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารแบบปิดผนึก (seal) โดยเลือกผลไม้สำหรับการศึกษา คือ มะเขือเทศราชินี (cherry tomato) ทำการเก็บรักษาไว้ในตู้เย็น อุณหภูมิประมาณ 7 – 10 °C และขนมปังแผ่นขาว ทำการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 4.39 - ภาพที่ 4.40

จากภาพที่ 4.39 พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิว (untreated) ฟิล์มที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา โดยใช้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ (treated 3 A) และฟิล์มที่ผ่านเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย ได้แก่ ไคโตซานและอนุภาคซิงค์ออกไซด์ 1 และ 2 %w/v เมื่อเก็บรักษาไว้ในฟิล์มบรรจุภัณฑ์เป็นระยะเวลา 7 วัน แสดงลักษณะของผิวมะเขือเทศที่ไม่แตกต่างกันในแต่ละสูตร แต่จะแตกต่างเมื่อเทียบกับบรรจุภัณฑ์เดิม (commercial packaging) และจะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อระยะเวลาผ่านไป 25 วัน พบว่ามะเขือเทศที่ถูกเก็บรักษาในบรรจุภัณฑ์เดิมแสดงลักษณะของผิวที่เหี่ยวยุบ เนื่องจากมะเขือเทศเป็นผลไม้ชนิดหนึ่งที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก การสูญเสียน้ำหนักของน้ำออกจากมะเขือเทศจึงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการเก็บรักษา โดยบรรจุภัณฑ์เดิมของมะเขือเทศจะถูกเก็บอยู่ในกล่อง PET ที่มีการเจาะรู ซึ่งการเจาะรูจะทำให้มีอากาศจากภายนอกแพร่เข้ามาได้ง่าย ทำให้น้ำที่อยู่ภายในผลผลิตสามารถแพร่ออกมาสู่ภายนอกได้มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการคายน้ำออกจากมะเขือเทศมากขึ้น ผิวของมะเขือเทศจึงเกิดการเหี่ยวยุบ แต่สำหรับฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ทดสอบในงานวิจัยนี้เมื่อบรรจุมะเขือเทศลงในถุงจะทำการปิดผนึก ซึ่งจะช่วยลดการคายน้ำ และช่วยชะลอการเหี่ยวยุบได้ เนื่องจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์มีสภาวะบรรยากาศภายในที่เหมาะสม เช่น อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน เป็นต้น ทำให้สามารถระบายไอน้ำและแก๊สที่เกิดขึ้นได้ทันกับอัตราการหายใจของมะเขือเทศ และสามารถช่วยป้องกันการควบแน่นของไอน้ำซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย จึงช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของมะเขือเทศให้นานขึ้นได้ นอกจากนี้การปิดผนึกฟิล์มบรรจุภัณฑ์ยังช่วยในเรื่องของความสะอาด ช่วยลดการสัมผัสกับจุลินทรีย์ในอากาศได้อีกด้วย

Sample	Before	After 7 day	After 25 day
Commercial packaging			
Untreated			
Treated 3 A			
Chitosan 1 %			
Chitosan 2 %			
ZnO 1 %			



ภาพที่ 4.39 แสดงลักษณะทางกายภาพของมะเขือเทศราชินี (cherry tomato) ก่อนและหลังจากเก็บรักษาในฟิล์มบรรจุภัณฑ์เป็นเวลา 7 และ 25 วัน



ภาพที่ 4.40 แสดงลักษณะทางกายภาพของขนมปังแผ่นขาวหลังจากเก็บรักษาในฟิล์มบรรจุภัณฑ์เป็นเวลา 35 วัน

จากภาพที่ 4.40 แสดงลักษณะทางกายภาพของขนมปังแผ่นขาวหลังจากเก็บรักษาในฟิล์มบรรจุภัณฑ์ พบว่าหลังจากการเก็บรักษาขนมปังแผ่นขาวไว้ในฟิล์มบรรจุภัณฑ์ 5 วัน จะไม่พบเชื้อราบนแผ่นขนมปัง แต่ขนมปังจะเปลี่ยนสภาพจากขนมปังที่มีลักษณะอ่อนนุ่มกลายเป็นขนมปังที่มีความแข็งมากขึ้น เนื่องจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการศึกษามีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับฟิล์ม LDPE ที่ใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์เดิมของขนมปัง ทำให้ไม่สามารถรักษาความชื้นที่อยู่ภายในขนมปังได้ และหลังจากเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 35 วัน ไม่พบเชื้อราบนขนมปังแผ่นขาว เนื่องจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์มีการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย นอกจากนี้อาจเป็นผลมาจากขนมปังแผ่นขาวที่อยู่ภายในฟิล์มบรรจุภัณฑ์มีความชื้นที่ต่ำ จึงทำให้ขัดขวางการเจริญเติบโตของเชื้อราได้

ดังนั้นผู้วิจัยคาดว่าสามารถนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ซึ่งจะเหมาะสมสำหรับอาหารและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่ดี ป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนได้ และสามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรีย เพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษาให้นานขึ้น เช่น ผัก ผลไม้ และพืชตระกูลถั่ว เป็นต้น



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารที่ต้านทานแบคทีเรียจากฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติมเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา จากนั้นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมส่วนที่ดีจะถูกนำไปปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนาก่อนการเคลือบผิวด้วยโคโตซานหรืออนุภาคซิงค์ออกไซด์ โดยผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าการเติม PBAT มากขึ้น สามารถปรับปรุงความสามารถในการยืดหยุ่นให้กับ PBS ส่งผลให้ elongation at break สูงขึ้น แต่จะไม่ส่งผลต่อ tensile strength นอกจากนี้การเติม DCP จะลดความแข็งแรงของฟิล์ม เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่โมเลกุล PBS ในขณะที่ elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของ PBS กับ PBS หรือ PBAT ส่วน tear strength จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการเติม PBAT มากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นจะมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อมีการเติม DCP ที่เป็นเช่นนี้เพราะเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลสอดคล้องกับผลการทดสอบ DSC พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติม DCP จะมีอุณหภูมิการเกิดผลึกเลื่อนไปในทิศทางที่สูงขึ้น และการทดสอบด้วยเทคนิค SEM จะพบว่าการเติม DCP สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม โดยพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเรียบมากขึ้น อย่างไรก็ตามฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เติม DCP มี processibility ไม่ดีนัก จึงมีการเปลี่ยนชนิดของเปอร์ออกไซด์

5.1.2 การศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา พบว่าการเติม PBAT มากขึ้นจะทำให้พื้นผิวฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้น และเมื่อเติม Perkadox จะสามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างฟิล์มพอลิเมอร์ผสม ทำให้พื้นผิวฟิล์มจะมีความเรียบมากขึ้น เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกล พบว่าการเติม PBAT มากขึ้นจะทำให้ Young's modulus, tensile strength และ tear strength ลดลง และเมื่อเติม Perkadox จะมีค่าลดลงต่ำกว่าระบบที่ไม่เติม เป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาการขาดของสายโซ่ PBS โดยสัดส่วน 80/20/Perkadox สมบัติเชิงกลจะถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น จากการเกิดการเชื่อมโยงของสายโซ่ PBS กับ PBS หรือ PBAT โดยทำให้ค่า elongation at break เพิ่มขึ้นถึง 18.5 เท่า เมื่อเทียบกับ PBS บริสุทธิ์

จากการขาดของสายโซ่โมเลกุล PBS ของระบบที่เติม Perkadox สามารถยืนยันได้จากอุณหภูมิการเกิดผลึกจะมีค่าสูงกว่าระบบที่ไม่เติม Perkadox เล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามการเติม PBAT และการเติม Perkadox จะส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

สำหรับการศึกษาค่ามัมสัมผัสน้ำ พบว่าการเติม PBAT มากขึ้น จะทำให้ค่ามัมสัมผัสน้ำลดลง เนื่องจาก PBAT มีขี้วมมากกว่า PBS นอกจากนี้การเติม PBAT จะทำให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สออกซิเจนเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากมีส่วนที่เป็น amorphous มากกว่า PBS และเมื่อเติม Perkadox ค่ามัมสัมผัสน้ำจะลดลง เนื่องจากการขาดของสายโซ่ ทำให้มีหมู่ปลายสายโซ่ที่ชอบน้ำมากขึ้น ดังนั้นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจะมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สออกซิเจนสูงกว่าระบบที่ไม่เติม Perkadox

5.1.3 การศึกษาผลของการเคลือบผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย โดยนำฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkadox ซึ่งเป็นสัดส่วนที่มีสมบัติที่ดีมาทำการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาที่กระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน พบว่าการใช้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ จะมีการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชันที่มีขี้วมมากที่สุด โดยการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาโดยใช้กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ และการเคลือบผิวด้วยโคโตซานหรืออนุภาคซิงออกไซด์จะไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลมากนัก ยกเว้นการเคลือบผิวด้วยโคโตซาน 2 %w/v จะทำให้ elongation at break ลดลงอย่างมาก เนื่องจากโคโตซานทำหน้าที่คล้ายเป็นสารเสริมแรงบนผิวฟิล์ม นอกจากนี้การศึกษสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าสารเคลือบไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในทุกสูตร แต่จะส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อน โดยการเคลือบด้วยโคโตซานและซิงออกไซด์จะทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนก่อนฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เคลือบผิว

สำหรับการศึกษาค่ามัมสัมผัสน้ำ พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาจะมีขี้วมมากขึ้น หลังจากเคลือบผิวด้วยโคโตซานค่ามัมสัมผัสน้ำเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโคโตซาน เนื่องจากผิวฟิล์มมีความเป็น hydrophobic และขรุขระมากขึ้น ส่วนฟิล์มที่เคลือบด้วยอนุภาคซิงออกไซด์จะมีค่ามัมสัมผัสน้ำลดลง เนื่องจาก PVA มีขี้วมสูง สอดคล้องกับอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ฟิล์มที่มีขี้วมสูงจะมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำที่สูง แต่จะมีอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนที่ต่ำ

สำหรับการศึกษาสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย พบว่าฟิล์มที่เคลือบผิวด้วยโคโตซานและอนุภาคซิงออกไซด์มีประสิทธิภาพในการยับยั้งแบคทีเรียชนิด *E.coli* และ *S.aureus* ได้ดี และจะยับยั้งได้มากขึ้นตามความเข้มข้นของสารเคลือบที่เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ยังทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหาร พบว่าฟิล์มบรรจุภัณฑ์สามารถยืดอายุการเก็บรักษามะเขือเทศราชินี และขนมปังแผ่นขาวได้ ดังนั้นจะได้ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ซึ่งมีสมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย อัตราการซึมผ่านไอน้ำที่เหมาะสม และยังป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนได้ดีอีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเพียงแค่กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา ควรทำการศึกษาปัจจัยอื่นร่วมด้วย เช่น ระยะเวลาในการปรับปรุงสภาพผิว ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและลูกกลิ้ง และความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้า เป็นต้น เพื่อหาสภาวะในการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาที่เหมาะสมที่สุด

5.2.2 อาจเพิ่มการศึกษาพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM) ซึ่งจะให้ข้อมูลความขรุขระของพื้นผิว

5.2.3 ขั้นตอนการปิดผนึกฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสำหรับการทดสอบความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร ในกรณีฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ทำการศึกษาเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย บริเวณที่มีการเคลือบจะไม่สามารถปิดผนึกได้ ดังนั้นจะต้องเว้นขอบฟิล์มพอลิเมอร์ผสมไว้ให้เหลือพื้นที่สำหรับการปิดผนึก

5.2.4 การศึกษาอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ควรควบคุมอุณหภูมิในการทดสอบ เนื่องจากอุณหภูมิมิผลต่อความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งจะทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อน นอกจากนี้เมื่อเปิดฝา desiccator เพื่อเก็บผลการทดลอง อาจทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ลดลง สามารถแก้ปัญหาได้โดยการสเปรย์น้ำเล็กน้อย

5.2.5 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปของเครื่อง twin-screw extruder และ cast film extruder ควรปรับเปลี่ยนตามความเหมาะสม โดยเฉพาะฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วนที่มีการเติมเปอร์ออกไซด์

รายการอ้างอิง

- [1] บริษัท พีทีที เอ็มซีซี ไซโอเคม จำกัด, โรงงานผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิবিทิลีนซัคซิเนต, เข้าถึงเมื่อ 13 กรกฎาคม 2559, เข้าถึงได้จาก <http://www.pttplc.com/th/Media-Center/News/Business/Pages/news-2014-09-02-2.aspx>
- [2] อมรา วงศ์พุทธพิทักษ์, สิ่งเป็นพิษปนเปื้อนอาหาร, เข้าถึงเมื่อ 13 กรกฎาคม 2559, เข้าถึงได้จาก <https://web.ku.ac.th/schoolnet/snet6/envi3/food/foodn.htm>
- [3] สุภัตตรา เจริญเกษมวิทย์ และอรวรรณ ศรีคุ้มวงศ์, พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ, เข้าถึงเมื่อ 10 กรกฎาคม 2559, เข้าถึงได้จาก <http://www.vcharkarn.com/varticle/38614>
- [4] National Metal and Materials Technology Center (MTEC), คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ, เข้าถึงเมื่อ 12 กรกฎาคม 2559, เข้าถึงได้จาก http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/bio_de_plas.html
- [5] National Metal and Materials Technology Center (MTEC), การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้. , เข้าถึงเมื่อ 12 กรกฎาคม 2559, เข้าถึงได้จาก http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/usage_de_plas.html
- [6] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ, พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ, เข้าถึงเมื่อ 10 กรกฎาคม 2557, เข้าถึงได้จาก <http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR12.pdf>
- [7] Uta Breuer, "*Plastics from Bacteria – Natural Functions and Applications. By Guo-Qiang Chen (Editor), Alexander Steinbüchel (Series Editor),*" **Biotechnology Journal** 2010, 5 (12): 1351-1351.
- [8] เบลูจมาศ ปั้นหยัด, "การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการลามไฟของพอลิবিทิลีนซัคซิเนตสำหรับใช้ทำกรอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์" (สาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2554).
- [9] กองบรรณาธิการ Technology Promotion, อุตสาหกรรมเม็ดพลาสติกชีวภาพในประเทศไทย, เข้าถึงเมื่อ 9 กรกฎาคม 2559, เข้าถึงได้จาก http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/tn219A_p83-85.pdf
- [10] Thitisilp Kijchavengkul, Rafael Auras, Maria Rubino, Susan Selke, Mathieu Ngouajio และ R. Thomas Fernandez, "*Biodegradation and hydrolysis rate of aliphatic aromatic polyester,*" **Polymer Degradation and Stability** 2010, 95

- (12): 2641-2647.
- [11] กลุ่มพัฒนามาตรฐานความปลอดภัยแรงงาน. สารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์อันตรายอย่างไร., เข้าถึงเมื่อ 15 พฤษภาคม 2561, เข้าถึงได้จาก www.oshthai.org/phocadownload/organic_peroxide.pdf.
- [12] Arkema innovative chemistry, **Dicumyl Peroxide**, เข้าถึงเมื่อ 15 พฤษภาคม 2561, เข้าถึงได้จาก <https://www.arkema.com/export/shared/.content/media/downloads/socialresponsability/safety-summuries/Functional-Additives-Luperox-DC-Dicumyl-peroxide-2013-03-11-V0.pdf>
- [13] Sigma-Aldrich, โครงสร้างเคมีของ **Dicumyl Peroxide**, เข้าถึงเมื่อ 15 พฤษภาคม 2561, เข้าถึงได้จาก <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/329541?lang=en®ion=TH>
- [14] Akzonoble, **Perkadox 14S**, เข้าถึงเมื่อ 15 พฤษภาคม 2561, เข้าถึงได้จาก http://www.polymerpds.akzonobel.com/PolymerChemicalsPDS/showPDF.aspx?pds_id=297
- [15] R. Gacher และ H. Muller, *Plastic Additives*, ed. 2nd. 1987, Hanser Publishers.
- [16] บริษัท Nano Material Technology จำกัด, ซิงค์ออกไซด์, เข้าถึงเมื่อ 5 กรกฎาคม 2559, เข้าถึงได้จาก <http://www.nanomaterials.co.th/index2.asp?CType=3>
- [17] ดร.สุพิน แสงสุข, นาโนซิงค์ออกไซด์, เข้าถึงเมื่อ 5 กรกฎาคม 2559, เข้าถึงได้จาก <http://www.material.chula.ac.th/Articles/nanoZing.html>
- [18] ผุสุชา คงสุด, พรชัย ศิริวรรณ และณททัย ไวโรจน์พันธุ์, กลไกการยับยั้งแบคทีเรียของซิงค์ออกไซด์, เข้าถึงเมื่อ 5 กรกฎาคม 2559, เข้าถึงได้จาก <http://nanozincoxide.blogspot.com/2012/08/1.html>
- [19] สยามเคมี, ไคโตซาน, เข้าถึงเมื่อ 8 กรกฎาคม 2559, เข้าถึงได้จาก <http://www.siamchemi.com/ไคโตซาน/>
- [20] กมลศิริ พันธนิยะ, โครงสร้างทางเคมีของไคติน-ไคโตซาน, เข้าถึงเมื่อ 8 กรกฎาคม 2559, เข้าถึงได้จาก <https://sites.google.com/site/dawpudaengthungthxngkarkestr/daowpoodeang/pe-riyb-theiyb-kar-chi-puy-xinthry-khemi/kar-chi-puy-khem/ru-reuxng-khi-tin-khi-to-san>

- [21] ศุภชัย สง่า, "การเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์เบลนดระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบีวทิลีนซัคซิเนตที่เคลือบผิวด้วยไคโตซานสำหรับประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่ต่อต้านแบคทีเรีย" (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศิลปากร มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2557).
- [22] ผุสดี นาคพลายพันธุ์ และสุวบุญ จิรชาญชัย บุญศรี จงเสรีจิตต์, "การยับยั้งแบคทีเรียในอาหารโดยไคซาน : *Antibacterial activity of chitosan against food microorganisms,*" วารสารวิทยาศาสตร์ 2547, มีนาคม-เมษายน 88-94.
- [23] K. V. Harish Prashanth และR. N. Tharanathan, "*Chitin/chitosan: modifications and their unlimited application potential—an overview,*" **Trends in Food Science & Technology** 2007, 18 (3): 117-131.
- [24] นภาพร เชี่ยวชาญ และธนรัตน์ ศรีธรรมาธิ, "ไคโตซานกับการยับยั้งจุลินทรีย์ในอาหาร," **Food Journal (Thailand)** 2547, เม.ย.-มิ.ย. 2547 (ปีที่ 34 ฉบับที่ 2): 120-124.
- [25] G. J. Tsai, S. L. Zhang และP. L. Shieh, "*Antimicrobial activity of a low-molecular-weight chitosan obtained from cellulase digestion of chitosan,*" **J Food Prot** 2004, 67 (2): 396-8.
- [26] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, การใช้ประโยชน์ของไคโตซานในการยืดอายุของอาหารและเครื่องดื่ม, เข้าถึงเมื่อ 2 กรกฎาคม 2559, เข้าถึงได้จาก <http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR7.pdf>
- [27] ทวีศักดิ์ ภาพันธ์ และนายปฏิวัติ ชาวสุรินทร์, "การศึกษาการปรับผิววัสดุด้วยหลักการทางโคโรนาดิสชาร์จ (Corona Discharge Surface treatment)" (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2554).
- [28] ศุภรัตน์ นาคสิทธิพันธ์ และสุลาวัลย์ ขาวม่วง, "การสังเคราะห์ฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์โดยวิธีโพลีเพลสมา" (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2554).
- [29] กษมภรณ์ ทับทิมงาม, จุฑาการณจน์ สุวรรณน้อย และและสมิตรา พันธุ์ดี, การปลดปล่อยประจุบางส่วน เข้าถึงเมื่อ 28 กรกฎาคม 2559, เข้าถึงได้จาก <https://app.enit.kku.ac.th/mis/administrator/doc.../20120306115100.pdf>
- [30] Selcuk Yildirim, **Active packaging antimicrobial films for packaging,** เข้าถึงเมื่อ 10 กรกฎาคม 2559, เข้าถึงได้จาก http://vorstand.sgluc.ch/110908-03_yildirim.pdf
- [31] P. Suppakul, et al, "*Active packaging technologies with an emphasis on antimicrobial packaging and its applications,*" **Journal of Food Science** 2003,

- 68 (2): 408-420.
- [32] Kuorwel K. Kuorwel, Marlene J. Cran, Kees Sonneveld, Joseph Miltz และ Stephen W. Bigger, "Antimicrobial Activity of Natural Agents Coated on Starch-Based Films against *Staphylococcus aureus*," **Journal of Food Science** 2011, 76 (8): M531-M537.
- [33] สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, แบบคดีเรีย จุลินทรีย์ ยีสต์, เข้าถึงเมื่อ 8 กรกฎาคม 2559, เข้าถึงได้จาก <http://www.nstda.or.th/nstda-r-and-d/17065-bacteria-yeast>
- [34] การจำแนกแบบคดีเรีย, เข้าถึงเมื่อ 25 พฤษภาคม 2559, เข้าถึงได้จาก <https://yanisa56522.wordpress.com/การจำแนกแบบคดีเรีย/>
- [35] กลไกการออกฤทธิ์ของสารต้านจุลินทรีย์การยับยั้งและการทำลายจุลินทรีย์, เข้าถึงเมื่อ 26 พฤษภาคม 2559, เข้าถึงได้จาก <http://www.thaieditorial.com/กลไกการออกฤทธิ์ของสารต/>
- [36] Siriporn Theapsak, Anyarat Watthanaphanit และ Ratana Rujiravanit, "Preparation of Chitosan-Coated Polyethylene Packaging Films by DBD Plasma Treatment," **ACS Applied Materials & Interfaces** 2012, 4 (5): 2474-2482.
- [37] Noeli Sellin และ João Sinézio de C. Campos, "Surface composition analysis of PP films treated by corona discharge," **Materials Research** 2003, 6 163-166.
- [38] Antonella Marra, Clara Silvestre, Donatella Duraccio และ Sossio Cimmino, "Polylactic acid/zinc oxide biocomposite films for food packaging application," **International Journal of Biological Macromolecules** 2016, 88 254-262.
- [39] Ramabhau Patil, Jose Berrios, Juming Tang, James Pan และ Barry Swanson, *Physical Characteristics of Food Extrudates - A Review*. 2005.
- [40] Labtech, **Cast film extruder**, เข้าถึงเมื่อ 8 กันยายน 2560, เข้าถึงได้จาก <http://www.milabtech.com/extruders%20chill%20roll%20sheet%20cast%20lines.htm>
- [41] Instron, **Instron 5960 Series**, เข้าถึงเมื่อ 10 มิถุนายน 2561, เข้าถึงได้จาก <http://www.instron.us/-/media/literature-library/products/2013/02/5960-series-dual-column-tabletop-5kn--50kn.pdf?la=en-US>
- [42] Hitachi, **Tabletop Microscope TM3030**, เข้าถึงเมื่อ 17 มิถุนายน 2561, เข้าถึงได้จาก https://www.hitachi-hightech.com/eu/product_detail/?pn=em-tm3030&version=

- [43] Rungsima Homklin และNattakarn Hongsriphan, "*Mechanical and Thermal Properties of PLA/PBS Co-continuous Blends Adding Nucleating Agent*," **Energy Procedia** 2013, 34 871-879.
- [44] Qirui Sun, "Development of Bio-based and Biodegradable Film from Carbon Dioxide Based Polymer and Poly(Lactic acid)" (Master of Applied Science in Engineering Guelph, 2015).
- [45] **CONTACT ANGLE AMP SURFACE TENSION PRODUCTS**, เข้าถึงเมื่อ 4 พฤษภาคม 2561, เข้าถึงได้จาก <http://oukas.info/?u=Contact+Angle+amp+Surface+Tension++Products>
- [46] PhoCEA, **X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)**, เข้าถึงเมื่อ 4 พฤษภาคม 2561, เข้าถึงได้จาก http://iramis.cea.fr/en/Phocea/Vie_des_labos/Ast/alltec.php?id_ast=120
- [47] **Cfu Counting**, เข้าถึงเมื่อ 17 พฤษภาคม 2561, เข้าถึงได้จาก <http://bioskop-21.info/image/c/cfu-counting.html>
- [48] Yoo E. S. และIm S. S., "*Melting behavior of poly(butylene succinate) during heating scan by DSC*," **Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics** 1999, 37 (13): 1357-1366.
- [49] Rajendran Muthuraj, Manjusri Misra และAmar Kumar Mohanty, "*Biodegradable Poly(butylene succinate) and Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Blends: Reactive Extrusion and Performance Evaluation*," **Journal of Polymers and the Environment** 2014, 22 (3): 336-349.
- [50] G. Khang, "*Evolution of gradient concept for the application of regenerative medicine*," **Biosurface and Biotribology** 2015, 1 (3): 202-213.
- [51] Cholwasa Bangyekan, Duangdao Aht-Ong และKawee Srikulkit, "*Preparation and properties evaluation of chitosan-coated cassava starch films*," **Carbohydrate Polymers** 2006, 63 (1): 61-71.
- [52] Hafida Ferfera-Harrar และNassima Dairi, "*Green nanocomposite films based on cellulose acetate and biopolymer-modified nanoclays: studies on morphology and properties*," **Iranian Polymer Journal** 2014, 23 (12): 917-931.
- [53] Tsuchiya Yoshio และSumi Kikuo, "*Thermal decomposition products of poly(vinyl alcohol)*," **Journal of Polymer Science Part A-1: Polymer Chemistry** 1969, 7

- (11): 3151-3158.
- [54] Jolanta Kumirska, Małgorzata Czerwicka, Zbigniew Kaczyński, Anna Bychowska, Krzysztof Brzozowski, Jorg Thüming และ Piotr Stepnowski, "Application of Spectroscopic Methods for Structural Analysis of Chitin and Chitosan," **Marine Drugs** 2010.
- [55] Xiaofei He, Kecheng Li, Rong Xing, Song Liu, Linfeng Hu และ Pengcheng Li, "The production of fully deacetylated chitosan by compression method," **The Egyptian Journal of Aquatic Research** 2016, 42 (1): 75-81.
- [56] Menno L. W. Knetsch และ Leo H. Koole, "New Strategies in the Development of Antimicrobial Coatings: The Example of Increasing Usage of Silver and Silver Nanoparticles," **Polymers** 2011, 3 (1): 340.
- [57] Agarwal Happy, Menon Soumya, S. Venkat Kumar และ S. Rajeshkumar, "Mechanistic study on antibacterial action of zinc oxide nanoparticles synthesized using green route," **Chemico-Biological Interactions** 2018, 286 60-70.
- [58] P. Mujeeb Rahman, V. M. Abdul Mujeeb และ K. Muraleedharan, "Flexible chitosan-nano ZnO antimicrobial pouches as a new material for extending the shelf life of raw meat," **International Journal of Biological Macromolecules** 2017, 97 382-391.
- [59] Laila Al-Naamani, Sergey Dobretsov และ Joydeep Dutta, "Chitosan-zinc oxide nanoparticle composite coating for active food packaging applications," **Innovative Food Science & Emerging Technologies** 2016, 38 231-237.
- [60] สุภารัตน์ รักชลธี, "อิทธิพลของการใช้ LDPE ต่อการขึ้นรูปและสมบัติของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ชนิด LLDPE/LDPE/EVA ที่มีซีโอไลต์เอเป็นสารตัวเติม" (สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2013).



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก.

ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ

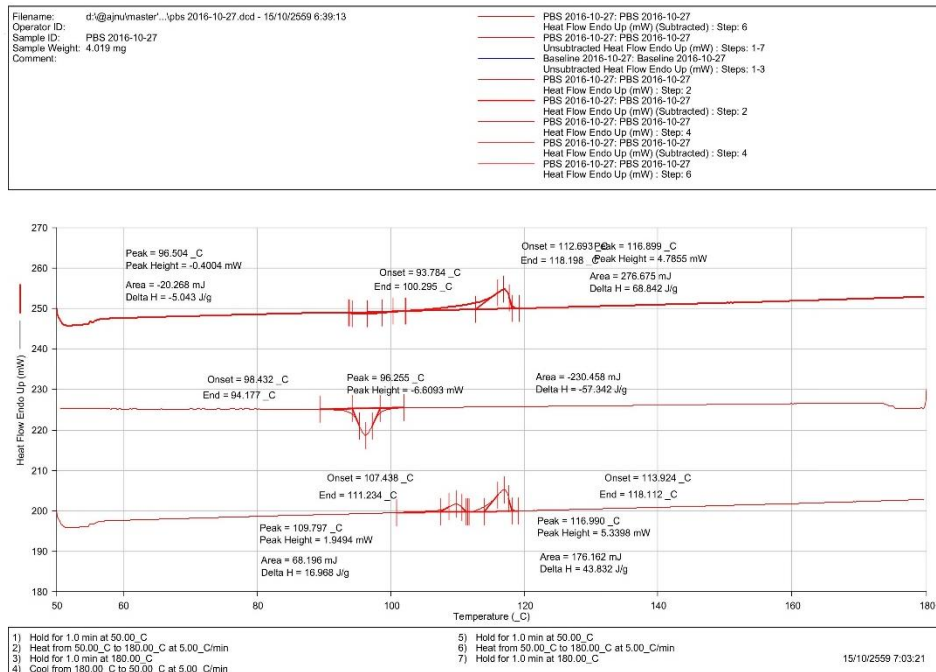
ก-1 สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

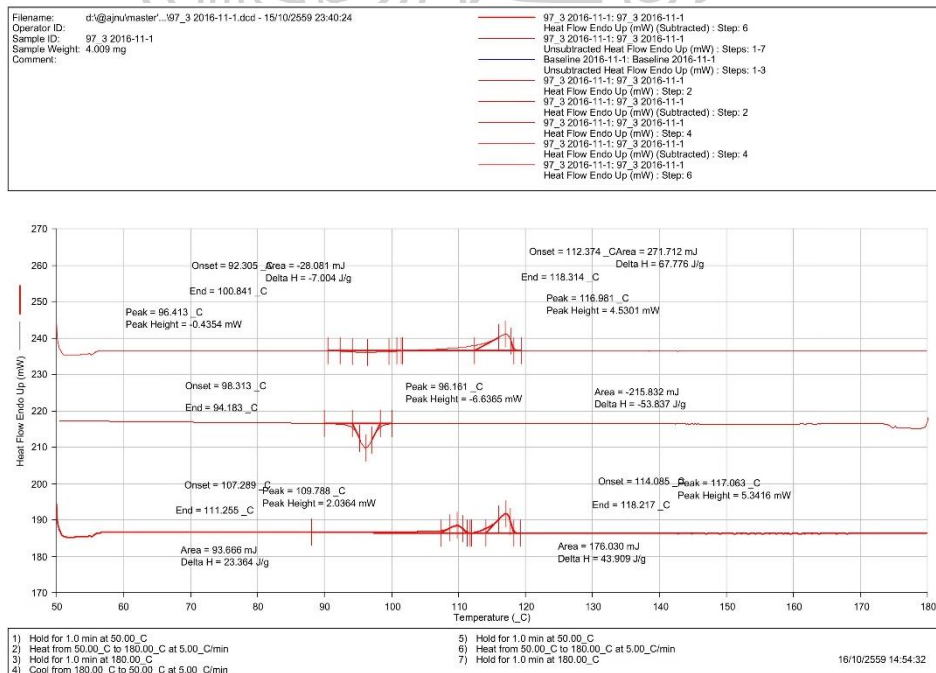
ตารางผนวก ก.1 สรุปค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน Tensile strength, Elongation at break และ Tear strength ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม DCP สัดส่วนต่างๆ

Sample	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tear strength (N/m)
Neat PBS	32.27±2.28	16.21±0.70	102.08±6.62
97/3	32.00±1.15	17.39±0.80	98.76±3.90
95/5	31.41±0.96	19.15±0.85	80.77±1.79
93/7	32.78±1.41	20.28±0.50	82.88±2.58
PBS/DCP	24.20±4.10	19.51±3.05	42.69±10.66
97/3/DCP	17.49±2.20	21.25±1.90	85.90±13.75
95/5/DCP	23.62±3.64	21.09±3.05	54.78±2.76
93/7/DCP	21.87±2.23	20.34±4.93	60.76±8.85

ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

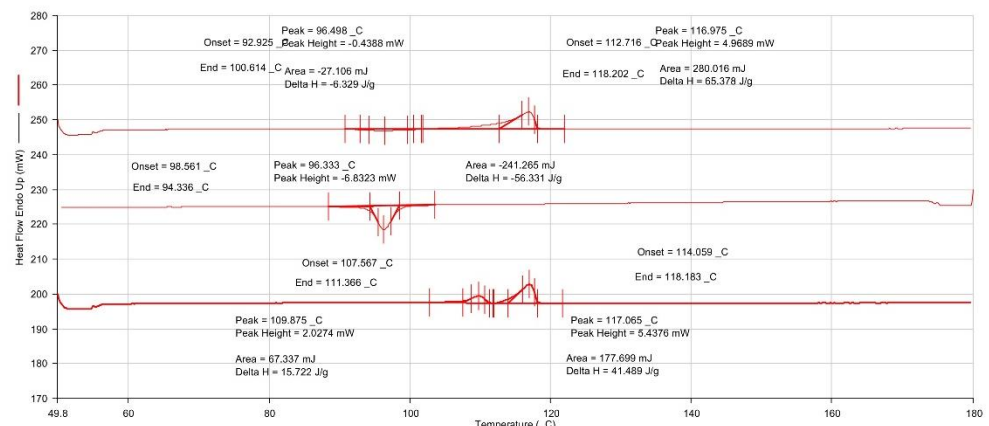


ภาพผนวก ก.1 DSC thermogram ของฟิล์ม Neat PBS



ภาพผนวก ก.2 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 97/3

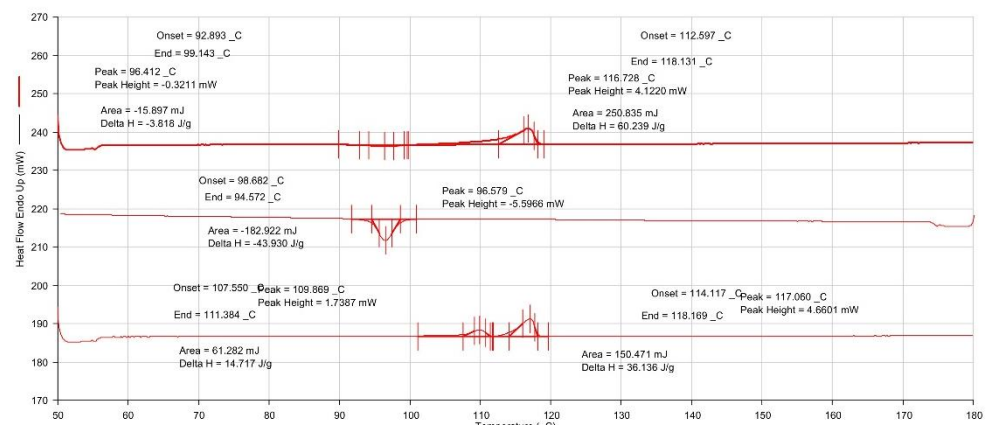
Filename: d:\ajnu\...95_5_0.001 2016-10-27.dcd - 15/10/2559 0:47:30
 Operator ID: 95_5_0.001 2016-10-27
 Sample ID: 95_5_0.001 2016-10-27
 Sample Weight: 4.283 mg
 Comment:
 95_5_0.001 2016-10-27: 95_5_0.001 2016-10-27 Heat Flow Endo Up (mW) (Subtracted) : Step: 6
 95_5_0.001 2016-10-27: 95_5_0.001 2016-10-27 Unsubtracted Heat Flow Endo Up (mW) : Steps: 1-7
 Baseline 2016-10-27: Baseline 2016-10-27 Unsubtracted Heat Flow Endo Up (mW) : Steps: 1-3
 95_5_0.001 2016-10-27: 95_5_0.001 2016-10-27 Heat Flow Endo Up (mW) : Step: 2
 95_5_0.001 2016-10-27: 95_5_0.001 2016-10-27 Heat Flow Endo Up (mW) (Subtracted) : Step: 2
 95_5_0.001 2016-10-27: 95_5_0.001 2016-10-27 Heat Flow Endo Up (mW) : Step: 4
 95_5_0.001 2016-10-27: 95_5_0.001 2016-10-27 Heat Flow Endo Up (mW) (Subtracted) : Step: 4
 95_5_0.001 2016-10-27: 95_5_0.001 2016-10-27 Heat Flow Endo Up (mW) : Step: 6



1) Hold for 1.0 min at 50.00_C
 2) Heat from 50.00_C to 180.00_C at 5.00_C/min
 3) Hold for 1.0 min at 180.00_C
 4) Cool from 180.00_C to 50.00_C at 5.00_C/min
 5) Hold for 1.0 min at 50.00_C
 6) Heat from 50.00_C to 180.00_C at 5.00_C/min
 7) Hold for 1.0 min at 180.00_C
 15/10/2559 1:04:19

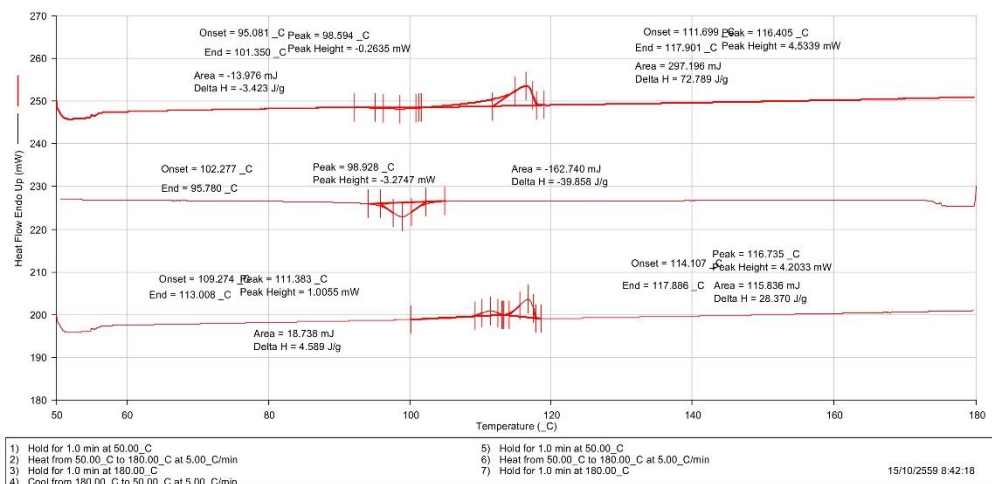
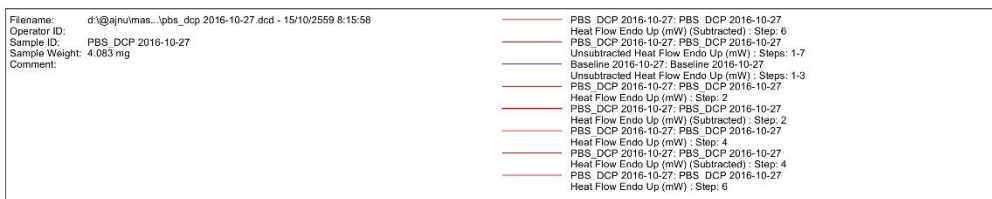
ภาพผนวก ก.3 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 95/5

Filename: d:\ajnu\master\...93_7 2016-11-1.dcd - 15/10/2559 22:05:07
 Operator ID: 93_7 2016-11-1
 Sample ID: 93_7 2016-11-1
 Sample Weight: 4.164 mg
 Comment:
 93_7 2016-11-1: 93_7 2016-11-1 Heat Flow Endo Up (mW) (Subtracted) : Step: 6
 93_7 2016-11-1: 93_7 2016-11-1 Unsubtracted Heat Flow Endo Up (mW) : Steps: 1-7
 Baseline 2016-11-1: Baseline 2016-11-1 Unsubtracted Heat Flow Endo Up (mW) : Steps: 1-3
 93_7 2016-11-1: 93_7 2016-11-1 Heat Flow Endo Up (mW) : Step: 2
 93_7 2016-11-1: 93_7 2016-11-1 Heat Flow Endo Up (mW) (Subtracted) : Step: 2
 93_7 2016-11-1: 93_7 2016-11-1 Heat Flow Endo Up (mW) : Step: 4
 93_7 2016-11-1: 93_7 2016-11-1 Heat Flow Endo Up (mW) (Subtracted) : Step: 4
 93_7 2016-11-1: 93_7 2016-11-1 Heat Flow Endo Up (mW) : Step: 6

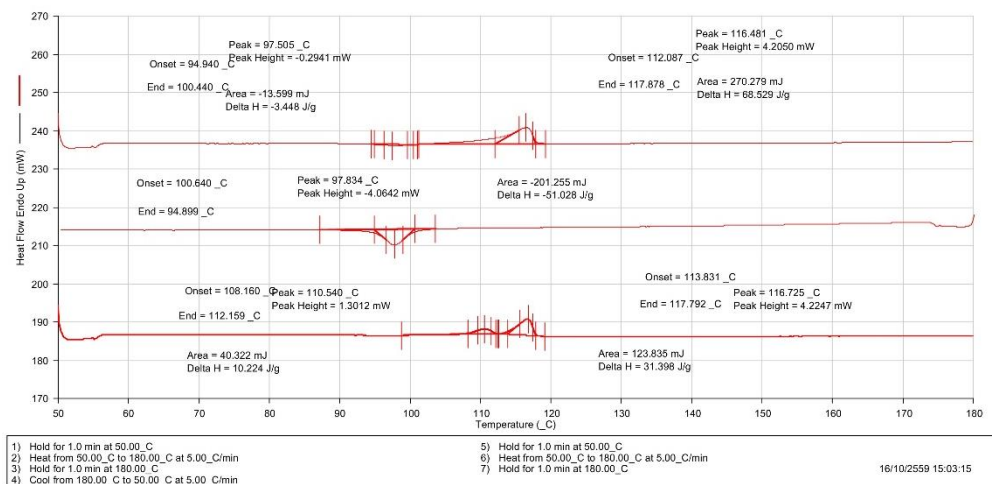
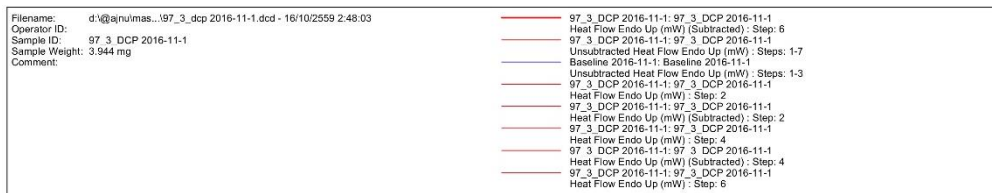


1) Hold for 1.0 min at 50.00_C
 2) Heat from 50.00_C to 180.00_C at 5.00_C/min
 3) Hold for 1.0 min at 180.00_C
 4) Cool from 180.00_C to 50.00_C at 5.00_C/min
 5) Hold for 1.0 min at 50.00_C
 6) Heat from 50.00_C to 180.00_C at 5.00_C/min
 7) Hold for 1.0 min at 180.00_C
 16/10/2559 14:37:42

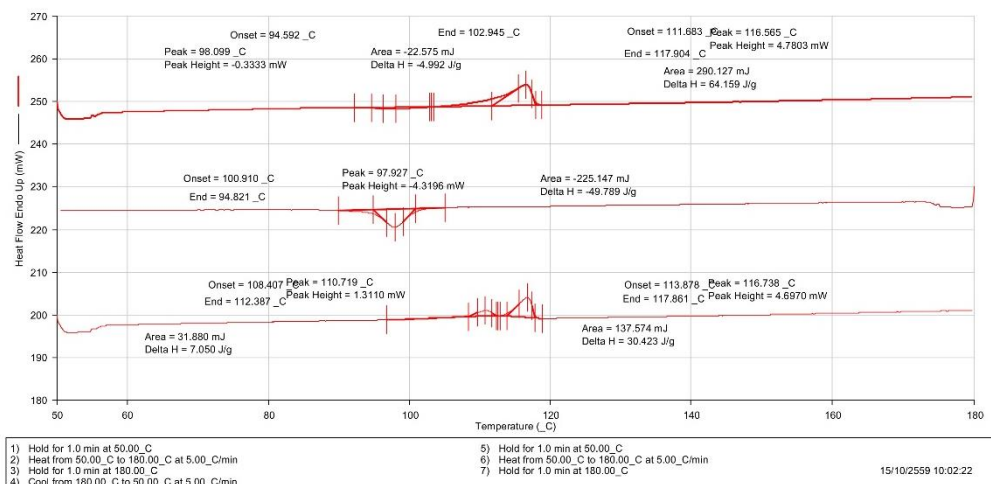
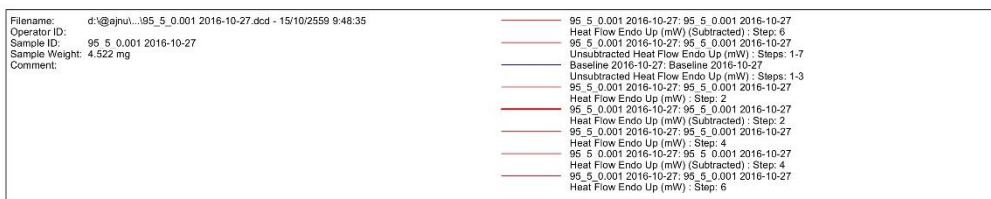
ภาพผนวก ก.4 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 93/7



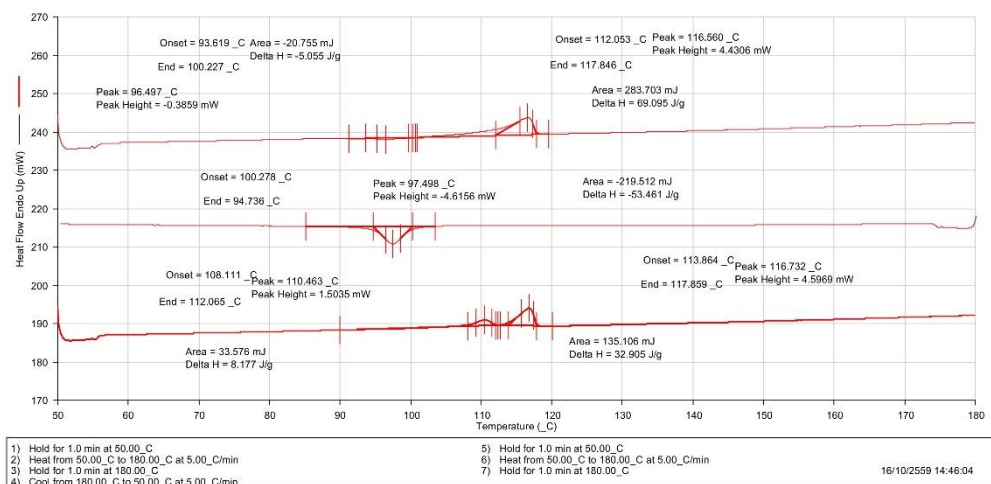
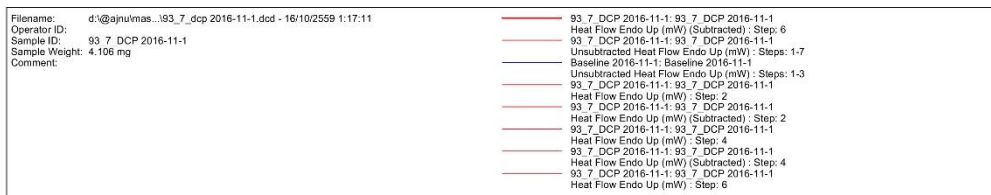
ภาพผนวก ก.5 DSC thermogram ของฟิล์ม PBS/DCP



ภาพผนวก ก.6 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 97/3/DCP



ภาพผนวก ก.7 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 97/3/DCP



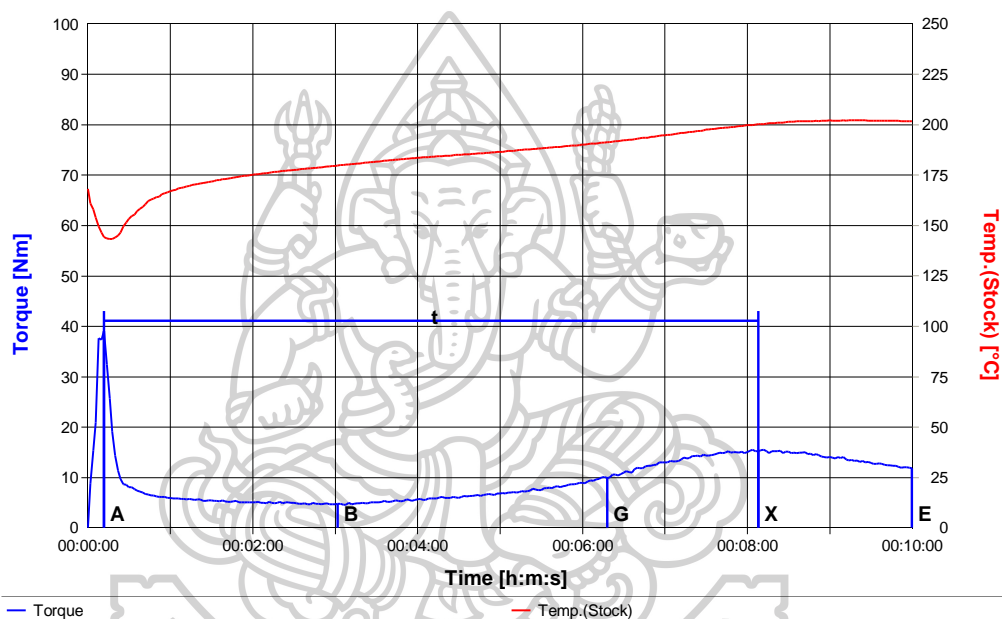
ภาพผนวก ก.8 DSC thermogram ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 95/5/DCP

ผลการทดสอบด้วยเครื่อง Internal mixer

BRABENDER® Plastogram
PLASTI-CORDER and Mixer Measuring Head
Fusion Behaviour / Version 3.2.10

Test Conditions

Order	:		Speed	:	80 1/min
Operator	:	Nattakarn	Mixer Temp.	:	180 °C
Date	:	10/12/2016 22:52	Start Temp.	:	177 °C
Drive Unit	:	Lab-Station	Meas. Range	:	50 Nm
Mixer	:	W 50 EHT - 3 Zones	Damping	:	
Loading Chute	:		Test Time	:	10 min
Sample	:	PBS_DCP 0.001	Sample Mass	:	40.0 g
Additive	:		Code Number	:	



Name	Time [h:m:s]	Torque [Nm]	Stock Temp. [°C]
Loading Peak	A	39.0	144
Minimum	B	4.7	180
Inflection Point	G	9.9	191
Maximum	X	15.2	200
End	E	11.8	202

Integration / Energy

Loading Peak	to	Minimum	A - B	9.2 [kNm]
Minimum	to	Maximum	B - X	23.3 [kNm]
Maximum	to	End	X - E	12.9 [kNm]
Loading Peak	to	Maximum	A - X	32.5 [kNm]
Loading Peak	to	End (W)	A - E	45.4 [kNm]
Specific Energy(W/Sample Mass)				1.1 [kNm/g]
Gelation Area above B			B - X	11.1 [kNm]

Results

Fusion Time t	A - X	00:07:56 [h:m:s]
Gelation Speed v		4.9 [Nm/min]

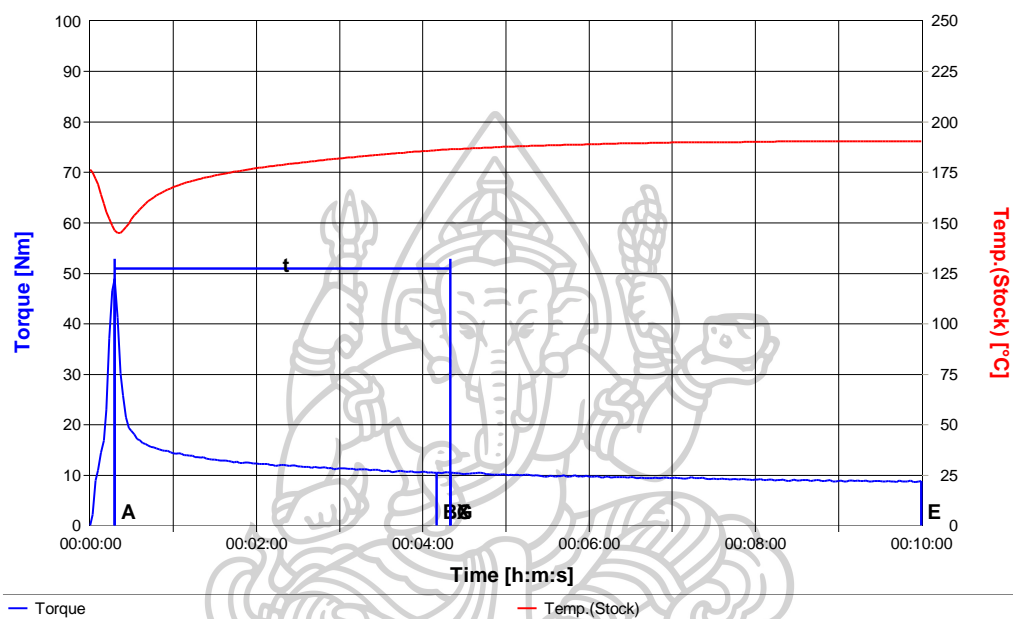
ภาพผนวก ก.9 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง Internal mixer ของพอลิเมอร์ผสม PBS/DCP

สัดส่วน 100/0.001

BRABENDER® Plastogram
PLASTI-CORDER and Mixer Measuring Head
Fusion Behaviour / Version 3.2.10

Test Conditions

Order	:		Speed	:	80	1/min
Operator	:	Nattakarn	Mixer Temp.	:	180	°C
Date	:	10/13/2016 00:56	Start Temp.	:	176	°C
Drive Unit	:	Lab-Station	Meas. Range	:	50	Nm
Mixer	:	W 50 EHT - 3 Zones	Damping	:		
Loading Chute	:		Test Time	:	10	min
Sample	:	PBAT_DCP 0.001	Sample Mass	:	40.0	g
Additive	:		Code Number	:		



Name		Time [h:m:s]	Torque [Nm]	Stock Temp. [°C]
Loading Peak	A	00:00:18	48.9	146
Minimum	B	00:04:10	10.5	186
Inflection Point	G	00:04:20	10.5	186
Maximum	X	00:04:20	10.5	186
End	E	00:10:00	8.8	190

Integration / Energy

Loading Peak	to	Minimum	A - B	25.4	[kNm]
Minimum	to	Maximum	B - X	1.2	[kNm]
Maximum	to	End	X - E	26.8	[kNm]
Loading Peak	to	Maximum	A - X	26.7	[kNm]
Loading Peak	to	End (W)	A - E	53.5	[kNm]
Specific Energy(W/Sample Mass)				1.3	[kNm/g]
Gelation Area above B			B - X	0.3	[kNm]

Results

Fusion Time t		A - X	00:04:02	[h:m:s]
Gelation Speed v			-0.2	[Nm/min]

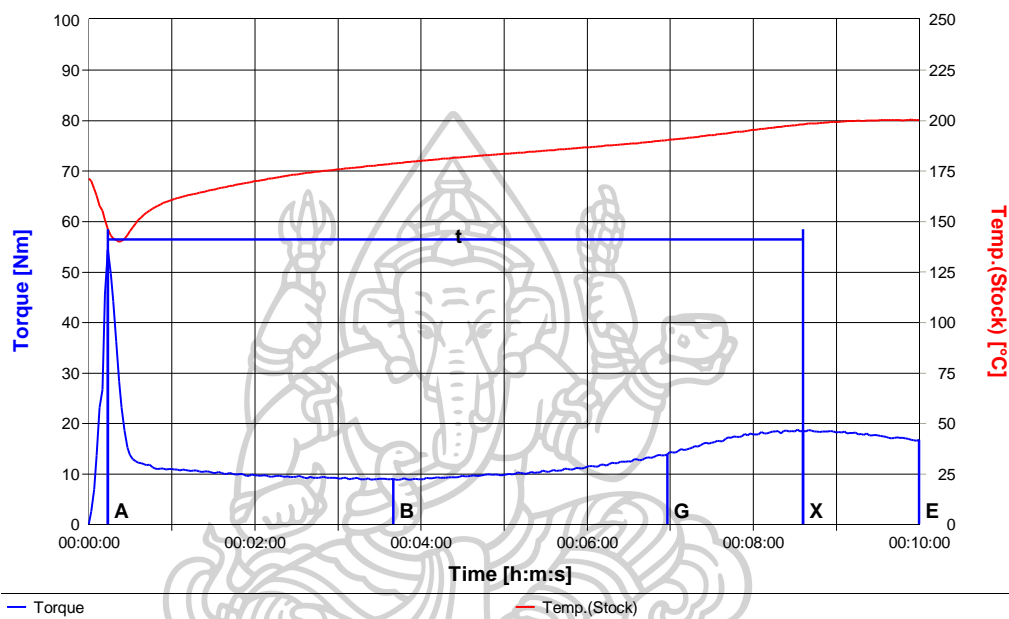
ภาพผนวก ก.10 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง Internal mixer ของพอลิเมอร์ผสม PBAT/DCP

สัดส่วน 100/0.001

BRABENDER® Plastogram
PLASTI-CORDER and Mixer Measuring Head
Fusion Behaviour / Version 3.2.10

Test Conditions

Order	:		Speed	:	80 1/min
Operator	:	Nattakarn	Mixer Temp.	:	180 °C
Date	:	10/12/2016 21:58	Start Temp.	:	170 °C
Drive Unit	:	Lab-Station	Meas. Range	:	50 Nm
Mixer	:	W 50 EHT - 3 Zones	Damping	:	
Loading Chute	:		Test Time	:	10 min
Sample	:	PBS_PBAT_DCP 0.001	Sample Mass	:	40.0 g
Additive	:		Code Number	:	



Name		Time [h:m:s]	Torque [Nm]	Stock Temp. [°C]
Loading Peak	A	00:00:14	54.4	146
Minimum	B	00:03:40	9.0	179
Inflection Point	G	00:06:58	13.9	190
Maximum	X	00:08:36	18.6	198
End	E	00:10:00	16.7	200

Integration / Energy

Loading Peak	to	Minimum	A - B	19.7 [kJNm]
Minimum	to	Maximum	B - X	31.6 [kJNm]
Maximum	to	End	X - E	12.5 [kJNm]
Loading Peak	to	Maximum	A - X	51.2 [kJNm]
Loading Peak	to	End (W)	A - E	63.7 [kJNm]
Specific Energy(W/Sample Mass)				1.6 [kJNm/g]
Gelation Area above B			B - X	9.2 [kJNm]

Results

Fusion Time t	A - X	00:08:22 [h:m:s]
Gelation Speed v		4.5 [Nm/min]

ภาพผนวก ก.11 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง Internal mixer ของพอลิเมอร์ผสม

PBS/PBAT/DCP สัดส่วน 95/5/0.001

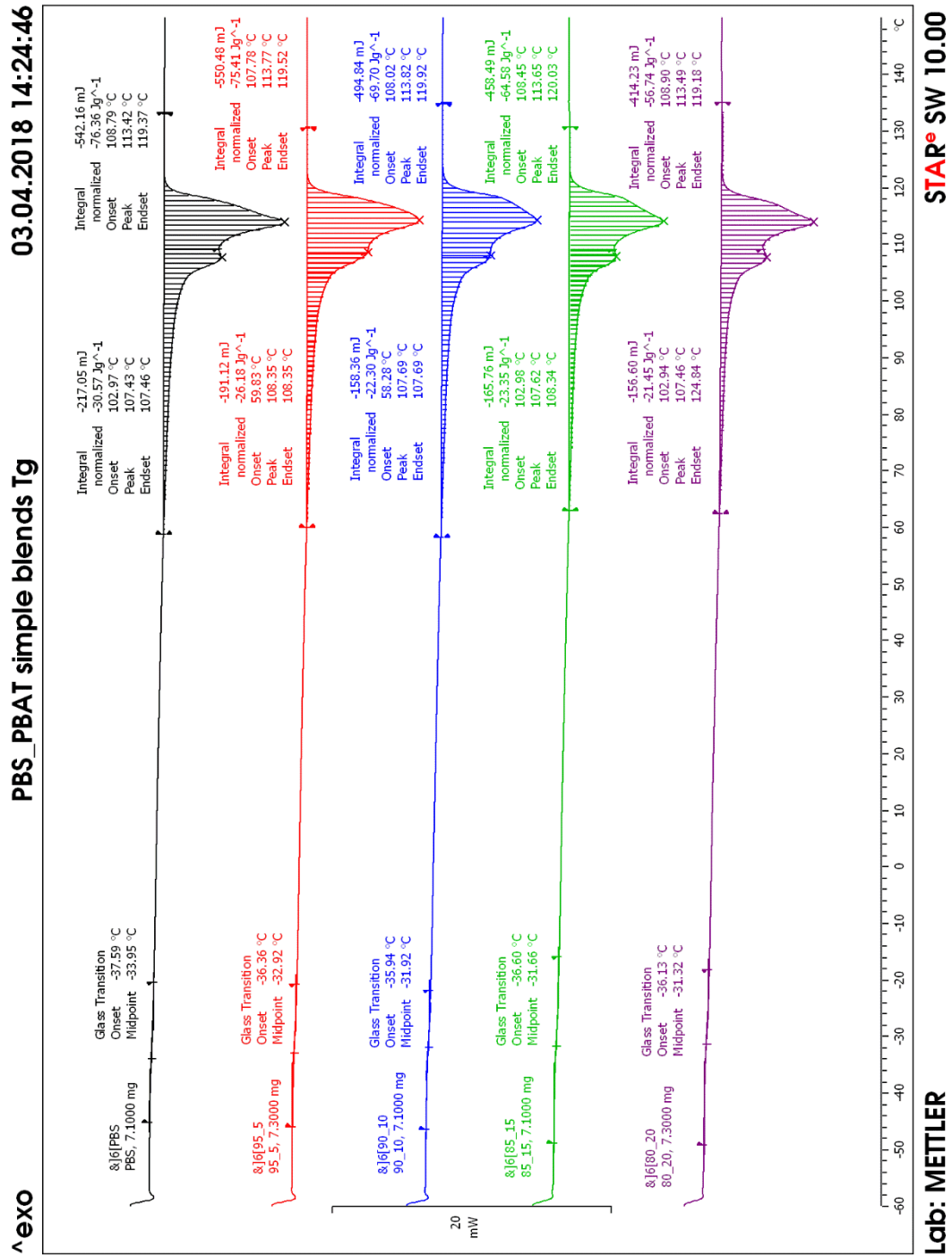
ก-2 สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

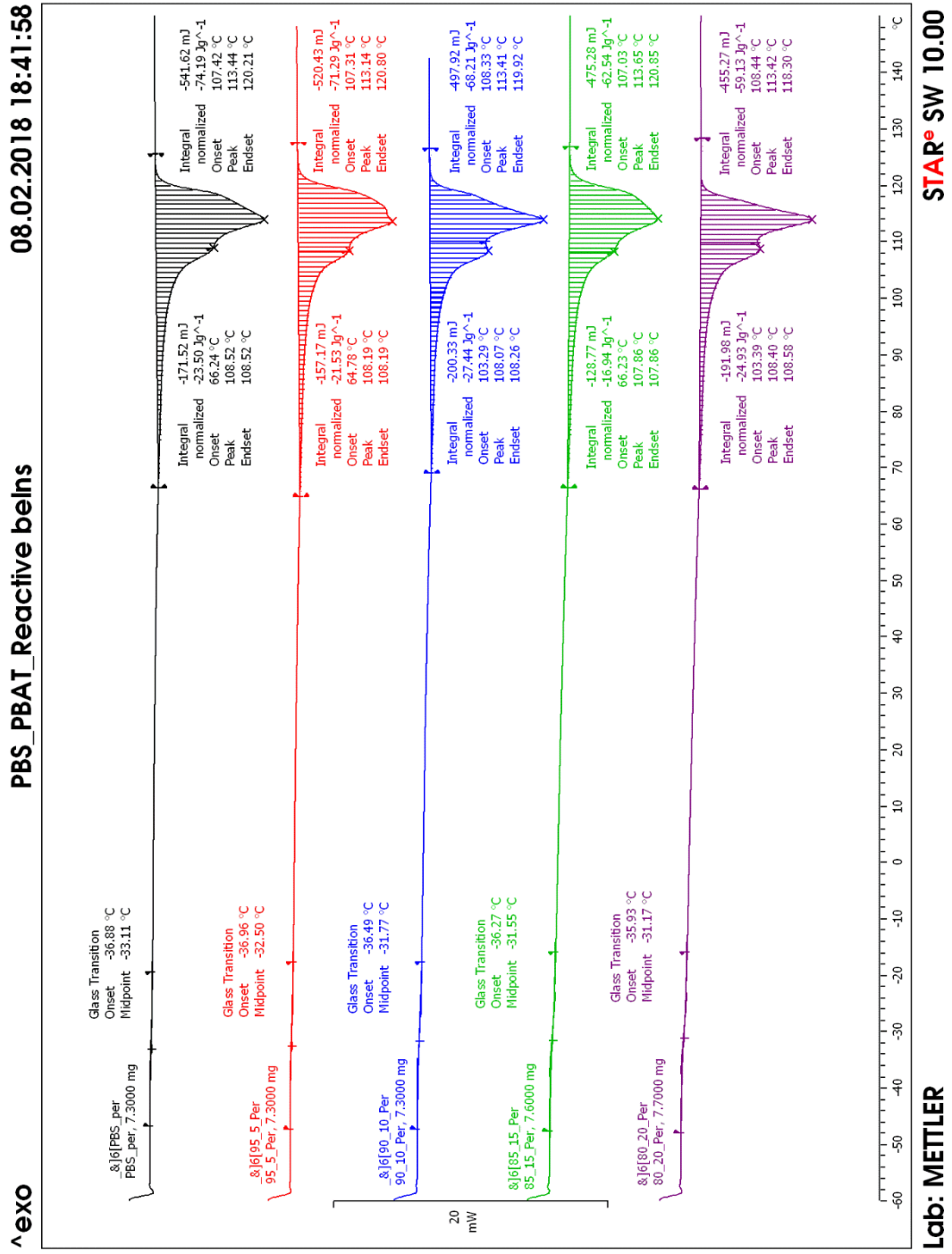
ตารางผนวก ก.2 สรุปค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Young's modulus, Tensile strength Elongation at break และ Tear strength ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox สัดส่วนต่างๆ

Sample	Young's modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tear strength (N/mm)
Neat PBS	510.18±12.82	31.40±0.85	16.92±0.98	18.51±0.47
95/5	554.83±12.78	34.77±1.37	17.12±1.97	18.13±0.42
90/10	491.73±18.05	31.85±1.13	18.89±0.63	13.36±1.24
85/15	441.41±19.99	28.15±1.36	16.74±0.61	10.63±0.38
80/20	341.73±28.17	20.27±2.31	19.66±1.58	9.74±0.39
PBS/Perkadox	518.74±18.58	31.34±1.25	18.87±1.07	15.78±0.34
95/5/Perkadox	462.72±24.09	29.10±1.72	19.53±1.00	11.59±0.22
90/10/Perkadox	423.47±17.37	26.08±1.24	19.58±3.42	7.76±0.20
85/15/Perkadox	377.01±15.78	23.62±1.05	32.98±14.51	6.90±0.24
80/20/Perkadox	547.40±11.05	37.83±1.33	313.40±12.89	8.78±0.44

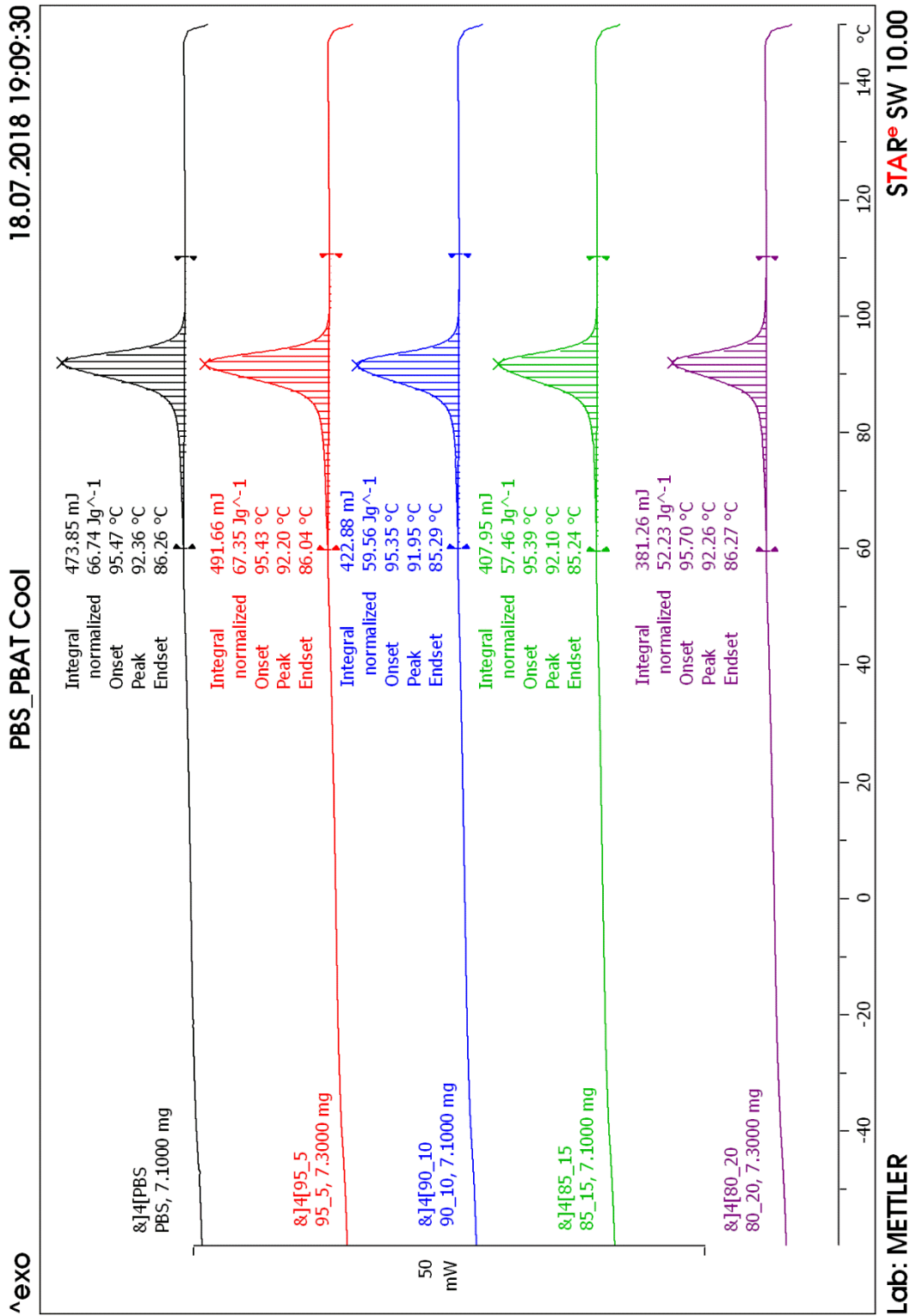
ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



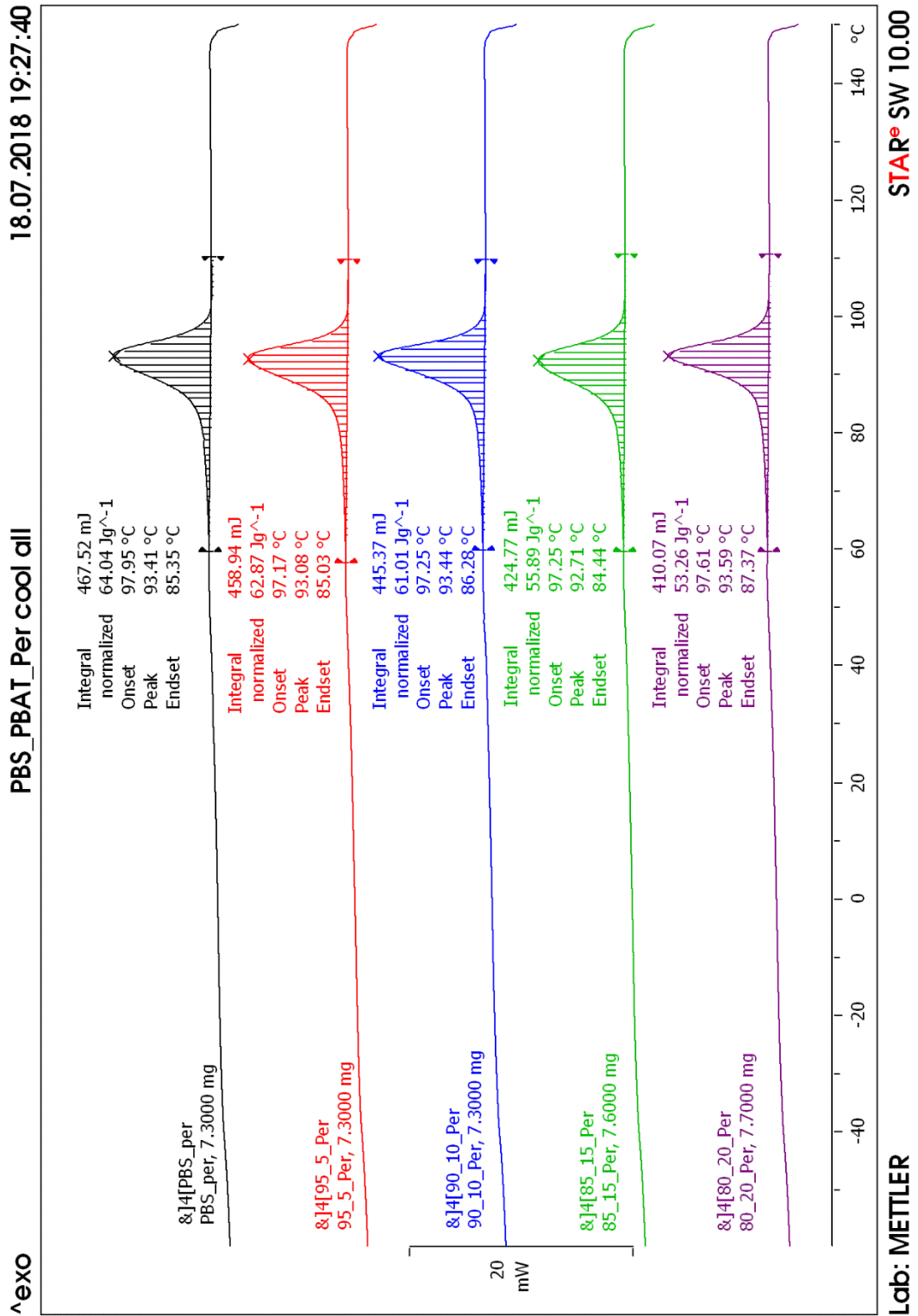
ภาพผนวก ก.12 DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติม Perkdaox



ภาพผนวก ก.13 DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติม Perkdaox

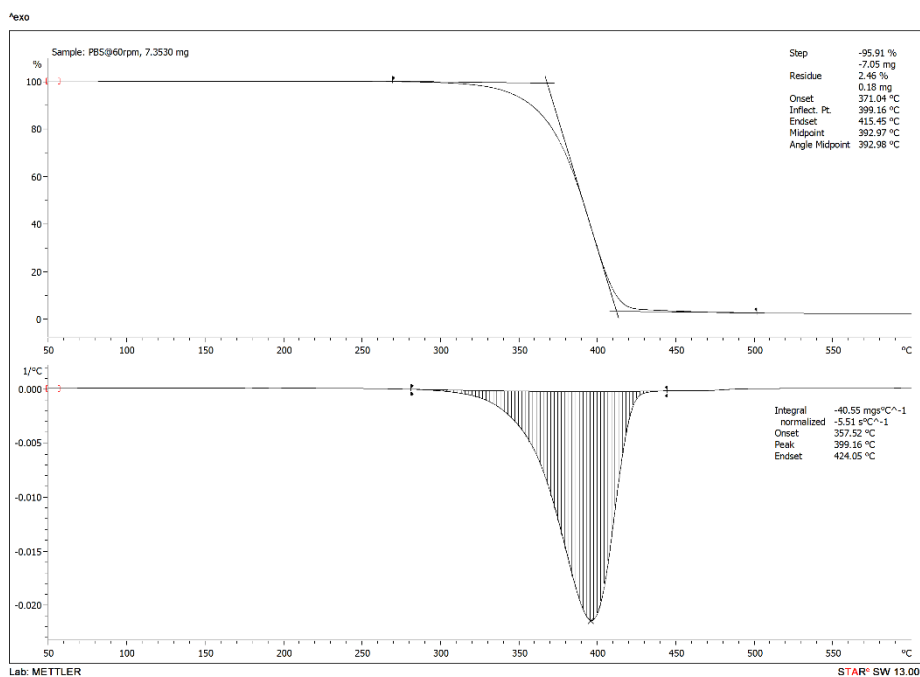


ภาพผนวก ก.14 15 DSC thermogram ในขั้นตอนการทำให้เย็นตัวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติม Perkdaox

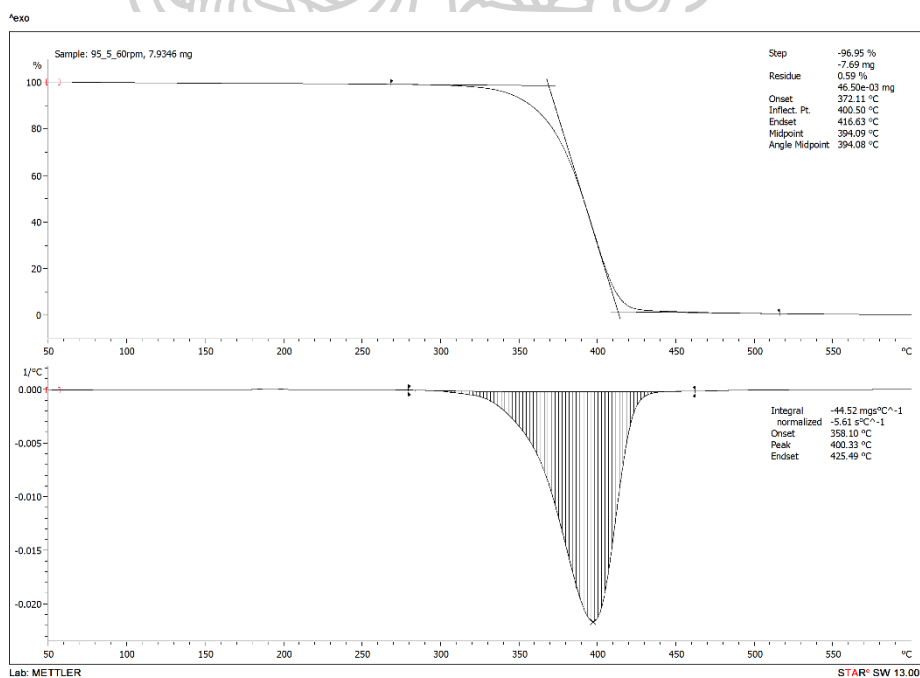


ภาพผนวก ก.16 DSC thermogram ในขั้นตอนการทำให้เย็นตัวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่เติม Perkdaox

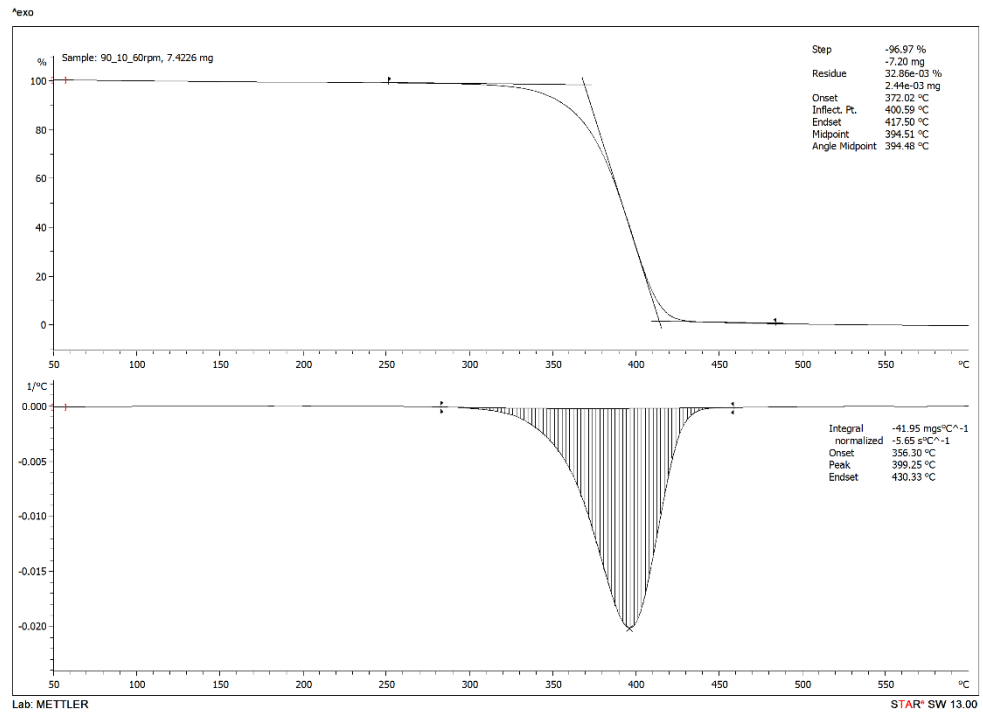
ผลการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA



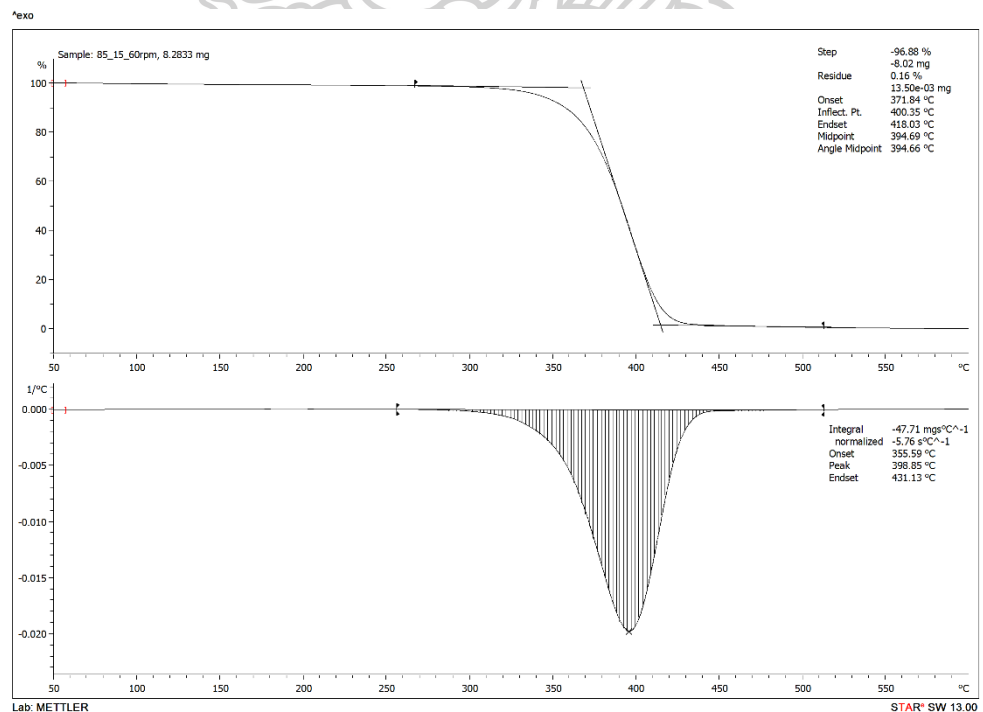
ภาพผนวก ก.17 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์ม Neat PBS



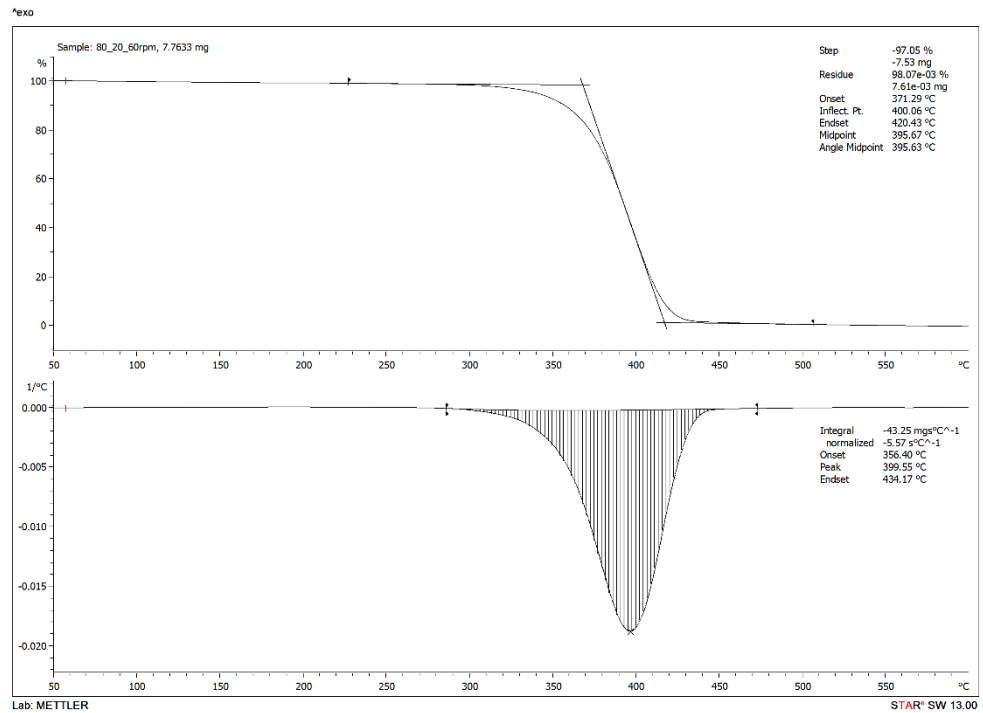
ภาพผนวก ก.18 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 95/5



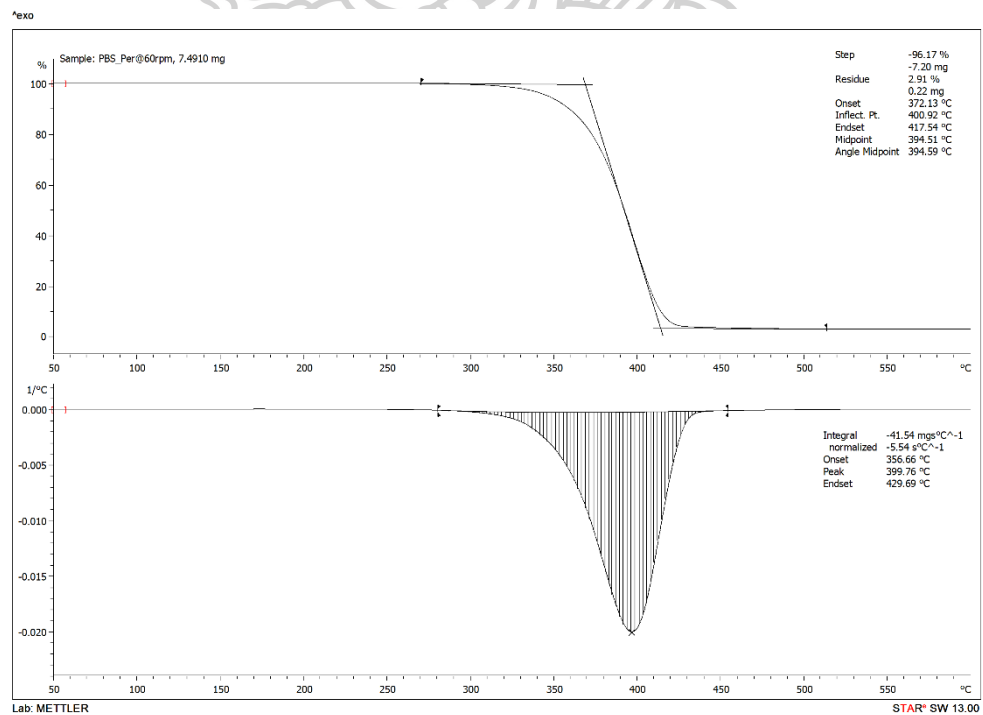
ภาพผนวก ก.19 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 90/10



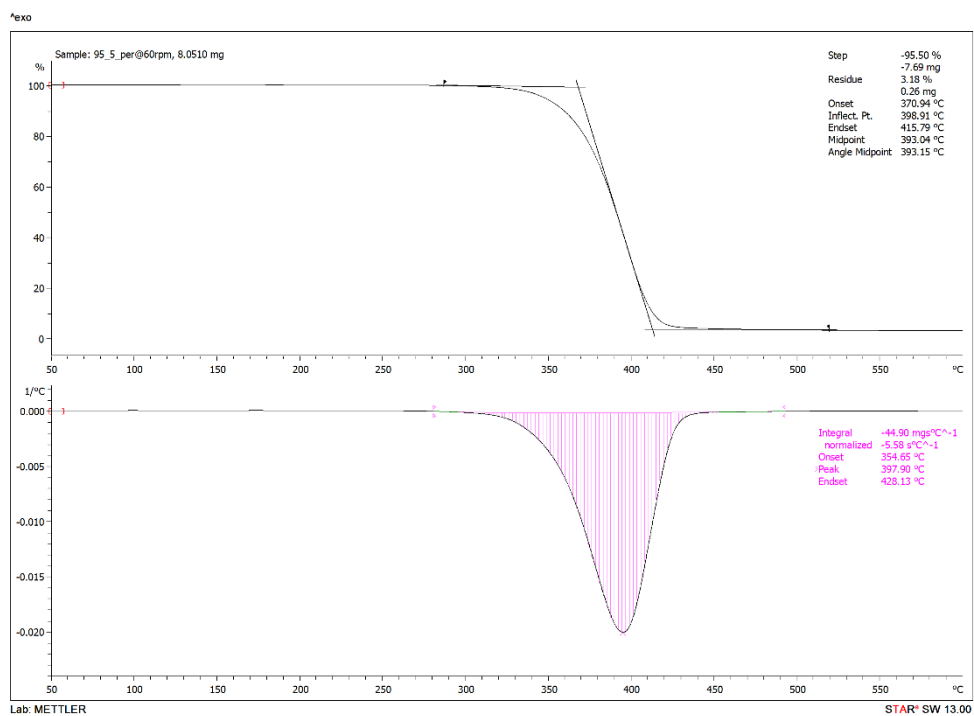
ภาพผนวก ก.20 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 85/15



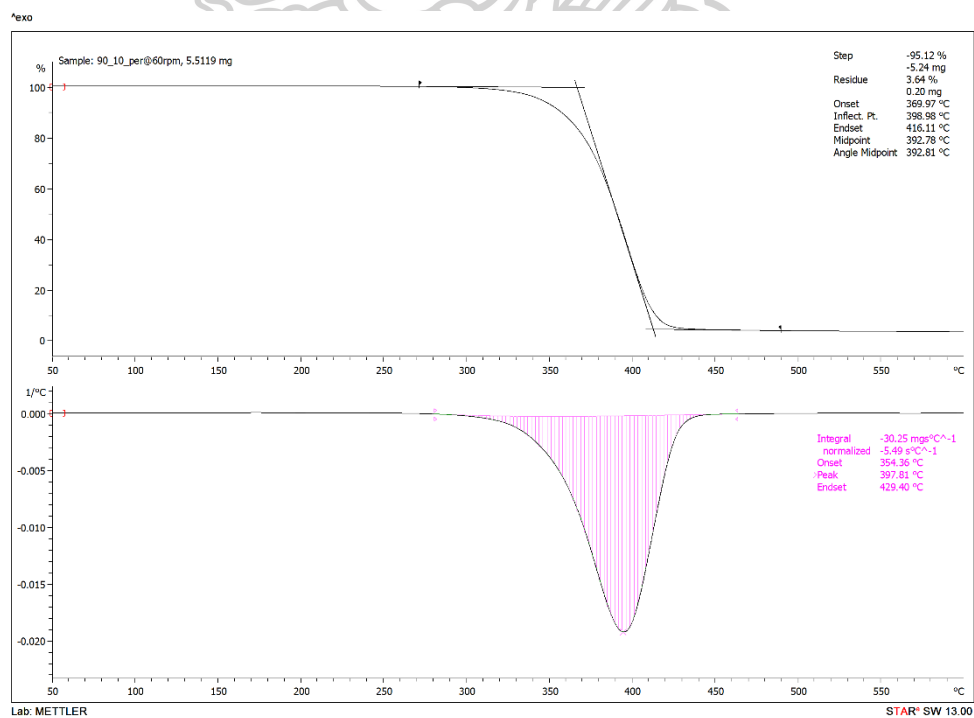
ภาพผนวก ก.21 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20



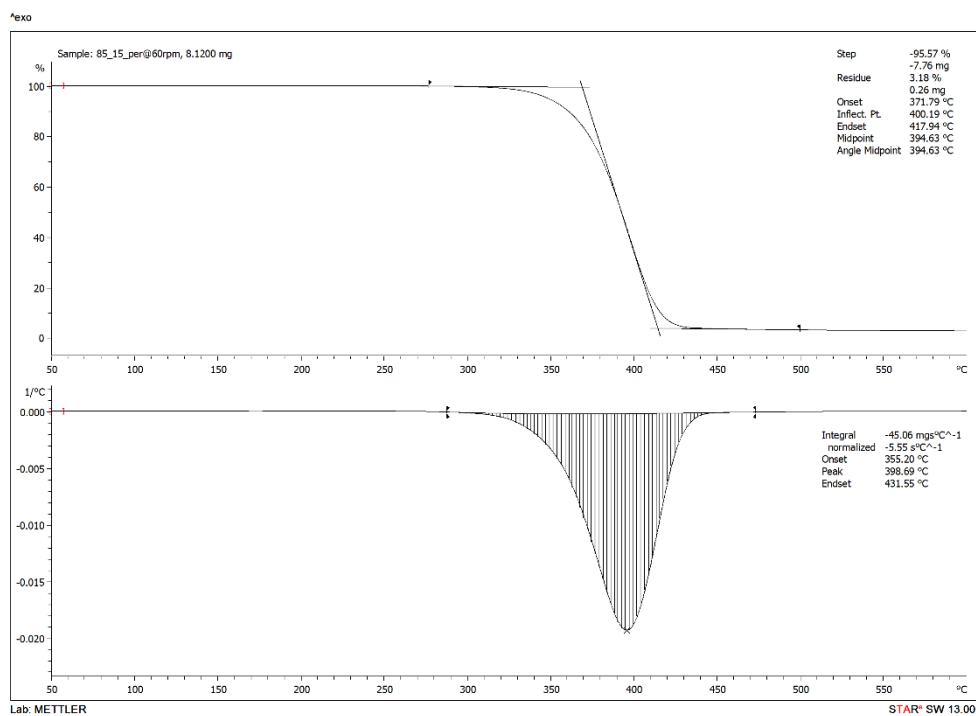
ภาพผนวก ก.22 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์ม PBS/Perkadox



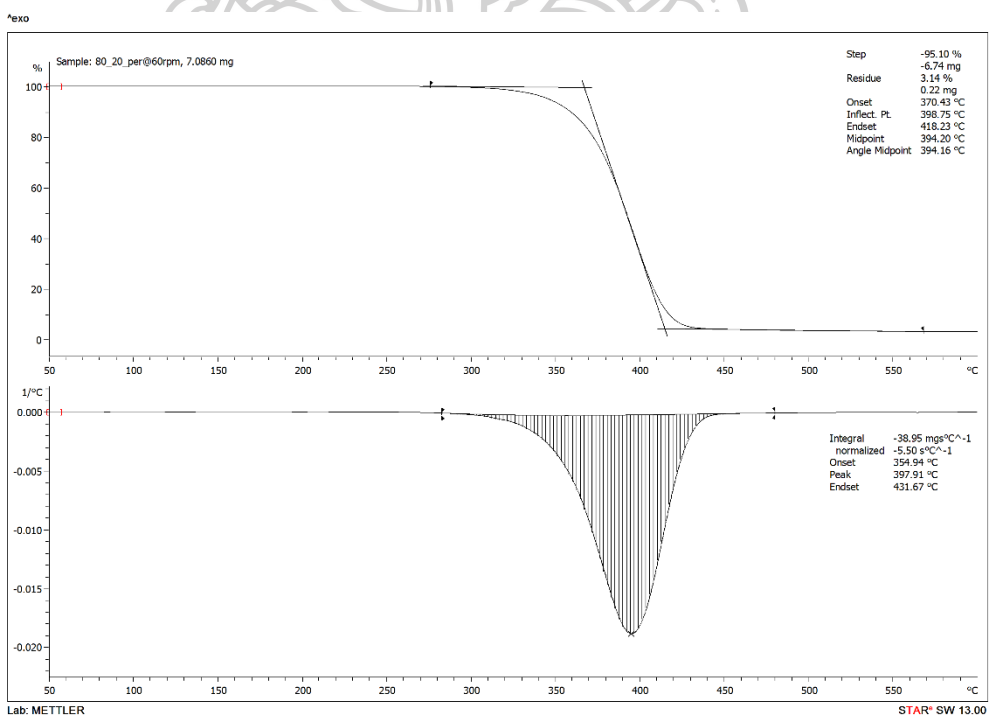
ภาพผนวก ก.23 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 95/5/Perkaodox



ภาพผนวก ก.24 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 90/10/Perkaodox



ภาพผนวก ก.25 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 85/15/Perkaodox



ภาพผนวก ก.26 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสัดส่วน 80/20/Perkaodox

ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

ตารางผนวก ก.3 แสดงข้อมูลดิบของอัตราการซึมผ่านของไอน้ำเฉลี่ยที่ผ่านการ normalised และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox

Sample	WVTR _{raw} (g/m ² day)	Thickness (μm)	WVTR _{normalised} (g.mil/m ² day)	WVTR _{avg} (g.mil/m ² day)	S.D.
Neat PBS	33.04	100.6	132.96	133.29	6.62
	30.97	101.2	125.354		
	34.97	101.2	141.56		
95/5	34.57	107.6	148.80	142.74	4.35
	35.66	98.6	140.65		
	35.26	98.4	138.77		
90/10	39.07	100.4	156.91	153.64	3.73
	36.74	101	148.43		
	38.51	101	155.58		
85/15	46.56	106.4	198.16	193.68	5.99
	46.30	100	185.20		
	46.71	105.8	197.68		
80/20	50.31	114.2	229.80	224.88	15.29
	49.37	103.4	204.19		
	47.30	127.2	240.65		
PBS/Perkadox	43.95	109.8	193.01	188.94	4.40
	42.80	106.8	182.83		
	43.09	110.8	190.99		
95/5/Perkadox	45.19	114.2	206.45	202.93	8.67
	45.30	105.4	190.99		
	49.56	106.6	211.34		
	67.05	106.8	286.44		

Sample	WVTR _{raw} (g/m ² day)	Thickness (μ m)	WVTR _{normalised} (g.mil/m ² day)	WVTR _{avg} (g.mil/m ² day)	S.D.
90/10/Perkadox	54.73	112.4	246.088	239.61	5.15
	53.60	111.6	239.265		
	52.49	111.2	233.49		
85/15/Perkadox	63.90	108.6	277.56	285.48	7.30
	62.11	114.2	283.73		
	62.43	118.2	295.18		
80/20/Perkadox	65.77	116.6	306.74	287.48	15.32
	67.05	106.8	286.44		
	65.23	103.2	269.27		

ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

ตารางผนวก ก.4 แสดงข้อมูลดิบของอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox

Sample	GTR _{raw} (cm ³ /m ² dbar)	Thickness (μ m)	OP (cm ³ mm/ m ² dbar)	OP _{avg} (cm ³ mil/ m ² dbar)	S.D.
Neat PBS	97.5	112.4	438.36	466.19	29.34
	123	103	506.76		
	104	109	453.44		
95/5	107	115.6	494.77	486.18	10.63
	131	94	492.56		
	124	95	471.20		
90/10	134	102.4	548.86	522.25	18.83
	131	97	508.28		
	140	91	509.60		

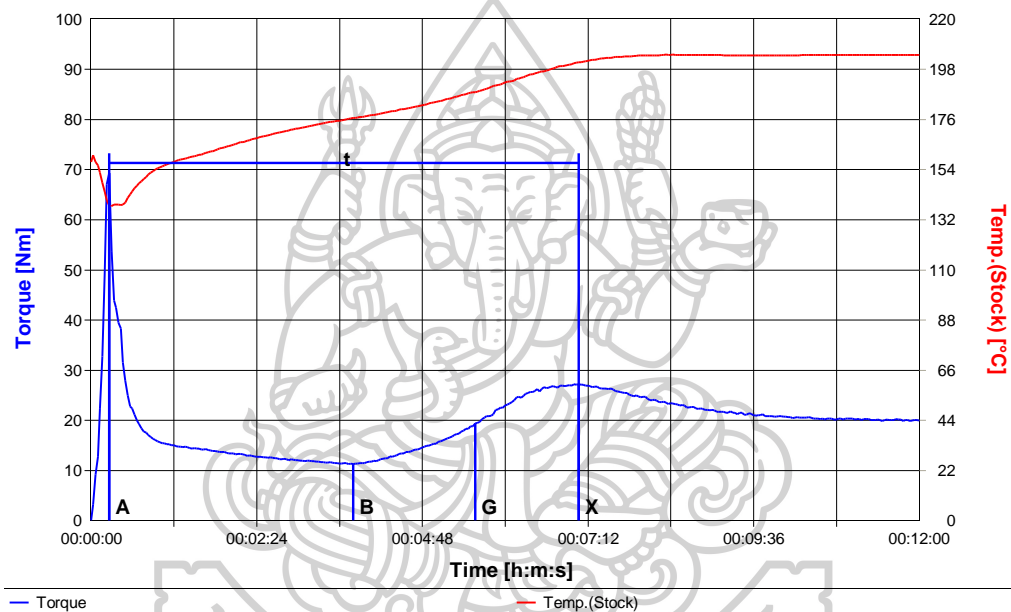
Sample	GTR _{raw} (cm ³ /m ² dbar)	Thickness (μm)	OP (cm ³ mm/ m ² dbar)	OP _{avg} (cm ³ mil/ m ² dbar)	S.D.
85/15	185	101	747.40	733.98	19.56
	202	92.6	748.21		
	162	109	706.32		
80/20	256	106	1085.44	1029.30	73.16
	202	114.6	925.97		
	232	116	1076.48		
PBS/Perkadox	153	109.8	671.98	688.01	45.67
	155	121	750.20		
	142	113	641.84		
95/5/Perkadox	159	111.4	708.50	690.23	14.19
	156	108	673.92		
	152	113.2	688.26		
90/10/Perkadox	190	122.2	928.72	928.65	58.90
	197	127	1000.76		
	202	106	856.48		
85/15/Perkadox	224	132	1182.72	1109.90	60.61
	213	121.4	1034.33		
	228	122	1112.64		
80/20/Perkadox	308	111	1367.52	1322.16	91.54
	270	110.6	1194.48		
	308	114	1404.48		

ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง Internal mixer

BRABENDER® Plastogram
PLASTI-CORDER and Mixer Measuring Head
Fusion Behaviour / Version 3.2.10

Test Conditions

Order	:	Speed	:	80	1/min
Operator	:	Mixer Temp.	:	180	°C
Date	:	Start Temp.	:	150	°C
Drive Unit	:	Meas. Range	:	50	Nm
Mixer	:	Damping	:		
Loading Chute	:	Test Time	:	15	min
Sample	:	Sample Mass	:	50.0	g
Additive	:	Code Number	:		



Name	Time [h:m:s]	Torque [Nm]	Stock Temp. [°C]
Loading Peak	A	69.3	138
Minimum	B	11.3	177
Inflection Point	G	19.3	188
Maximum	X	27.2	201
End	E	20.0	204

Integration / Energy

Loading Peak	to	Minimum	A - B	27.6	[kNm]
Minimum	to	Maximum	B - X	31.3	[kNm]
Maximum	to	End	X - E	57.1	[kNm]
Loading Peak	to	Maximum	A - X	58.9	[kNm]
Loading Peak	to	End (W)	A - E	116.0	[kNm]
Specific Energy(W/Sample Mass)				2.3	[kNm/g]
Gelation Area above B			B - X	12.8	[kNm]

Results

Fusion Time t	A - X	00:06:48	[h:m:s]
Gelation Speed v		8.7	[Nm/min]

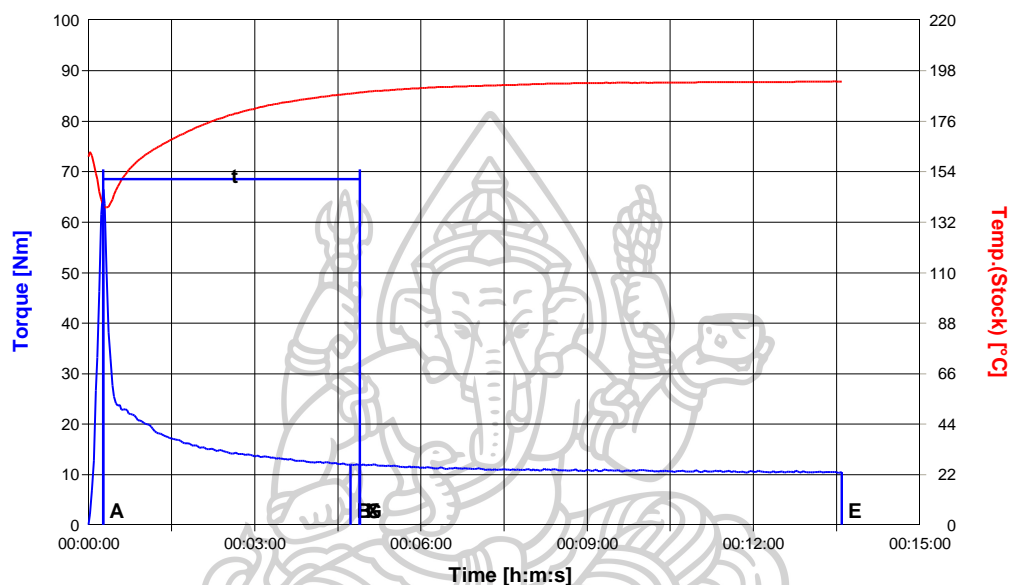
ภาพผนวก ก.27 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง Internal mixer ของพอลิเมอร์ผสม PBS/Perkadox

สัดส่วน 100/0.001

BRABENDER® Plastogram
PLASTI-CORDER and Mixer Measuring Head
Fusion Behaviour / Version 3.2.10

Test Conditions

Order	:		Speed	:	80 1/min
Operator	:	Nattakarn	Mixer Temp.	:	180 °C
Date	:	12/21/2016 15:45	Start Temp.	:	158 °C
Drive Unit	:	Lab-Station	Meas. Range	:	50 Nm
Mixer	:	W 50 EHT - 3 Zones	Damping	:	
Loading Chute	:		Test Time	:	15 min
Sample	:	PBAT_Perk0.001	Sample Mass	:	50.0 g
Additive	:		Code Number	:	



Name		Time [h:m:s]	Torque [Nm]	Stock Temp. [°C]
Loading Peak	A	00:00:16	66.5	140
Minimum	B	00:04:44	11.9	188
Inflection Point	G	00:04:54	11.9	188
Maximum	X	00:04:54	11.9	188
End	E	00:13:36	10.4	193

Integration / Energy

Loading Peak	to	Minimum	A - B	37.0 [kNm]
Minimum	to	Maximum	B - X	1.4 [kNm]
Maximum	to	End	X - E	47.6 [kNm]
Loading Peak	to	Maximum	A - X	38.4 [kNm]
Loading Peak	to	End (W)	A - E	85.9 [kNm]
Specific Energy(W/Sample Mass)				1.7 [kNm/g]
Gelation Area above B			B - X	0.4 [kNm]

Results

Fusion Time t	A - X	00:04:38 [h:m:s]
Gelation Speed v		-0.1 [Nm/min]

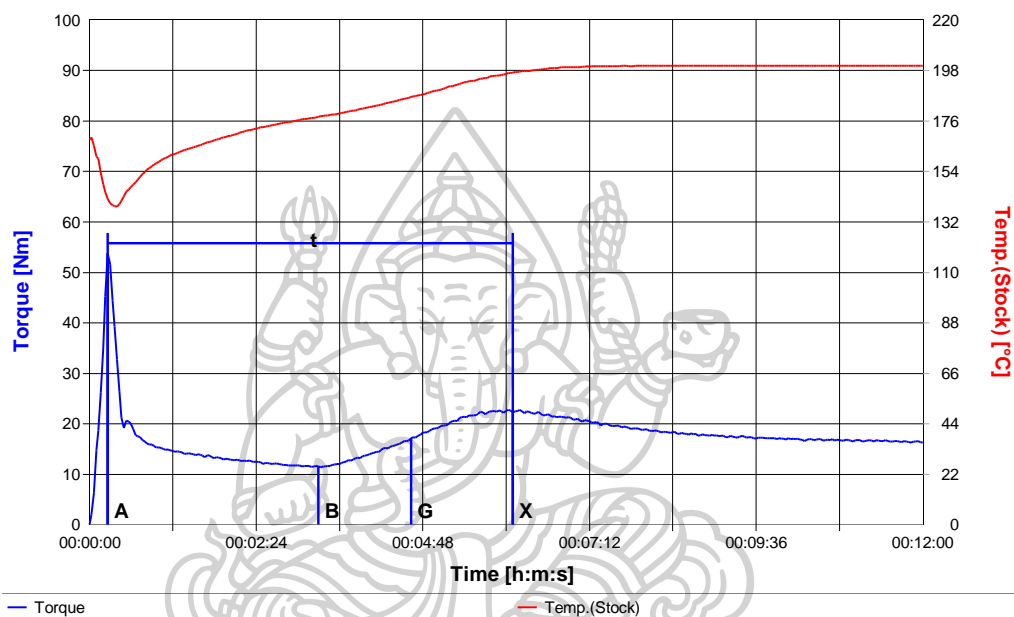
ภาพผนวก ก.28 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง Internal mixer ของพอลิเมอร์ผสม

PBAT/Perkadox สัดส่วน 100/0.001

BRABENDER® Plastogram
PLASTI-CORDER and Mixer Measuring Head
Fusion Behaviour / Version 3.2.10

Test Conditions

Order	:		Speed	:	80 1/min
Operator	:	Nattakarn	Mixer Temp.	:	180 °C
Date	:	12/21/2016 14:59	Start Temp.	:	165 °C
Drive Unit	:	Lab-Station	Meas. Range	:	50 Nm
Mixer	:	W 50 EHT - 3 Zones	Damping	:	
Loading Chute	:		Test Time	:	15 min
Sample	:	PBS80_PBAT20_Perko.001	Sample Mass	:	50.0 g
Additive	:		Code Number	:	



Name		Time [h:m:s]	Torque [Nm]	Stock Temp. [°C]
Loading Peak	A	00:00:16	53.8	142
Minimum	B	00:03:18	11.6	178
Inflection Point	G	00:04:38	17.1	186
Maximum	X	00:06:06	22.3	197
End	E	00:13:00	16.1	200

Integration / Energy

Loading Peak	to	Minimum	A - B	23.2 [kJNm]
Minimum	to	Maximum	B - X	24.5 [kJNm]
Maximum	to	End	X - E	62.5 [kJNm]
Loading Peak	to	Maximum	A - X	47.7 [kJNm]
Loading Peak	to	End (W)	A - E	110.3 [kJNm]
Specific Energy(W/Sample Mass)				2.2 [kJNm/g]
Gelation Area above B			B - X	8.3 [kJNm]

Results

Fusion Time t		A - X	00:05:50 [h:m:s]
Gelation Speed v			6.3 [Nm/min]

ภาพผนวก ก.29 ผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง Internal mixer ของพอลิเมอร์ผสม

PBS/PBAT/Perkadox สัดส่วน 80/20/0.001

ก-3 ผลของการเคลือบผิวฟิล์มพอลิเมอร์ผสมด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย

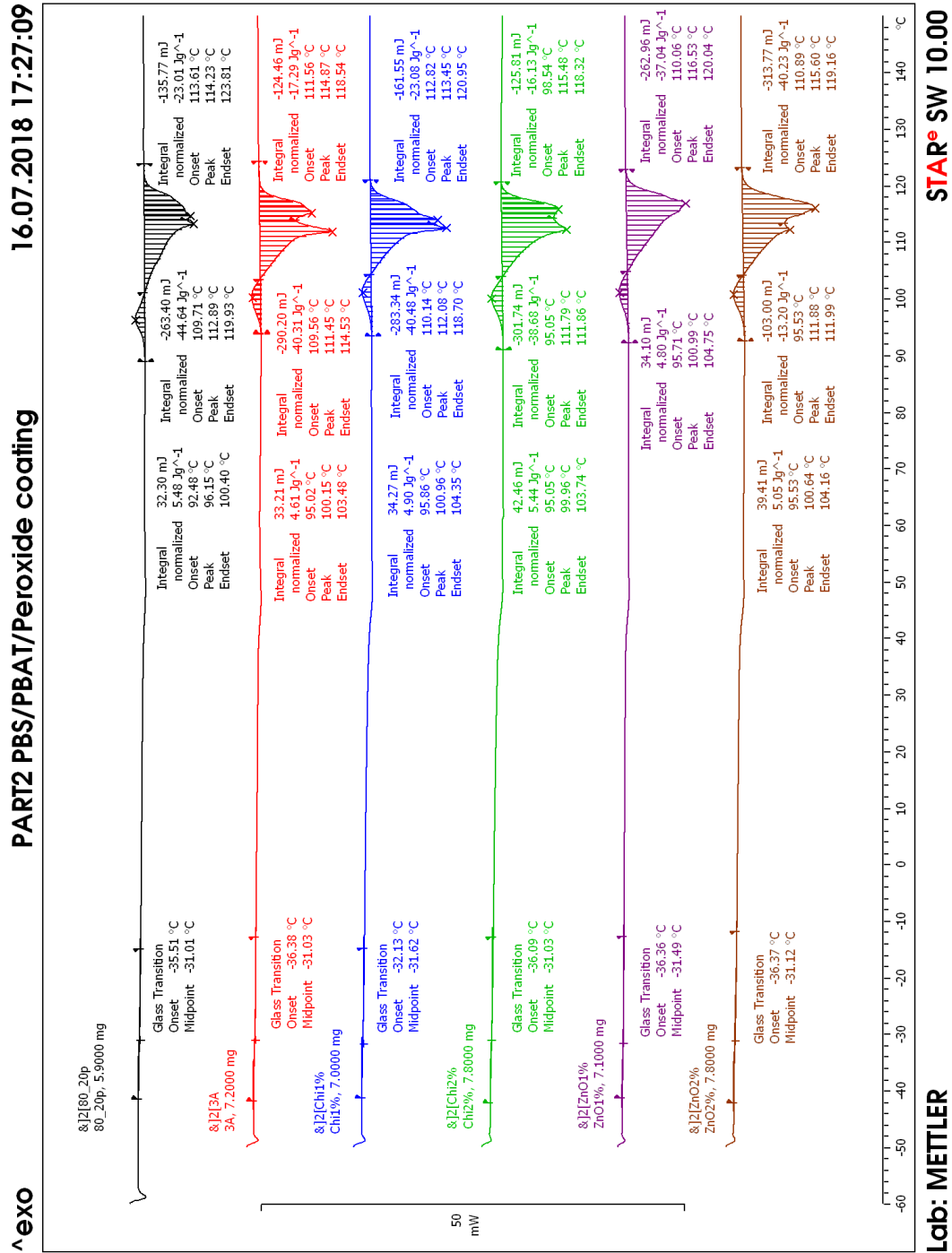
ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางผนวก ก.5 สรุปค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Tensile strength, Elongation at break และ Tear strength ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย

Sample	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tear strength (N/mm)
Untreated	37.83±1.33	313.40±12.89	8.78±0.44
Treated 3 A	38.86±2.74	320.18±24.84	8.46±0.30
Chitosan 1 %	37.39±1.55	305.59±23.92	8.99±0.20
Chitosan 2 %	35.61±1.79	204.25±13.02	9.41±0.12
ZnO 1 %	32.49±1.11	326.35±18.29	8.79±0.21
ZnO 2 %	35.70±1.93	346.85±11.57	9.66±0.21

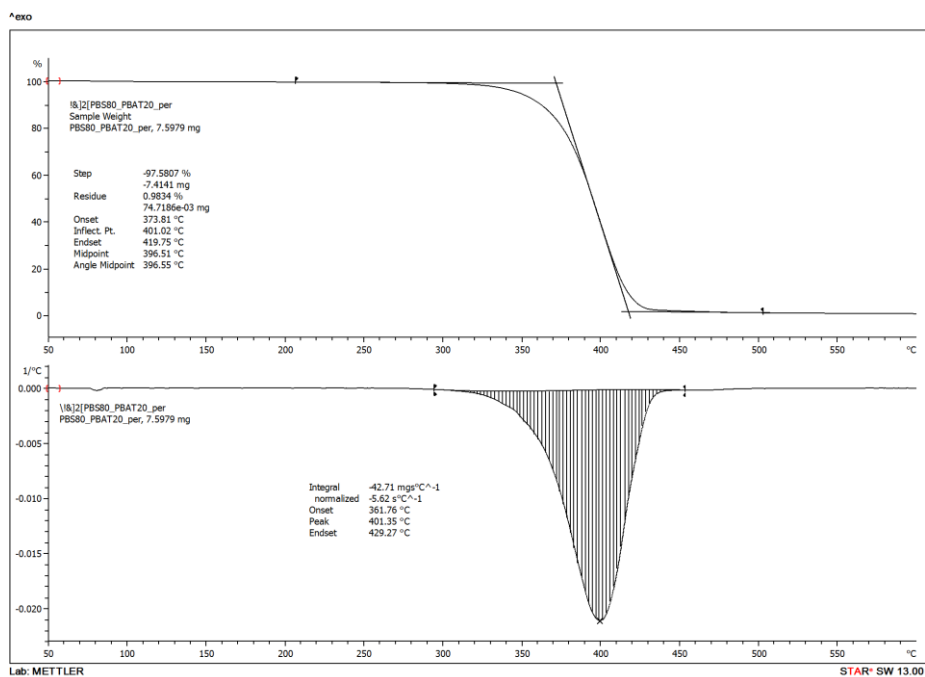


ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

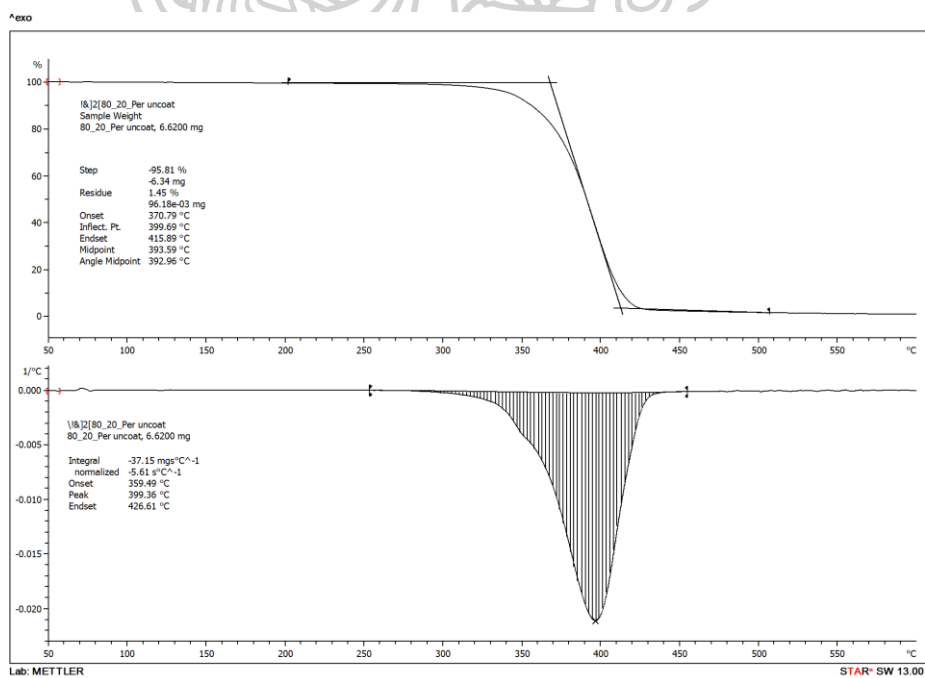


ภาพผนวก ก.30 DSC thermogram ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 1 ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

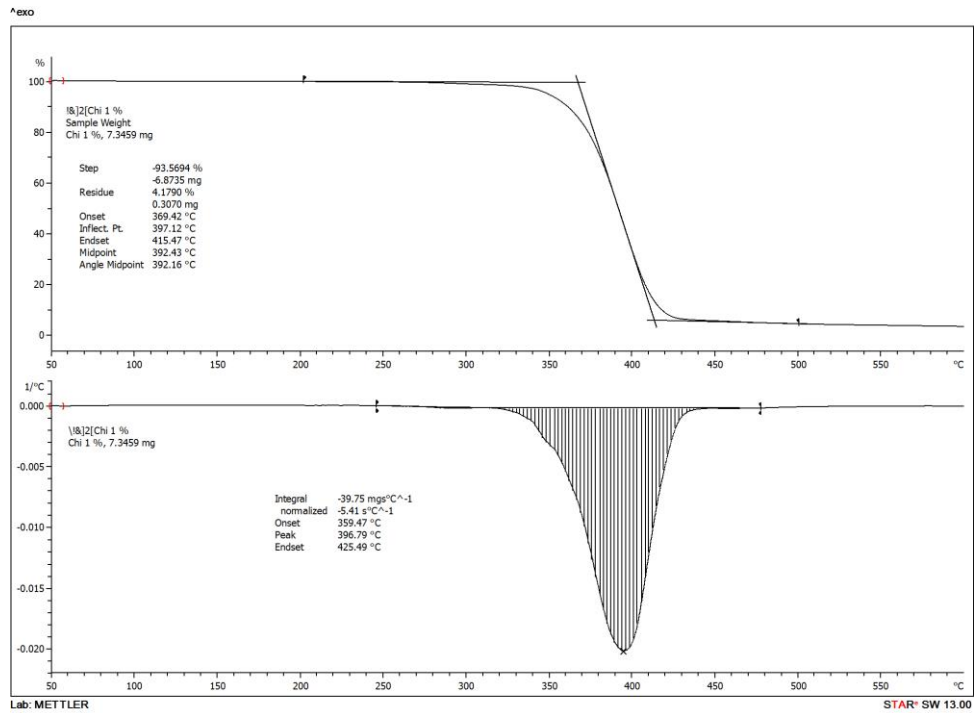
ผลการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA



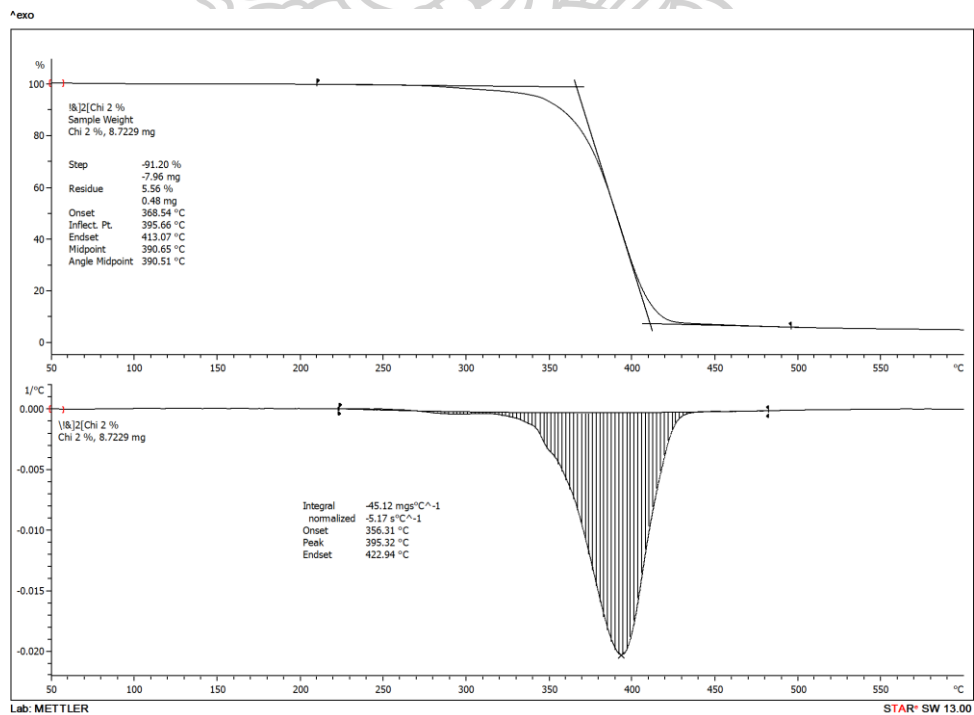
ภาพผนวก ก.31 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มสูตร untreated



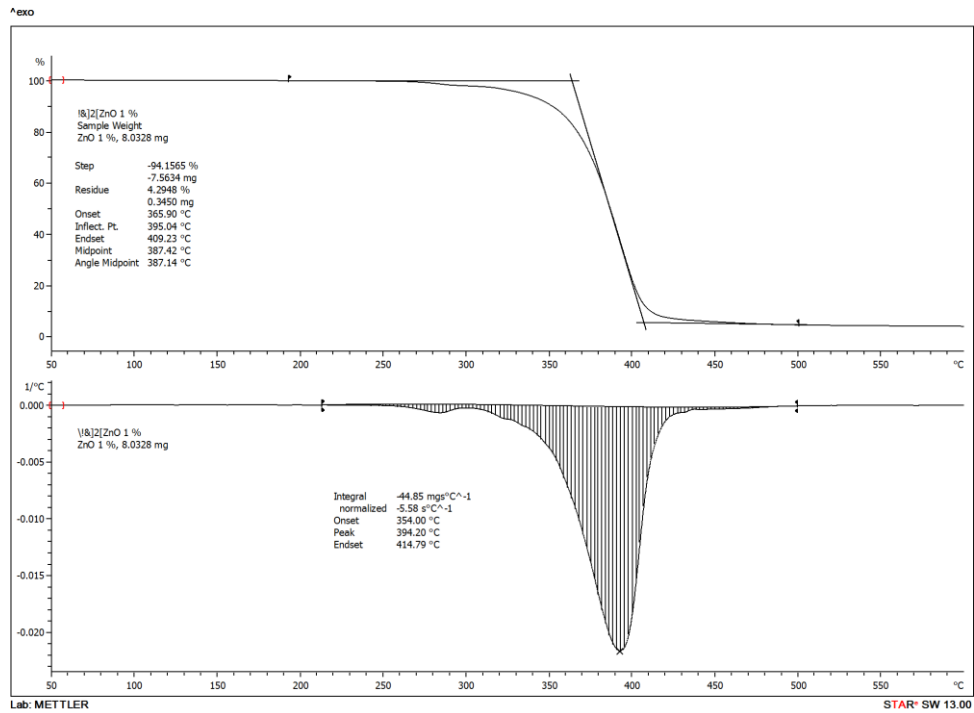
ภาพผนวก ก.32 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มสูตร treated 3 A



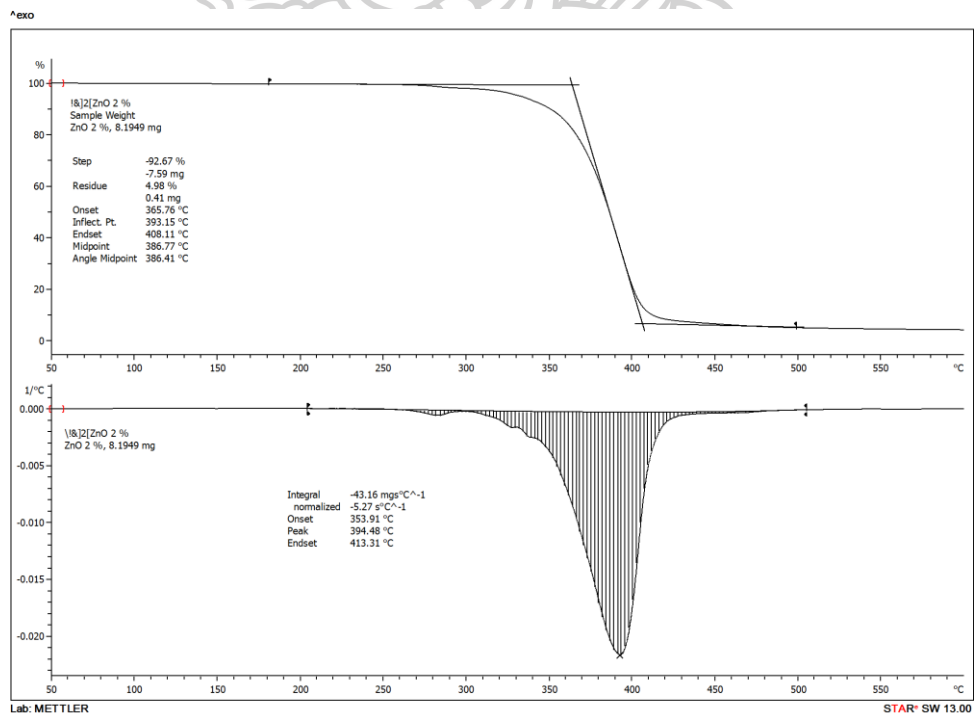
ภาพผนวก ก.33 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มที่เคลือบด้วย Chitosan 1 %w/v



ภาพผนวก ก.34 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มที่เคลือบด้วย Chitosan 2 %w/v



ภาพผนวก ก.35 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มที่เคลือบด้วย ZnO 1 %w/v



ภาพผนวก ก.36 เสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มที่เคลือบด้วย ZnO 2 %w/v

ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

ตารางผนวก ก.6 แสดงข้อมูลดิบของอัตราการซึมผ่านของไอน้ำเฉลี่ยที่ผ่านการ normalised และค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับปรุงสภาพผิวด้วยโคโรนา และฟิล์มที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

Sample	WVTR _{raw} (g/m ² day)	Thickness (μm)	WVTR _{normalised} (g.mil/m ² day)	WVTR _{avg} (g.mil/m ² day)	S.D.
Untreated	65.77	116.6	306.74	287.48	15.32
	67.05	106.8	286.44		
	65.23	103.2	269.27		
Treated 3 A	71.53	116.2	332.49	326.38	4.76
	71.75	111.8	320.86		
	68.33	119.2	325.80		
Chitosan 1 %	47.27	117.6	222.37	232.74	9.947
	54.46	113	246.148		
	52.20	110	229.69		
Chitosan 2 %	50.56	116	234.59	234.41	3.12
	49.42	116.6	230.51		
	55.02	108.2	238.14		
ZnO 1 %	72.46	121.8	353.017	340.65	8.86
	75.59	111.2	336.22		
	70.02	118.8	332.72		
ZnO 2 %	69.02	123.4	340.69	342.83	2.85
	71.4289	121.4	346.8587384		
	77.0667	110.6	340.9430808		

ผลการทดสอบอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

ตารางผนวก ก.7 แสดงข้อมูลดิบของอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติม Perkadox

Sample	GTR _{raw} (cm ³ /m ² dbar)	Thickness (μm)	OP (cm ³ mm/ m ² dbar)	OP _{avg} (cm ³ mi/ m ² dbar)	S.D.
Untreated	308	111	1367.52	1322.16	91.54
	270	110.6	1194.48		
	308	114	1404.48		
Treated 3 A	273	123	1343.16	1273.04	69.05
	303	107	1296.84		
	289	102	1179.12		
Chitosan 1 %	101	114	460.56	437.05	17.66
	103	105	432.60		
	110	95	418.00		
Chitosan 2 %	47.5	113	214.70	208.83	46.16
	57	115	262.20		
	34	110	149.60		
ZnO 1 %	49.9	106	211.58	195.20	47.33
	56.3	108	243.22		
	30	109	130.80		
ZnO 2 %	4.9	110	21.56	33.64	9.56
	8.04	107	34.41		
	10.5	107	44.94		

ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

ตารางผนวก ก.8 แสดงข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ ต่อเชื้อแบคทีเรียชนิด *E.Coli*

สูตร	ซ้ำที่ 1				ซ้ำที่ 2			
	จำนวน โคโลนี เฉลี่ย	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวน โคโลนี เฉลี่ย	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml
Untreated	9.43	10^{-7}	0.07	1.35×10^9	8.63	10^{-7}	0.08	1.08×10^9
Treated 3 A	37.33	10^{-6}	0.03	1.24×10^9	33	10^{-6}	0.03	1.10×10^9
Chi 1 %	19.8	10^{-5}	0.05	3.96×10^7	24.25	10^{-5}	0.04	6.06×10^7
Chi 2 %	18.5	10^{-5}	0.06	3.08×10^7	19	10^{-5}	0.06	3.17×10^7
ZnO 1 5	11.25	10^{-6}	0.04	2.81×10^8	6.875	10^{-6}	0.08	8.59×10^7
ZnO 2 %	10	10^{-5}	0.06	1.67×10^7	6.1	10^{-5}	0.1	6.10×10^6

(ต่อ)

สูตร	เฉลี่ย		
	CFU/ml	S.D.	การลดลงของ แบคทีเรีย (%)
Untreated	1.21×10^9	1.34×10^8	0.00
Treated 3 A	1.17×10^9	7.22×10^7	3.36
Chi 1 %	5.01×10^7	1.05×10^7	95.87
Chi 2 %	3.13×10^7	4.17×10^5	97.42
ZnO 1 5	1.84×10^8	9.77×10^7	84.86
ZnO 2 %	1.14×10^7	5.28×10^6	99.06

ตารางผนวก ก.9 แสดงข้อมูลดิบที่ได้จากการทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรต่าง ๆ ต่อเชื้อแบคทีเรียชนิด *S.aureus*

สูตร	ซ้ำที่ 1				ซ้ำที่ 2			
	จำนวน โคโลนี เฉลี่ย	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml	จำนวน โคโลนี เฉลี่ย	ความ เข้มข้น	ml	CFU/ml
Untreated	1	10^{-7}	0.05	2×10^8	1.2	10^{-7}	0.05	2.4×10^8
Treated 3 A	7	10^{-6}	0.04	1.75×10^8	10.5	10^{-6}	0.04	2.63×10^8
Chi 1 %	11	10^{-5}	0.03	3.67×10^7	2.8	10^{-6}	0.05	5.6×10^7
Chi 2 %	4.1	10^{-5}	0.1	4.1×10^6	2.44	10^{-5}	0.09	2.71×10^6
ZnO 1 5	9	10^{-5}	0.05	1.8×10^7	8.6	10^{-5}	0.05	1.72×10^7
ZnO 2 %	11.5	10^{-4}	0.04	2.88×10^6	15	10^{-4}	0.04	3.75×10^6

(ต่อ)

สูตร	เฉลี่ย		
	CFU/ml	S.D.	การลดลงของ แบคทีเรีย (%)
Untreated	2.2×10^8	2×10^7	0.00
Treated 3 A	2.19×10^8	4.38×10^7	0.57
Chi 1 %	4.63×10^7	9.67×10^6	78.94
Chi 2 %	3.41×10^6	6.94×10^5	98.45
ZnO 1 5	1.76×10^7	4×10^5	92.00
ZnO 2 %	3.3×10^6	4.38×10^5	98.49



ข-1 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลึก (%X_c) จากเทคนิค DSC

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

โดยที่ ΔH_m คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวตัวอย่าง (J/g), w คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของ PBS, ΔH_m^0 คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวผลึกตัวอย่าง PBS 100 เปอร์เซ็นต์ (110.3 J/g)

ตัวอย่างการคำนวณ

หาเปอร์เซ็นต์ผลึกของ PBS ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PBS/PBAT ที่สัดส่วน 80/20/Perkadox จากขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง



ภาพผนวก ข.1 ภาพประกอบการคำนวณเปอร์เซ็นต์ผลึกของ PBS ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสม

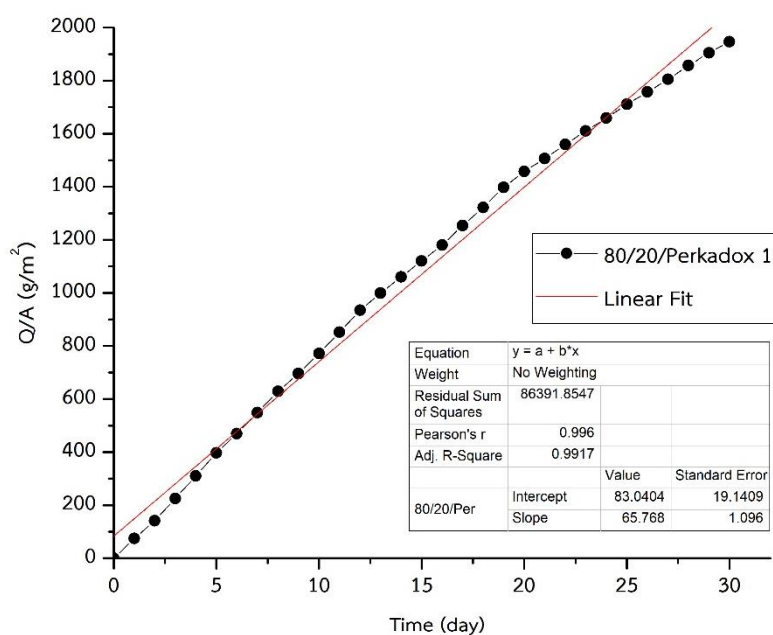
$\Delta H_m = 59.13$ J/g, $\Delta H_m^0 = 110.3$ J/g และ $w = 0.8$

$$X_c(\%) = \frac{59.13}{0.8 \times 110.3} \times 100 = 67.01 \%$$

ข-2 การคำนวณอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ

การคำนวณหาค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ทำได้โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปต่อพื้นที่แลกเปลี่ยนของไอน้ำ (Q/A) กับเวลา (t) ความชันที่ได้จากกราฟ คือ ค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ดังสมการ

$$WVTR_{\text{raw}} \text{ (g/m}^2 \cdot \text{day)} = \frac{Q}{At} = \frac{W_i - W_0}{At_i}$$



ภาพผนวก ข.2 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปต่อพื้นที่แลกเปลี่ยนไอน้ำ (Q/A) กับเวลา (t)

จากภาพความชัน = 65.768 ($WVTR_{\text{raw}}$) และฟิล์มมีความหนา = 116.6 μm ซึ่งจะถูกระบุ normalized เพื่อลดปัจจัยของค่า WVTR ที่เป็นผลมาจากความหนาของฟิล์มที่แตกต่างกัน สามารถคำนวณได้จากสมการนี้

$$WVTR_{\text{normalised}} \text{ (g} \cdot \text{mil/m}^2 \cdot \text{day)} = WVTR_{\text{raw}} \times l \times \frac{1 \text{ mil}}{25 \mu\text{m}}$$

$$WVTR_{\text{normalised}} = 65.768 \times 116.6 \times \frac{1}{25} = 306.74 \text{ g} \cdot \text{mil/m}^2 \cdot \text{day}$$

ข-3 การคำนวณปริมาณเชื้อแบคทีเรียในหน่วย CFU/ml

$$\text{ปริมาณเชื้อแบคทีเรีย (CFU/ml)} = \frac{\text{จำนวนโคโลนีที่นับได้} \times \text{dilution factor}}{\text{ปริมาตรของเชื้อที่นำมาเลี้ยงบนอาหาร (ml)}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบผิวด้วยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ 2 %w/v ต่อแบคทีเรียชนิด *E.coli* (ซ้ำที่ 1) จากการทดลองจะพบจำนวนโคโลนีเฉลี่ยเท่ากับ 10 ปริมาตรของเชื้อแบคทีเรีย 0.06 ml ที่ความเข้มข้น 10^{-5}

$$\text{ปริมาณเชื้อแบคทีเรีย} = \frac{10 \times 10^{-5}}{0.06} = 1.67 \times 10^7$$

ข-4 การคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดลงของเชื้อแบคทีเรีย (%Reduction)

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

โดยที่ A คือ CFU/ml ของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย

B คือ CFU/ml ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารต้านทานแบคทีเรีย

ตัวอย่างการคำนวณ

ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เคลือบผิว (A = 1.21×10^9 CFU/ml)

ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่เคลือบผิวด้วยอนุภาคซิงค์ออกไซด์ 2 %w/v (B = 1.14×10^7 CFU/ml)

$$\% \text{ Reduction} = \frac{(1.21 \times 10^9) - (1.14 \times 10^7)}{1.21 \times 10^9} \times 100 = 99.06 \%$$



ค-1 การประชุมวิชาการ Pure and Applied Chemistry International Conference 2017
(PACCON 2017)

-บันทึกถายงานการประชุม (proceeding)

GREEN CONVERGENCE ON CHEMICAL FRONTIERS



February 2-3, 2017

Centra Government Complex
Hotel & Convention Centre
Chaeng Watthana, Bangkok,
Thailand



Conference Proceedings



Modification of bio-polybutylene succinate flexible films by poly(butylene adipate-co-terephthalate)

Nattakarn Yangcheepyuenuoodee and Nattakarn Hongsrphan*

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

*e-mail: Hongsrphan_N@su.ac.th

Abstract: Polybutylene succinate or Bio-PBS is one of biopolymers that nowadays produces in Thailand from sugar based succinic acid, which is subjected to accommodate the government plan to turn Thailand into bio-hub. In this study, poly(butylene adipate-co-terephthalate) or PBAT was used to enhance flexibility of Bio-PBS films by simple melt blending with PBAT of 3, 5, and 7 wt% in a commercial cast-film extruder. Small content of PBAT is expected to increase elongation at break of films while PBS integrity is reserved. Moreover, dicumyl peroxide (DCP) of 0.001 phr was incorporated to study reactive blending under the same processing condition. DCP was dissolved in acetone, then hand-mixed with PBAT and PBS pellets. Tensile strength and elongation at break were evaluated in accordance with ASTM-D882. Tear propagation resistance was determined in accordance with ASTM-D1938. Compatibility and morphology of simple blending and reactive blending were investigated by DSC and SEM. It was found that both simple and reactive cast-film extrusion between PBS and PBAT could produce flexible films with uniform thickness. Film specimens showed higher elongation at break with respect to PBAT content but did not effect on tensile strength. Adding DCP reduced film strength while elongation at break slightly increased. Adding PBAT decreased tear propagation strength to PBS. From DSC analysis, it was found that chain scission of PBS from DCP reaction changed thermal properties and improved compatibility between PBS and PBAT.

1. Introduction

Nowadays, plastic film has a significant impact on everyday life among people around the world. The use of plastic products is related to the raised number of population as it can provide convenience to every step of our life; however, plastic film has a short life cycle, and it becomes plastic waste after consuming. Almost all plastic film are produced from non-biodegradable polymers, long time degradation, such as polyethylene (PE), polypropylene (PP), polystyrene (PS), and poly(ethylene terephthalate) (PET) which has serious effects on environment. One of the alternative ways to solve the problems is that commodity synthetic polymers (non-

biodegradable polymers) should be replaced by biodegradable polymers.¹

Poly(butylene succinate) (PBS) is one of well-known biodegradable polymers assigned to aliphatic polyester category. It is widely used to produce plastic film in various forms as it has many desirable properties including good mechanical property, biodegradability, melt processing as well as thermal and chemical resistance.² Recently, PBS has been produced in Thailand from sugar based succinic acid. It can be also derived from renewable resources via fermentation, which is subjected to accommodate the government plan to turn Thailand into bio-hub; thus, it gives access to fully Bio-PBS. In this study, flexibility enhancement of PBS by blending



with flexible polymer, poly(butylene adipate-co-terephthalate) or PBAT is carried out. PBAT is another petroleum-based biodegradable polymer which is aliphatic-aromatic copolyester that can be fully biodegradable and has high elongation at break.

From the study of Deyun Ji et al.,³ it was stated that most of blending product showed poor mechanical performance because of the low miscibility between component of the blends. Reactive blending is considered to be an effective method for improving the miscibility of the blends. There are research reports showing that dicumyl peroxide (DCP) has been introduced into PLA/PBAT, PLA/PCL, and PLA/PBS blends as an initiator to form crosslinked and/or branched structure.³ In our study, DCP is selected to improve the compatibility of the PBS/PBAT blends; therefore, enhance mechanical properties of the reactive blends.

In this study, PBAT was used to enhance flexibility of Bio-PBS films in a commercial cast film extruder by simple blending and adding DCP as compatibilizer to study reactive blending. In addition, the mechanical properties, thermal properties and phase morphology were investigated.

2. Materials and Methods

2.1 Materials

Poly(butylene succinate) (PBS), grade FZ91PM, with the trade name of Bio-PBS were kindly supplied from PTT MCC Biochem Co., Ltd. (Thailand). Poly(butylene adipate-co-terephthalate)(PBAT), grade F Mulch C1201, with the trade name of Ecoflex[®] was purchased from Polymats Co., Ltd. (Thailand). Dicumyl peroxide (DCP) 95% purity was purchased from Sigma-Aldrich Corporation. Pellets and chemicals were used as received.

2.2 Film preparation

Eight compositions of PBS/PBAT blend films with and without DCP as compatibilizer were formulated. PBS was the major component. Table 1 summarized the compositions.

2.2.1 Simple blending

Prior to compounding, PBS and PBAT pellets were dried in an oven at 60°C for 6 hours. Amounts of PBS and PBAT were manually mixed in pellets from in a zip bag, then mixtures were melt compounded in a commercial cast film extruder (Lab Tech Engineering Co., Thailand). The barrel and die temperature were set at 150-190°C, screw speed of 40 rpm. The final thickness of the film was kept about 100-150 µm.

2.2.2 Reactive blending

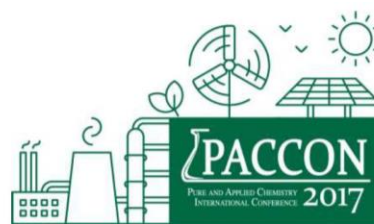
Before melt compounding, DCP was put in desiccator with silica gel to remove the moisture. DCP of 0.001 phr was dissolve in acetone, then hand-mixed with PBAT pellets for good distribution. Then, DCP/PBAT and PBS pellets were compounded under the same processing condition with simple blending.

Table 1. Summary of the compositions of PBS/PBAT blend films with and without DCP as compatibilizer.

Sample	PBS (wt%)	PBAT (wt%)	DCP (phr)
PBS	100	-	-
PBS/PBAT3	97	3	-
PBS/PBAT5	95	5	-
PBS/PBAT7	93	7	-
PBS/DCP	100	-	0.001
PBS/PBAT3/DCP	97	3	0.001
PBS/PBAT5/DCP	95	5	0.001
PBS/PBAT7/DCP	93	7	0.001

2.3 Mechanical properties

Tensile and tear propagation resistance tests were carried out using a universal testing machine (Instron, Model 5969, Instron



Engineering Corporation, USA) with a load cell 5 kN at room temperature.

Tensile tests were carried out in accordance with ATSM-D882 (Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting) using a crosshead speed of 12.5 mm/min. Film samples were cut into 1 in × 6 in strips for tensile specimens. Before tests, each specimen was measured its thickness for stress calculation. Average values of tensile strength and elongation at break were evaluated, which at least ten specimens of each sample were tested.

Tear strength was determined in accordance with ASTM-1938 (Tear-propagation resistance of plastic film and thin sheeting by a single-tear method) using a grip-separation speed of 250 mm/min. Film samples were cut into a rectangular strip of 1 in × 3 in with an initial crack length of 2 in. Before tests, each specimen was measured its thickness for stress calculation. At least ten specimens of each sample were tested.

2.4 Differential scanning calorimetry (DSC)

DSC was tests by using Perkin-Elmer DSC under Nitrogen atmosphere. Firstly, approximately 3-5 mg samples were heated from 50°C to 180°C at a heating rate of 5 °C/min. The first heating scan was used to eliminate their previous thermal history of the sample. Then, the sample was cooled at 5°C/min to 50°C and second heating to 180°C at 5°C/min

Peak temperatures and peak areas were determined by using Pyris manager software. The percentage of crystallinity (X_c) for each material was calculated according to following equation:⁴

$$X_c(\%) = (\Delta H_m / w\Delta H_m^0) \times 100$$

where ΔH_m (J/g) is the heat of fusion of the sample, w is the PBS weight fraction in the sample and ΔH_m^0 is the theoretical heat of

fusion of 100% crystallinity PBS (110.3 J/g).⁵

2.5 Scanning electron microscopy (SEM)

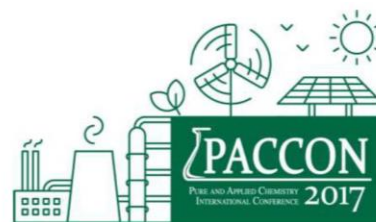
SEM (Tabletop Microscope TM3030, Hitachi, Japan) was used to characterize phase morphology of PBS/PBAT blend films with and without DCP. All composition was subjects to a cryo-fracture process with liquid nitrogen. The fracture surface was coated by sputtering process with platinum-gold at accelerating voltage of 15 kV, and it was used to produce the SEM micrographs.

3. Results & Discussion

3.1 Mechanical Properties

It was well known that films intended for flexible packaging or film application required sufficient flexibility to avoid breaking during the packaging procedure.⁴ Mechanical properties in term of tensile strength and elongation at break of PBS/PBAT blends film with and without DCP are presented in Figure 1(a) and 1(b), respectively. In this study, tensile strength of PBS/PBAT simple blend films showed no significant difference compared to neat PBS films. When adding DCP of 0.001 phr into PBS/PBAT for reactive blending, tensile strength was reduced about 20-40% in comparison with PBS/PBAT simple blend films. It should be note that neat PBS adding DCP also showed reduction of tensile strength in the same level of PBS/PBAT blend.

As expected, blending PBAT provided enhanced flexibility leading films to have higher elongation at break with respect to PBAT content. Reactive blending with DCP increased elongation at break of PBS/PBAT blend films, however, the increasing of extension was not a function of PBAT content. Also, adding DCP into PBS increased elongation at break to be higher than PBS films without DCP.



From the findings, it indicates that DCP creates two competing reactions in reactive blending during processing; chain scission and crosslinking/branching. DCP initiates chain scission of PBS molecules resulting in significant decrease of tensile strength in the PBS matrix. Free radicals in PBS molecules could be terminated by crosslinking with neighboring PBS or PBAT molecules resulting branching PBS molecules that restricts chain slippage from chain entanglement. As a result, higher elongation at break was achieved in PBS and PBS/PBAT blend films compared to simple blend films. Since PBAT content did not influence increasing of extension in reactive blending, it implied that PBS was more active in free radical reaction than PBAT using DCP as initiator.

In many applications, tear resistance is important to withstand failure from subject force that aims to break it apart against its thickness. Thus, tear resistance test measures the energy to propagate a crack in plastics films. Since PBS and PBS/PBAT film samples were highly extendable, the tear strength was defined at the maximum stress to break the film samples. The tear propagation strengths of PBS/PBAT blend films with and without DCP are presented in Figure 1(c).

It is seen that blending PBAT into PBS decreased tear strength with respect to PBAT content. This could be attributed that PBS and PBAT were immiscible which correlated with SEM micrographs revealing phase separation. Adding DCP dramatically reduced tear strength of neat PBS. This would result stress concentration from crosslinking area in the PBS matrix. For PBS/PBAT reactive blend films, tear strength were decreased compared to simple blending, however, tear strength depended on PBAT content in a complex fashion. Although miscibility between

phases was improved and increased ability to be extended during tear propagation, chain scission of PBS molecules caused PBS/PBAT blend to have lower tensile strength that could prohibit tearing to propagate.

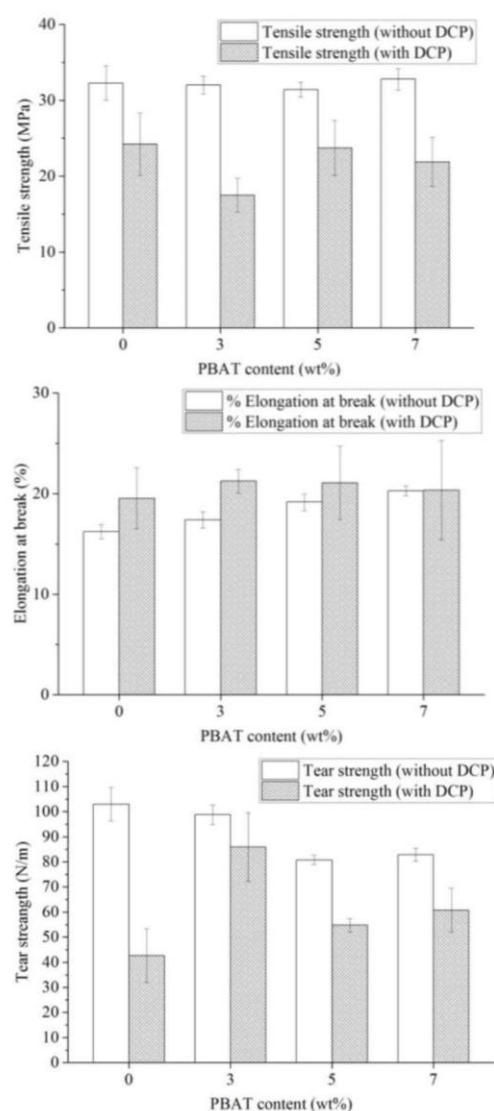
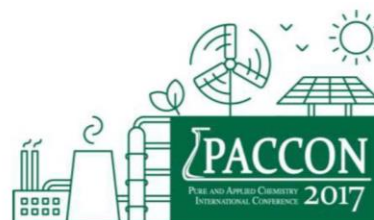


Figure 1. Mechanical properties of PBS/PBAT blend films with and without DCP in term of PBAT content (a) Tensile strength (b) Elongation at break (c) Tear strength.



3.2 Differential scanning calorimetry (DSC)

Table 2 presents thermal properties of PBS and PBS/PBAT blend films with and without DCP of 0.001 phr investigated by DSC. It is seen that the crystallization temperature (T_c) of PBS and PBS/PBAT blend films showed no significant difference while PBS/DCP and PBS/PBAT/DCP blend films showed the T_c shifted slightly to lower temperature as the content of PBAT increases from 98.9 to 97.5°C when PBAT 7 wt% was added. In addition, PBS/PBAT/DCP blend films leads to increasing the T_c in comparison with PBS/PBAT blend films. From the result, it can be explained that DCP reaction caused the chain scission of PBS resulting in shorter molecules. The reactive blends becomes easier to crystallize than the simple one.⁶

Double melting endotherms were detected at lower temperature (T_{m1}) about 109-111°C, which resulted in less perfect crystal melt and higher temperature (T_{m2}) about 117°C, which caused more structurally perfect melt for PBS/PBAT simple blends and reactive blends. Similarly, E. S. YOO et al.⁵ reported the double melting behavior during heating scan by DSC. It was identified that T_{m1} is attributed to the melt of original crystallites and T_{m2} is due to the melt of recrystallized ones. The melting temperature (T_m) of simple blends and reactive blends close to PBS, so it could be indicated that structure was not destroyed during the processing.

The degree of crystallinity (X_c) of PBS/PBAT simple blends and reactive blends was decreased with the continuing increase of PBAT content due to higher PBAT content that inhibited crystalline growth of PBS. On the other hand, adding DCP did not affect to X_c .

Table 2. Thermal properties of PBS and PBS/PBAT blend films with and without DCP.

Sample	T_c (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	X_c (%)
PBS	96.3	109.8	117.0	55.1
PBS/PBAT3	96.2	109.8	117.1	55.0
PBS/PBAT5	96.3	109.9	117.1	54.3
PBS/PBAT7	96.6	109.9	117.1	51.5
PBS/DCP	98.9	111.4	116.7	54.9
PBS/PBAT3/DCP	97.8	110.5	116.7	54.5
PBS/PBAT5/DCP	97.9	110.7	116.7	54.3
PBS/PBAT7/DCP	97.5	110.5	116.7	51.5

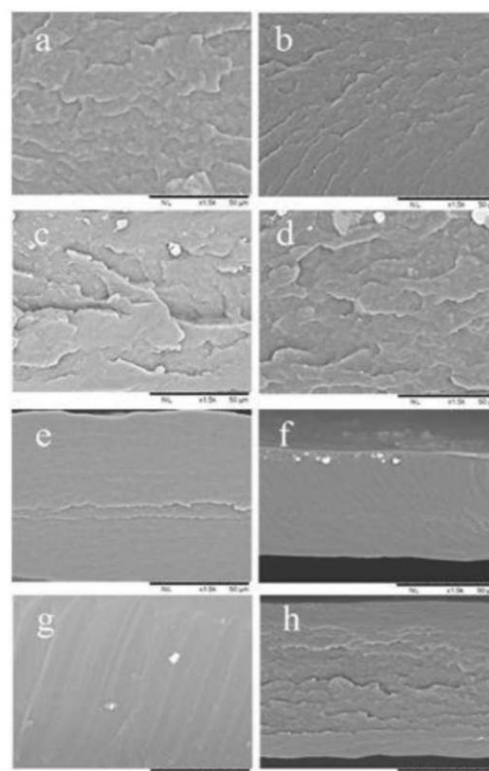


Figure 3. Scanning electron microscopy micrographs of cryo-fracture surface of PBS and PBS/PBAT blend films with and without DCP (under 1500x magnification) (a) PBS (b) PBS/PBAT3 (c) PBS/PBAT5 (d) PBS/PBAT7 (e) PBS/DCP (f) PBS/PBAT3/DCP (g) PBS/PBAT5/DCP (h) PBS/PBAT7/DCP



3.3 Scanning electron microscopy (SEM)

Phase morphology of PBS and PBS/PBAT with and without DCP of 0.001 phr was investigated by SEM. SEM micrographs are shown in Figure 3. It was found that PBS sample showed rough fracture surface indicating ductile failure during cryo-fracture. Incorporation PBAT of 3-7 wt% (Figure 3(b)-3(d)) revealed rougher surface indicating phase separation between PBS matrix and PBAT dispersed phase. On the other hand, PBS/PBAT blend films with DCP (Figure 3(e)-3(g)) showed smoother fracture surface than without DCP. This indicated that compatibility of PBS and PBAT was improved when small content of PBAT of 3-5 wt% was added.

4. Conclusion

In this study, the modification of Bio-PBS flexible films by PBAT with and without DCP as compatibilizer in a commercial cast-film extruder was performed. PBAT in small content enhanced flexibility of PBS leading to higher elongation at break with respect to PBAT content, but it did not effect on tensile strength. Adding DCP reduced film strength due to the predominance of chain scission over crosslinking, while elongation at break slightly increased by crosslinking reaction. Unfortunately, adding PBAT decreased tear propagation strength to PBS. Reactive blends further reduced tear strength because of chain scission, which could be related to the increase of crystallization temperature of reactive blends. The compatibility of PBS and PBAT was improved which was evident by smoother fracture surface in SEM micrograph.

Acknowledgement

This work was supported by Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology,

Silpakorn University. PTT MCC Biochem Co., Ltd. (Thailand) was appreciated for kindly supply Bio-PBS used in this work.

References

1. Bhatia, A.; Gupta, R. K.; Bhattacharya, S. N.; Choi, H. J. Compatibility of biodegradable poly (lactic acid) (PLA) and poly (butylene succinate) (PBS) blends for packaging application. *Korea-Australia Rheology Journal* **2007**, *19* (3), 125-131.
2. Jamaluddin, N.; Razaina, M. T.; Ishak, Z. A. M. Mechanical and Morphology Behaviours of Polybutylene (succinate)/Thermoplastic Polyurethane blend. *Procedia Chemistry* **2016**, *19*, 426-432.
3. Ji, D.; Liu, Z.; Lan, X.; Wu, F.; Xie, B.; Yang, M. Morphology, rheology, crystallization behavior, and mechanical properties of poly(lactic acid)/poly(butylene succinate)/dicumyl peroxide reactive blends. *Journal of Applied Polymer Science* **2014**, *131* (3)
4. Wu, Y.; Qin, Y.; Yuan, M.; Li, L.; Chen, H.; Cao, J.; Yang, J. Characterization of an antimicrobial poly(lactic acid) film prepared with poly(ϵ -caprolactone) and thymol for active packaging. *Polymers for Advanced Technologies* **2014**, *25* (9), 948-954.
5. Yoo, E. S.; Im, S. S. Melting behavior of poly(butylene succinate) during heating scan by DSC. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics* **1999**, *37* (13), 1357-1366.
6. Jin, T.-x.; Zhou, M.; Hu, S.-d.; Chen, F.; Fu, Q.; Fu, Y. Effect of molecular weight on the properties of poly(butylene succinate). *Chinese Journal of Polymer Science* **2014**, *32* (7), 953-960.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวณัฐกานต์ ยังชีพยืนอยู่ดี
วัน เดือน ปี เกิด	3 ธันวาคม 2535
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ.2557 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ.2558 ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	เลขที่ 66/65 หมู่ 5 ซอย 10 ถนนบ้านกล้วย-ไทรน้อย ตำบลพิมลราช อำเภอบางบัวทอง จังหวัดนนทบุรี รหัสไปรษณีย์ 11110
ผลงานตีพิมพ์	Nattakarn Yangcheepyuenyoodee and Nattakarn Hongsrphan. "Modification of bio-polybutylene succinate flexible films by poly(butylene adipate-co-terephthalate)". Proceedings in the Pure And Applied Chemistry International Conference 2017 (PACCON 2017), Centra Government Complex Hotel & Convention Centre Cheng Watthana, Bangkok, Thailand, February 2-3, 2017.
รางวัลที่ได้รับ	พ.ศ.2558 - 2560 ได้รับทุนนักศึกษาผู้ช่วยสอน จากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร