



การพัฒนาฝาปิดบรรจุภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปจากพลาสติกชีวภาพ



โดย  
นายพิทักษ์พงศ์ คำฤทธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาฝาปิดบรรจุภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปจากพลาสติกชีวภาพ



โดย  
นายพิทักษ์พงศ์ คำฤทธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

DEVELOPMENT OF BIODEGRADABLE PLASTICS TOP SEAL PACKAGING FOR  
INSTANT FOODS



By  
MR. Pitakpong KAMRIT

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 2022

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	การพัฒนาฟาบิปปรรจุภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปจากพลาสติกชีวภาพ
โดย	นายพิทักษ์พงศ์ คำฤทธิ์
สาขาวิชา	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. มนัส แซ่ด่าน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

	คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย (ผู้รักษาการแทน)
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาธิต นิรัติศัย)	
พิจารณาเห็นชอบโดย	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)	
	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์)	
	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. มนัส แซ่ด่าน)	
	ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศรินทร์ เข้มปะบุตร)	
	ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. กัลยาณี สิริสิงห)	

620920009 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : พอลิโพรพิลีนซัคซิเนต, พอลิโพรพิลีนซัคซิเนต-โค-อะดิเพท, พอลิโพรพิลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลท, พอลิ(ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-ไฮดรอกซีวาลูเรต), ฟิล์มรีแอคทีฟเบลนด์, สมบัติการซึมผ่านของก๊าซ, ฟิล์มฝาปิดลอกออกได้

นาย พิทักษ์พงศ์ คำฤทธิ์: การพัฒนาฝาปิดบรรจุภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปจากพลาสติกชีวภาพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์

พอลิโพรพิลีนซัคซิเนต (PBS) และพอลิโพรพิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท (PBSA) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพ ที่มีสมบัติเชิงกลคล้ายคลึงกับพอลิเมอร์กลุ่มพอลิโอเลฟิน ซึ่งโดยทั่วไปฟิล์มปิดบรรจุภัณฑ์อาหารสำเร็จรูป (top seal) ส่วนใหญ่ทำจาก low density polyethylene (LDPE) ที่ไม่สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์ฟิล์มโดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักในสัดส่วนร้อยละ 80 เบลนด์กับเฟสของพอลิโพรพิลีนอะดิเพท-โค-เทรฟทาเลท (PBAT) ซึ่งมี melt strength ที่ดีเพื่อให้การขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น และการเบลนด์กับเฟสของพอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาลูเรต) (PHBV) เพื่อให้ได้อัตราการซึมผ่านของออกซิเจน (OTR) และไอน้ำ (WVTR) ที่ดี โดยทำการเบลนด์กับพอลิเมอร์เฟสของ PBAT หรือ PHBV ในสัดส่วนร้อยละ 20 ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend และทำการศึกษสมบัติการซึมผ่านของออกซิเจน และไอน้ำ สมบัติเชิงกล และความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อน (peel strength test) ของฝาปิดกับภาชนะบรรจุภัณฑ์ โดยพบว่าการเบลนด์ PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PBAT เป็นเฟสรองผ่านปฏิกิริยา condensation โดยเติม Joncryl<sup>®</sup> ADR 4468 (ECE) 0.1 phr. เพียงพอที่จะปรับปรุงความเข้ากันได้ แต่สมบัติการซึมผ่านของออกซิเจนและไอน้ำไม่ได้ถูกปรับปรุง สำหรับสมบัติเชิงกลหลังจากการเบลนด์พบว่า Young's modulus มีค่าลดลง และค่า Elongation at break เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลัก และ peel strength test หลังจากการเบลนด์พบว่าในช่วง easy-open peel ที่กว้างขึ้น สำหรับการเบลนด์ PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PHBV เป็นเฟสรองผ่านปฏิกิริยาทั้ง 3 ระบบคือ ปฏิกิริยา free radical (Perkadox<sup>®</sup> 145 หรือ DB 0.02 phr.), ปฏิกิริยา condensation (ECE 0.1 phr.) และปฏิกิริยารวมกันของ free radical และ condensation (DB 0.02 + ECE 0.1 phr.) พบว่าค่า OTR และ WVTR มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ PBS และ PBSA ที่เป็นพอลิเมอร์องค์ประกอบหลัก เป็นผลจากการปรับปรุง interfacial adhesion ระหว่างผิวสองเฟส และสมบัติเชิงกลหลังจากการเบลนด์กับ PHBV เปลี่ยนแปลงตามสมบัติเชิงกลของ PHBV โดยพบว่า Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้นและค่า Elongation at break ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ PBS และ PBSA ที่เป็นพอลิเมอร์องค์ประกอบหลัก สำหรับ peel strength test ช่วง easy-open peel เลื่อนไปในพื้นที่อุณหภูมิในการปิดผนึกสูงขึ้น และทั้ง PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PHBV มีพฤติกรรมการลอกออกในช่วง easy-open peel เป็นแบบ adhesive peel และ cohesive peel ซึ่งสามารถลอกออกได้ง่าย และเมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของ peroxide จาก DB เป็น Dicumyl peroxide (DCP) ในปริมาณที่เท่ากันพบว่าการซึมผ่านของออกซิเจนและไอน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ปริมาณการเติม peroxide ที่มากเกินไปจะเกิดการเชื่อมขวางในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลแย่ลง การปิดผนึกด้วยความร้อนให้ติดกับภาชนะได้ยากขึ้น ส่งผลให้ช่วง easy-open peel เลื่อนไปในทางที่อุณหภูมิการปิดผนึกสูงมากขึ้น และในการศึกษาในระดับกึ่งอุตสาหกรรม พบว่าการซึมผ่านของออกซิเจน และไอน้ำ สมบัติเชิงกล และ peel strength test ให้ผลเป็นแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดลองในระดับ lab scale และการลอกออกในช่วง easy-open peel หลังจากที่เบลนด์กับ PBAT หรือ PHBV มีพฤติกรรมการลอกออกเป็นแบบ adhesive peel และ cohesive peel ซึ่งสามารถลอกออกได้ง่าย สำหรับการเบลนด์ PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PBAT ที่เป็นเฟสรองในสัดส่วนร้อยละ 20 สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ และมีช่วง easy-open peel การลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อนกว้างขึ้น แต่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำ การเบลนด์กับ PHBV ที่เป็นเฟสรองในสัดส่วนร้อยละ 20 สามารถปรับปรุงสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำได้ แต่สมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงตามสมบัติเชิงกลของ PHBV

620920009 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : PBS PBSA PBAT PHBV Reactive blending film Barrier properties Peelable film

MR. PITAKPONG KAMRIT : DEVELOPMENT OF BIODEGRADABLE PLASTICS TOP SEAL PACKAGING FOR INSTANT FOODS THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR SUPAKIJ SUTTIRUENGWONG, Dr.-Ing.

Polybutylene succinate (PBS) and polybutylene succinate-co-adipate (PBSA) are biodegradable polymers with mechanical properties similar to polyolefin. In general, a top seal film used as instant food packaging film is made from non-biodegradable polyethylene (PE). Therefore, this research aims to study the polymer blend film derived from 80 %wt of PBS and PBSA as matrices with and without reactive agents by blending with poly(butylene adipate-co-terephthalate (PBAT), which has a good melt strength to make processing easier and blending with poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV), which has the good barrier properties. The dispersed PHBV and PBAT were fixed at 20 %wt. The oxygen transmission rate (OTR) and water vapor transmission rate (WVTR), mechanical properties and peel strength test of polymer blend films with and without reactive agents (peroxides or epoxide compounds) are investigated. The results show that PBS based and PBSA based blends with dispersed PBAT phase via condensation reaction by adding Joncryl<sup>®</sup> ADR 4468 (ECE) 0.1 phr is sufficient to improve the compatibility between phases but the OTR and WVTR values are not improved. The mechanical properties show that Young's modulus is reduced and the elongation at break is increased compared to neat PBS and PBSA. Peel strength test after blending is found to have a wider range within the easy-open peel. For blending with dispersed PHBV phase through three systems: the free radical reaction (Perkadox<sup>®</sup> 14S or DB 0.02 phr.), the condensation reaction (ECE 0.1 phr.) and the combined reaction of the free radical and condensation (DB 0.02 + ECE 0.1 phr.), it is found that the OTR and WVTR values are tended to decrease when compared to the PBS and PBSA film due to the improved interfacial adhesion at the surface of the two-phase polymer. The mechanical properties after blending with PHBV change with the amount of increased PHBV. Young's modulus increases and elongation at break decreases when compared to the PBS and PBSA films. Peel strength test after blending, the easy-open peel range shifts toward higher sealing temperatures. When the peroxide type is changed from DB to dicumyl peroxide or DCP, there is no significant change in OTR and WVTR values. However, the excess peroxide content results in more cross-links in the polymer chain, making the mechanical properties worse. It is more difficult to seal and the peel force value in the easy-open peel range shifts toward a higher sealing temperature. In semi-industrial studies, it was found that the OTR, WVTR, mechanical properties and peel strength test show the same trends as in the lab scale experiment. The peeling in the easy-open peel range after blending with PBAT or PHBV shows the peeling behavior as adhesive peel and cohesive peel, which can be easily peeled off. When blending PBS and PBSA with 20 %wt PBAT, the mechanical properties could be modified and the easy-open peel range was wider whereas the OTR and WVTR values remained almost unaffected. When blending with 20 %wt PHBV, the OTR and WVTR values could be manipulated while the mechanical properties depended on the blended polymers.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ ผู้เป็นที่ปรึกษางานวิจัย และรองศาสตราจารย์ ดร.มนัส แซ่ด่าน ผู้เป็นที่ปรึกษาร่วมงานวิจัย ในการจัดหาเครื่องมือ อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนการให้คำปรึกษา การแก้ปัญหา และวิเคราะห์ผลการทดลองในงานวิจัย รวมถึงตรวจสอบความเรียบร้อย เพื่อให้เล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศรินทร์ เขมะปะบุตร และรองศาสตราจารย์ ดร.กัลยาณี สิริสิงห์ ที่สละเวลามาเป็นประธาน กรรมการภายใน และกรรมการภายนอก ในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่อง เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ ขอขอบคุณคณาจารย์ และบุคลากรทุกท่านใน ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย ศิลปากร ที่อำนวยความสะดวกด้านการทำเอกสาร การให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องของทุนค่าเล่าเรียน เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์และสถานที่สำหรับทำงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ปริญญาโท สำหรับการช่วยเหลือ กำลังใจ มิตรภาพ รวมถึงคำปรึกษาต่าง ๆ เพื่อให้งานวิจัยดำเนินไปได้ด้วยดีรวมถึงคนในครอบครัวที่ให้การอบรมและเป็น กำลังใจในการแก้ปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

นาย พิทักษ์พงศ์ คำฤทธิ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย .....	2
1.4 ขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยสรุป.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene Succinate, PBS) [2, 3].....	5
2.2 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพต (Poly(butylene succinate-co-adipate), PBSA) [2].....	6
2.3 พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต (Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) [3, 4].....	6
2.4 พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาเลอเรต) (Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate), PHBV) [5, 6] .....	7
2.5 พอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blends) [3, 7-9] .....	7
2.6 สารช่วยประสาน (Compatibilizer).....	9



2.7 การถ่ายเทมวลสารในฟิล์มพอลิเมอร์ (Mass transfer in polymer films) [1, 10, 11].....	10
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	20
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	20
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน.....	22
3.3 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์.....	22
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	23
3.4.1 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding).....	23
3.4.2 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder).....	25
3.4.3 การทดสอบอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) และไอน้ำ (WVTR).....	26
3.4.4 การศึกษาลักษณะสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์.....	27
3.4.5 การศึกษาสมบัติเชิงกล.....	28
3.4.6 การทดสอบความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อน (peel strength test).....	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	30
4.1 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding).....	30
4.1.1 ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างการผลิต และดัชนีการไหลโดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend.....	31
4.1.2 ลักษณะสัญญาณวิทยาหลังจากการเบลนด์ของ PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend.....	35

4.1.3	ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของ PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend	38
4.1.3.1	อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen transmission rate ; OTR) ของ PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend.....	38
4.1.3.2	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate ; WVTR) ของ PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend.....	40
4.1.4	ศึกษาสมบัติเชิงกลของ PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend .	42
4.1.5	การศึกษาความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อนของ PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend .....	44
4.2	การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PHBV และเปลี่ยนชนิดของ peroxide จาก DB เป็น DCP ในปริมาณที่เท่ากัน.....	50
4.2.1	ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างการผสม PBS/PHBV blend และ PBSA/PHBV blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend .....	50
4.2.2	ลักษณะสัณฐานวิทยาหลังจากการเบลนด์ของ PBS/PHBV blend และ PBSA/PHBV blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend .....	53
4.2.3	ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของ PBS/PHBV blend และ PBSA/PHBV blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend.....	55
4.2.4	ศึกษาสมบัติเชิงกลของ PBS/PHBV blend และ PBSA/PHBV blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend .....	56
4.2.5	การศึกษาความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อนของ PBS/PHBV blend และ PBSA/PHBV blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend.....	58

4.3 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) และ ขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder).....	61
4.3.1 ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบ หลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในระบบ reactive blend ด้วยเครื่องอัดรีด สกรูคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder) .....	62
4.3.2 ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบ หลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในระบบ reactive blend ด้วยเครื่องอัดรีด สกรูคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder) .....	65
4.3.3 การศึกษาความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อนของพอลิ เมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในระบบ reactive blend ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder) .....	66
4.4 การศึกษาปริมาณ peroxide ที่เหมาะสมโดยกราฟแรงบิดไม่เกิดลักษณะการ crosslink คล้ายยวาระหว่างการผสมที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และความแข็งแรงของการลอกออกหลังจาก การปิดผนึกด้วยความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ .....	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	80
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก. ข้อมูล และตัวอย่างการคำนวณ.....	83
ภาคผนวก ข. การนำเสนอผลงานวิจัย .....	86
รายการอ้างอิง .....	96
ประวัติผู้เขียน .....	99

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางการเปรียบเทียบการซึมผ่าน Barrier Parameters .....	12
ตารางที่ 2.2 การจำแนกประเภทของการต้านการซึมผ่าน (Barrier classification) ตามค่า OTR และ WVTR [15] .....	13
ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงค่า Oxygen และ Water Vapor Permeability ของ PLA/PBSA และ PLA/PBSA/ESA [17] .....	16
ตารางที่ 3.1 สัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PBAT .....	23
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PHBV .....	24
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PBAT หรือ PHBV ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder).....	26
ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend.....	43
ตารางที่ 4.2 แสดงค่า Peel force และพฤติกรรมการลอกออกของฝากับผัดในช่วง easy-open peel ของ PBS/PBAT blend และ PBS/PHBV blend .....	48
ตารางที่ 4.3 แสดงค่า Peel force และพฤติกรรมการลอกออกของฝากับผัดในช่วง easy-open peel ของ PBSA/PBAT blend และ PBSA/PHBV blend .....	49
ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของ PBS/PHBV 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และที่เติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr, DCP 0.02 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr .....	57

ตารางที่ 4.5 แสดงค่า Peel force และพฤติกรรมการลอกออกของฝากับสภาพในช่วง easy-open peel ของ PBS/PHBV blend .....	60
ตารางที่ 4.6 แสดงค่า Peel force และพฤติกรรมการลอกออกของฝากับสภาพในช่วง easy-open peel ของ PBSA/PHBV blend.....	60
ตารางที่ 4.7 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในระบบ reactive blend ที่ผ่านการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder).....	65
ตารางที่ 4.8 แสดงค่า Peel force และพฤติกรรมการลอกออกของฝากับสภาพในช่วง easy-open peel ของ cast PBS/PBAT blend และ cast PBS/PHBV blend .....	69
ตารางที่ 4.9 แสดงค่า Peel force และพฤติกรรมการลอกออกของฝากับสภาพในช่วง easy-open peel ของ cast PBSA/PBAT blend และ cast PBSA/PHBV blend .....	69
ตารางที่ 4.10 สมบัติเชิงกลของ PBS/PBAT 80/20 blend และ PBSA/PBAT 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DB 0.0025, 0.005 และ 0.02 phr .....	72
ตารางที่ 4.11 สมบัติเชิงกลของ PBS/PHBV 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DCP 0.005, 0.01 และ 0.02 phr .....	76
ตารางที่ 4.12 แสดงค่า Peel force และพฤติกรรมการลอกออกของฝากับสภาพในช่วง easy-open peel ของ PBS/PBAT และ PBS/PHBV blend ที่มีการเติม peroxide ในปริมาณต่างๆ.....	79
ตารางที่ 4.13 แสดงค่า Peel force และพฤติกรรมการลอกออกของฝากับสภาพในช่วง easy-open peel ของ PBSA/PBAT และ PBSA/PHBV blend ที่มีการเติม peroxide ในปริมาณต่างๆ.....	79

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต.....	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะติเฟท.....	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนอะติเฟท-โค-เทรพทาเลท .....	6
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของพอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาเลอเรต).....	7
รูปที่ 2.5 ภาพประกอบแบบจำลองการซึมผ่านแบบ solution-diffusion [11].....	10
รูปที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และไอน้ำกับความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ (ซ้าย) OTR ของ PLA film ในแต่ละความหนา [13] และ (ขวา) WVTR ของ polyethylene film ในแต่ละความหนา [14] (1 mil = 25 $\mu\text{m}$ ).....	12
รูปที่ 2.7 ค่าการต้านทานการซึมผ่าน (OTR และ WVTR) ของ petroleum-based plastics และ bio-based polymers [15].....	14
รูปที่ 2.8 แนวทางหลักในการปรับปรุงบรรจุภัณฑ์ให้มีสมบัติการต้านทานการซึมผ่านที่สูง [1].....	15
รูปที่ 2.9 อิทธิพลของสัดส่วน PHBV ต่อ (ซ้าย) oxygen permeability (OP) และ (ขวา) water vapor permeability (WVP) ของ PHBV/PLA blend [19].....	17
รูปที่ 2.10 (ซ้าย) water vapor permeability (WVP) และ (ขวา) oxygen permeability (OP) ของ PLA/PPC ทั้งที่เติมและไม่เติม Joncryl โดย A PLA/PPC (40/60) blend films, B PLA/PPC/Joncryl (40/60/0.2 phr) blend films, C PLA/PPC/Joncryl (40/60/0.5 phr) blend films, D PLA/PPC/Joncryl (40/60/1 phr) blend films, E PLA films และ F PPC films [20]	18
รูปที่ 2.11 กราฟลักษณะการลอกออกฟิล์มพอลิเมอร์จาก PLA, PBAT และ 20PBAT/80PLA โดย (a) tearing, (b) partial tearing, (c) cohesive และ (d) adhesive [21] .....	19
รูปที่ 2.12 Seal strengths กับอุณหภูมิการซีลของ PE/EVA/clay บน substrate ต่างชนิดกัน [22] .....	19
รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [23].....	20
รูปที่ 3.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต-โค-อะติเฟท [23].....	20

รูปที่ 3.3 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท [23] .....	20
รูปที่ 3.4 โครงสร้างทางเคมีของพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรตโควารีเรต [24] .....	21
รูปที่ 3.5 โครงสร้างทางเคมีของ Di(tert-butylperoxyisopropyl) benzene (Perkadox <sup>®</sup> 14S) [25] .....	21
รูปที่ 3.6 โครงสร้างทางเคมีของ Dicumyl peroxide [28] .....	21
รูปที่ 3.7 โครงสร้างทางเคมีของ Multifunctional epoxy chain extender Joncryl <sup>®</sup> ADR 4468 โดยที่ R <sub>1</sub> ถึง R <sub>5</sub> เป็น H, CH <sub>2</sub> หรือหมู่ alkyl [29] .....	22
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน (Oxygen transmission rate, OTR).....	26
รูปที่ 3.9 การทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) .....	27
รูปที่ 3.10 เครื่อง universal testing machine .....	28
รูปที่ 3.11 เครื่องซีลปิดปากถุงแบบสายพานต่อเนื่อง .....	29
รูปที่ 3.12 การทดสอบความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อน (Peel strength test).....	29
รูปที่ 4.1 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมของ PBS/PBAT 80/20 blend และ PBS/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend.....	31
รูปที่ 4.2 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมของ PBSA/PBAT 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend .....	31
รูปที่ 4.3 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบสตันด์ของ PBS/PBAT 80/20 blend และ PBS/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend.....	33
รูปที่ 4.4 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบสตันด์ของ PBSA/PBAT 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend.....	33
รูปที่ 4.5 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมของ PBS DB 0.02 phr, PBSA DB 0.02 phr, PBAT DB 0.02 phr และ PHBV DB 0.02 phr.....	34

รูปที่ 4.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (a) PBS/PBAT 80/20, (b) PBS/PBAT 80/20 ECE 0.1 phr, (c) PBSA/PBAT 80/20 และ (d) PBSA/PBAT 80/20 ECE 0.1 phr ที่หักในไนโตรเจนเหลว ตามลำดับ ..... 35

รูปที่ 4.7 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (a) PBS/PHBV 80/20, (b) PBS/PHBV 80/20 DB 0.02 phr, (c) PBS/PHBV 80/20 ECE 0.1 phr และ (d) PBS/PHBV 80/20 DB 0.02 + ECE 0.1 phr ที่หักในไนโตรเจนเหลว ตามลำดับ ..... 36

รูปที่ 4.8 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (a) PBSA/PHBV 80/20, (b) PBSA/PHBV 80/20 DB 0.02 phr, (c) PBSA/PHBV 80/20 ECE 0.1 phr และ (d) PBSA/PHBV 80/20 DB 0.02 + ECE 0.1 phr ที่หักในไนโตรเจนเหลว ตามลำดับ ..... 37

รูปที่ 4.9 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) ของ PBS/PBAT 80/20 blend และ PBS/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend ..... 39

รูปที่ 4.10 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) ของ PBSA/PBAT 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend ..... 39

รูปที่ 4.11 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของ PBS/PBAT 80/20 blend และ PBS/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend ..... 40

รูปที่ 4.12 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของ PBSA/PBAT 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend ..... 41

รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBS/PBAT 80/20 blend และ PBS/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend บน PBS blend sheet ..... 45

รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBSA/PBAT 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend บน PBS blend sheet ..... 46

รูปที่ 4.15 รูปแบบพฤติกรรมการลอกออก a) adhesive peel, b) cohesive peel, c) partial tearing peel และ d) tearing peel ..... 47

รูปที่ 4.16 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมของ PBS/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และที่เติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr, DCP 0.02 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr ..... 50



รูปที่ 4.17 ค่าแรงบิตระหว่างการผลิตของ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และที่เติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr, DCP 0.02 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr..... 51

รูปที่ 4.18 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบสของ PBS/PHBV 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และที่เติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr, DCP 0.02 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr ..... 52

รูปที่ 4.19 ค่าแรงบิตระหว่างการผลิตของ PBS DCP 0.02 phr, PBSA DCP 0.02 phr, PBAT DCP 0.02 phr และ PHBV DCP 0.02 phr ..... 52

รูปที่ 4.20 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (a) PBS/PHBV 80/20, (b) PBS/PHBV 80/20 DCP 0.02 phr, (c) PBS/PHBV 80/20 ECE 0.1 phr และ (d) PBS/PHBV 80/20 DCP 0.02 + ECE 0.1 phr ที่หักในไนโตรเจนเหลว ตามลำดับ ..... 53

รูปที่ 4.21 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (a) PBSA/PHBV 80/20, (b) PBSA/PHBV 80/20 DCP 0.02 phr, (c) PBSA/PHBV 80/20 ECE 0.1 phr และ (d) PBSA/PHBV 80/20 DCP 0.02 + ECE 0.1 phr ที่หักในไนโตรเจนเหลว ตามลำดับ ..... 54

รูปที่ 4.22 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) ของ PBS/PHBV 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และที่เติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr, DCP 0.02 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr ..... 55

รูปที่ 4.23 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของ PBS/PHBV 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และที่เติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr, DCP 0.02 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr ..... 56

รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBS/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และที่เติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr, DCP 0.02 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr บน PBS blend sheet ..... 58

รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และที่เติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr, DCP 0.02 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr บน PBS blend sheet ..... 59

รูปที่ 4.26 ลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์เบสฟิล์มหลังจากขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder) (a) PBS/PBAT 80/20 ECE0.1, (b) PBS/PHBV 80/20

DB0.02+ECE0.1, (c) PBS/PHBV 80/20 DCP0.02+ECE0.1 (d) PBSA/PBAT 80/20 ECE0.1, (e) PBSA/PHBV 80/20 DB0.02+ECE0.1 และ (f) PBSA/PHBV 80/20 DCP0.02+ECE0.1 .....	61
รูปที่ 4.27 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) ของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในระบบ reactive blend ที่ผ่านการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder).....	62
รูปที่ 4.28 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในระบบ reactive blend ที่ผ่านการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder) .....	63
รูปที่ 4.29 ค่า OTR และ WVTR ที่ได้จากการทดลอง โดยพล็อตตามการจำแนกประเภทของการต้านการซึมผ่าน (Barrier classification) [15].....	64
รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในระบบ reactive blend ที่ผ่านการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder) บน PBS blend sheet. ....	66
รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในระบบ reactive blend ที่ผ่านการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder) บน PBS blend sheet .....	67
รูปที่ 4.32 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมของ PBS/PBAT 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DB 0.0025, 0.005 และ 0.02 phr .....	71
รูปที่ 4.33 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมของ PBSA/PBAT 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DB 0.0025, 0.005 และ 0.02 phr .....	71
รูปที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBS/PBAT 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DB 0.0025, 0.005 และ 0.02 phr บน PBS blend sheet.....	73
รูปที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBSA/PBAT 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DB 0.0025, 0.005 และ 0.02 phr บน PBS blend sheet .....	73
รูปที่ 4.36 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมของ PBS/PHBV 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DCP 0.005, 0.01 และ 0.02 phr.....	75

รูปที่ 4.37 ค่าแรงบิดระหว่างการผลิตของ PBSA/PHBV 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DCP 0.005, 0.01 และ 0.02 phr ..... 75

รูปที่ 4.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBS/PHBV 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DCP 0.005, 0.01 และ 0.02 phr บน PBS blend sheet ..... 77

รูปที่ 4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBSA/PHBV 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DCP 0.005, 0.01 และ 0.02 phr บน PBS blend sheet ..... 77



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัญหาขยะพลาสติกได้รับความสนใจจากทั่วโลก ในปี 2018 มีการรายงานขยะพลาสติกเกิดขึ้นมากกว่า 340 ล้านตันทั่วโลก [1] ประมาณ 46% ของขยะพลาสติกเกิดขึ้นจากบรรจุภัณฑ์ด้านอาหารซึ่งเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง (single-use packaging) เป็นขยะพลาสติกในปริมาณมาก ดังนั้นจึงมีการพัฒนาและวิจัยการผลิตบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกที่สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพจำนวนมากเพื่อแก้ไขปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ภายในกลุ่มวิจัยได้มีการพัฒนาพลาสติกบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพมาก่อนหน้านี้จากการเบลนด์ Polybutylene succinate (PBS), Polylactic acid (PLA) และ Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) สิ่งที่ใช้ร่วมกับพลาสติกบรรจุภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปนั่นก็คือ พลาสติกปิดผนึกบรรจุภัณฑ์อาหารสำเร็จรูป (top seal) ซึ่งส่วนใหญ่ทำจากพอลิโอเลฟิน polyolefins เช่น Low density polyethylene (LDPE) ที่ไม่สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพ พลาสติกเหล่านี้มักปนเปื้อนจากการสัมผัสกับอาหารหลังจากการใช้งาน ส่งผลให้การคัดแยกทำความสะอาดเพื่อการรีไซเคิลมีความซับซ้อน จึงมักกำจัดด้วยการฝังกลบ หรือการเผาไหม้ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะ สำหรับการจัดการของเสียบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกที่สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพที่สัมผัสกับอาหารคือการทำปุ๋ยหมักที่มีกระบวนการกำจัดที่ง่าย และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ

Poly(butylene succinate) หรือ PBS เป็นหนึ่งในอะลิฟาติก พอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyester) ที่สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพ มีสมบัติเชิงกลเทียบเท่ากับพอลิโอเลฟิน เช่น polyethylene (PE) และ polypropylene (PP) นอกจากนี้มีการพัฒนาโคพอลิเมอร์ (Poly(butylene succinate-co-adipate) หรือ PBSA เป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม ที่สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพ มีสมบัติเชิงกลคล้ายคลึงกับพอลิเมอร์กลุ่มพอลิโอเลฟิน โดย PBSA มีค่า modulus ที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ PBS ซึ่งสมบัติเชิงกลของ PBSA จะคล้ายคลึงกับฟิล์ม Linear Low density polyethylene (LLDPE) ซึ่งหากต้องการปรับปรุงให้สามารถขึ้นรูปฟิล์มของทั้ง PBS และ PBSA ให้ง่ายมากยิ่งขึ้นมักจะทำการเบลนด์กับ Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่แตกสลายได้ทางชีวภาพ ในกลุ่มของพอลิเอสเทอร์ร่วมระหว่างสายโซ่ตรงและวงอะโรมาติก (Aliphatic-aromatic copolyester) เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง และมี melt strength ที่ดี ในทางกลับกันทั้ง PBS และ PBSA เมื่อใช้งานกับบรรจุภัณฑ์ด้านอาหาร สมบัติการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และไอน้ำ ยังเป็นข้อจำกัดในการใช้งานอยู่ ดังนั้นเพื่อให้

ได้สมบัติการต้านทานการซึมผ่านที่ดีขึ้น จึงทำการเบลนด์กับพอลิเมอร์ที่สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพที่มีสมบัติการต้านทานการซึมผ่านที่ดีกว่า PBS และ PBSA นั่นก็คือ Polyhydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate (PHBV) ในกลุ่มของ Poly(hydroxyalkanoates) (PHAs) พอลิเมอร์กลุ่มนี้เป็นพอลิเอสเทอร์ได้จากจุลินทรีย์ และแบคทีเรีย จากการหมักน้ำตาล หรือไขมัน ซึ่ง PHBV มีสมบัติการต้านทานการซึมผ่านค่อนข้างสูง โดยทำการศึกษาการเบลนด์ที่มี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend และทำการศึกษาสมบัติการต้านทานการซึมผ่านของออกซิเจน และไอน้ำ สมบัติเชิงกล และความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อน (peel strength test) ของฝาปิดกับภาดบรรจุภัณฑ์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) ศึกษาการขึ้นรูปเป็นฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีพอลิবিวิลิเนซซีเนต (PBS) และพอลิবিวิลิเนซซีเนตโคอะติเพท (PBSA) ที่เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีพอลิবিวิลิเนซซีเนต-โค-เทเรพทาเลท (PBAT) เป็นเฟสรอง ทั้งในระบบ non-reactive และระบบ reactive

2) ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของออกซิเจน และไอน้ำ, สมบัติเชิงกล ของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ และความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อน (peel strength test) ของฝาปิดกับภาดบรรจุภัณฑ์

## 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการพัฒนาฝาปิดภาดบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพ โดยทำการศึกษาพลาสติกที่สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพ PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลัก หรือเป็นเฟสหลัก เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองมีสมบัติเชิงกลที่คล้ายกับพอลิโพลีเอทิลีนที่ไม่สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพ และเพื่อให้ขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ได้ง่าย จึงสนใจที่นำพลาสติกที่สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพที่มี melt strength ที่ดีซึ่งก็คือ PBAT มาเบลนด์ แต่ข้อจำกัดเมื่อนำไปใช้เป็นฝาปิดภาดบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพดังกล่าวคือ สมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และไอน้ำที่สูง ดังนั้นการปรับปรุงให้มีสมบัติการต้านทานการซึมผ่านที่ดีขึ้น จึงทำการเบลนด์กับ PHBV เป็นพลาสติกที่สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพ มีสมบัติการซึมผ่านค่อนข้างต่ำ โดยฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้สามารถนำไปเป็นฝาปิดภาดบรรจุภัณฑ์ผนึกด้วยความร้อนแล้วลอกออกได้ง่าย

#### 1.4 ขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัย

การศึกษาสมบัติการซึมผ่านของออกซิเจน และไอน้ำ, สมบัติเชิงกล และ peel strength test ของพอลิเมอร์เบลนด์ โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลัก หรือเป็นเฟสหลัก ทำการเบลนด์กับ PBAT และ PHBV ในสัดส่วน 80/20 ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend

#### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยสรุป

1.5.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูล เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ออกแบบ และวางแผนวิธีการสำหรับงานวิจัย

1.5.3 ดำเนินการวิจัย

**ตอนที่ 1** ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ในระดับ lab scale ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding)

การศึกษาสมบัติการซึมผ่านของออกซิเจน และไอน้ำ, สมบัติเชิงกล และ peel strength test ของพอลิเมอร์เบลนด์จาก PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PBAT หรือ PHBV ที่อัตราส่วน 80:20 ผ่านปฏิกิริยา free radical, ปฏิกิริยา condensation และปฏิกิริยารวมกันของปฏิกิริยา free radical กับปฏิกิริยา condensation ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) และขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding)

**ตอนที่ 2** ศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ในระดับกึ่งอุตสาหกรรม โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในระบบ reactive blend ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder)

การศึกษาสมบัติการซึมผ่านของออกซิเจน และไอน้ำ, สมบัติเชิงกล และ peel strength test ของพอลิเมอร์เบลนด์จาก PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PBAT หรือ PHBV ที่อัตราส่วน 80:20 โดยการเบลนด์ในระบบ reactive blend ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปเป็นฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder)

1.5.4 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

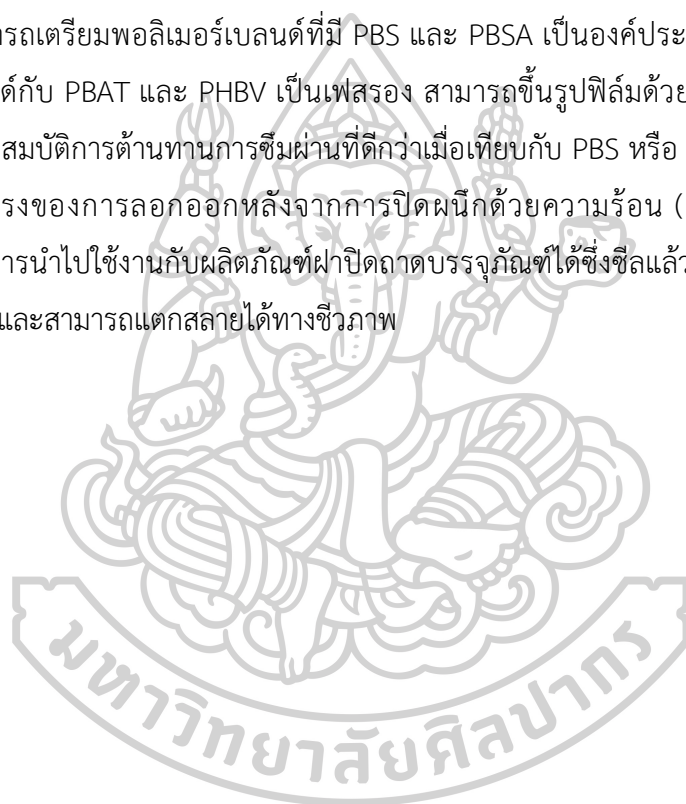
1.5.5 จัดทำรายงานผลการวิจัย

1.5.6 เสนอผลการวิจัย

- นำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ
- การสอบโครงงานวิจัย

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

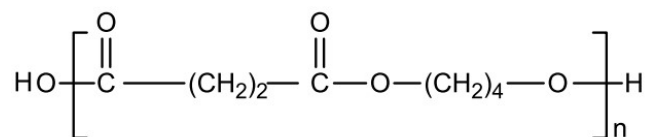
สามารถเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ที่มี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลัก หรือเฟสหลัก โดยการเบลนด์กับ PBAT และ PHBV เป็นเฟสรอง สามารถขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการอัดรีดเป็นฟิล์มได้ และมีสมบัติการต้านทานการซึมผ่านที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับ PBS หรือ PBSA ก่อนการปรับปรุง มีความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อน (peel strength test) ที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานกับผลิตภัณฑ์ฝาปิดถาดบรรจุภัณฑ์ได้ซึ่งซีลแล้วลอกออกได้ง่าย (easy-open peel) และสามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพ



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene Succinate, PBS) [2, 3]



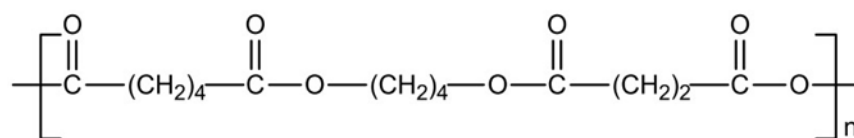
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

Poly(butylene succinate) หรือ PBS เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่ง อยู่ในประเภทพอลิเอสเตอร์ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.1 ลักษณะเป็นสายโซ่ตรง สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งเตรียมจากปฏิกิริยาการควบแน่น (condensation polymerization) ของ succinic acid กับ 1,4-butanediol หรืออาจมีมอนอเมอร์ตัวที่สามเป็น organic dicarboxylic-acid รวมอยู่ด้วย การผลิต PBS จากทรัพยากรปิโตรเคมี เริ่มจากกำมะถันถูกเปลี่ยนเป็น maleic anhydride ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิต succinic acid และ 1,4-butanediol นอกจากนี้ PBS ยังสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนได้ เช่น อ้อย มันสำปะหลัง เป็นต้น ผ่านกระบวนการทางชีวภาพ ด้วยกระบวนการหมักเพื่อเปลี่ยนกลูโคสไปเป็น succinic acid ซึ่ง succinic acid สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิต 1,4-butanediol จากนั้นการผสม succinic acid และ 1,4-butanediol ผ่านปฏิกิริยาการควบแน่นแล้วเชื่อมต่อเป็นสายโซ่ยาวจะได้เป็น PBS

PBS มีอุณหภูมิ  $T_g$  ประมาณ  $-44\text{ }^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิหลอมประมาณ  $112\text{--}114\text{ }^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิในการเกิดผลึกประมาณ  $66\text{ }^{\circ}\text{C}$  และมีความเป็นผลึก (crystallinity) ประมาณ 45% ซึ่งมีค่า elongation at break และค่า tensile strength ใกล้เคียงกับ LDPE และสามารถนำไปใช้แทนพอลิโอเลฟินได้ดี PBS เป็น aliphatic polyester ที่สามารถแตกสลายได้เองตามธรรมชาติโดยผ่านกลไกของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งเกิดที่พันธะเอสเตอร์โดยจะส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของ PBS ลดลง และเกิดการแตกสลายโดยจุลินทรีย์ไปในที่สุด นอกจากนี้ PBS ยังมีความเสถียรทางความร้อน (thermal stability) ที่ดีโดยมีอุณหภูมิในการสลายตัวทางความร้อน (decomposition temperature)  $399\text{ }^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นจึงมีการใช้งานที่หลากหลายตั้งแต่บรรจุภัณฑ์ใช้แล้วทิ้งและบรรจุภัณฑ์อาหาร รวมถึงการเกษตร อุตสาหกรรม หรือยานยนต์ และได้รับการรองรับว่าสัมผัสกับอาหารได้ นอกจากนี้มีการพัฒนาโคพอลิเมอร์ เช่น polybutylene succinate adipate (PBSA) และอื่น ๆ ที่มีหน่วยย่อยไกลคอลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความยืดหยุ่นของวัสดุ



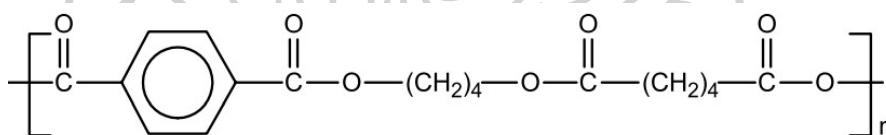
## 2.2 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท (Poly(butylene succinate-co-adipate), PBSA) [2]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตโคอะดิเพท

(Poly(butylene succinate-co-adipate) หรือ PBSA เป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม และมีคุณสมบัติทางกายภาพที่น่าสนใจรวมถึงความสามารถในการแตกสลายได้ทางธรรมชาติ จากรูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของ PBSA สามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แบบควบแน่นของ 1,4-butanediol ที่มี succinic acid และ adipic acid และมีสมบัติเชิงกลเป็นที่น่าพอใจเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลคล้ายคลึงกับพอลิเมอร์กลุ่มพอลิโอเลฟิน โดย PBSA มีอุณหภูมิ  $T_g$  ประมาณ  $-45^\circ\text{C}$  อุณหภูมิการหลอมเท่ากับ  $94^\circ\text{C}$  และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติระหว่าง PBSA กับ PBS พบว่า PBSA มีค่า modulus ต่ำกว่า มีความยืดหยุ่นสูงกว่า มีสมบัติในการแตกสลายที่ดีกว่า เนื่องจากมีความเป็นผลึกที่ต่ำกว่า PBS นอกจากนี้ PBSA ยังมีสมบัติในการขึ้นรูปที่ดี ดังนั้นจึงสามารถนำไปผลิตในรูปของเส้นใย การขึ้นรูปฟิล์ม รวมถึงกระบวนการฉีดได้อีกด้วย ซึ่งฟิล์มที่ผลิตจาก PBSA จะแสดงสมบัติเชิงกลที่คล้ายคลึงกับฟิล์มที่ผลิตจาก LLDPE

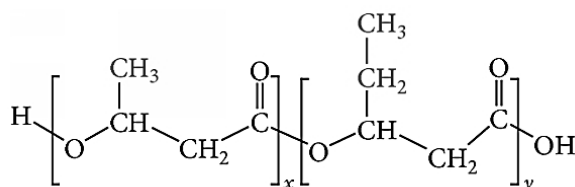
## 2.3 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) [3, 4]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท

Poly(butylene adipate-co-terephthalate) หรือ PBAT เป็นพอลิเมอร์ที่จัดอยู่ในกลุ่มของพอลิเอสเทอร์ร่วมระหว่างสายโซ่ตรง และวงอะโรมาติก (Aliphatic-aromatic copolyester) ส่วนใหญ่จะได้รับการสังเคราะห์จาก 1,4-butanediol, adipic acid และ terephthalic acid โดยมีอุณหภูมิ  $T_g$  ประมาณ  $-30^\circ\text{C}$  และอุณหภูมิหลอมประมาณ  $110 - 130^\circ\text{C}$  สมบัติของ PBAT มีการตกผลึกต่ำจากส่วนที่เป็นบิวทิลีนทาเรพทาเลทโดยมีส่วนประกอบของ aromatic ร่วมกับ aliphatic polyester และความยืดหยุ่นจากส่วนของบิวทิลีนอะดิเพท ซึ่งเกิดจาก 1,4-Butanediol, adipic acid monomer ซึ่งส่งผลให้โคพอลิเมอร์มีความสามารถในการดึงยืดสูง มี modulus ที่ค่อนข้างต่ำ มีสมบัติเชิงกลคล้ายกับพวกรโม่พลาสติกออลาสโตเมอร์ แต่สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพ

## 2.4 พอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาเลอเรต) (Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate), PHBV) [5, 6]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของพอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-3-ไฮดรอกซีวาเลอเรต)

Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) หรือ PHBV เป็นหนึ่งในกลุ่ม Polyhydroxyalkanoate หรือ PHAs จัดเป็นพอลิเอสเทอร์ พบในรูปของ carbon source ของจุลินทรีย์อยู่ในลักษณะที่เป็น granule ซึ่งมีจุลินทรีย์หลายชนิดที่สามารถผลิต PHAs ได้ พอลิเมอร์ในกลุ่ม PHAs มีหลากหลายชนิดแตกต่างกันไปตามหมู่ -R และจำนวน n เช่น poly(3-hydroxybutyrate) (R = methyl, n = 1), poly(3-hydroxypropionate) (R = hydrogen, n = 1), poly(3-hydroxydodecanoate) (R = nonyl, n = 1) ด้วยโครงสร้างของ polymer ที่มีความหลากหลายนี้ทำให้พอลิเมอร์ในกลุ่มนี้มีสมบัติที่หลากหลาย ในบรรดาพอลิเมอร์ในกลุ่ม PHAs พอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต poly(3-hydroxybutyrate) หรือ PHB เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิพรอพิลีน (polypropylene) หรือ PP และพอลิสไตรีน (polystyrene) หรือ PS โดยมี Gas barrier properties และ moisture resistance ที่ดี มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ตั้งแต่ -50 จนถึง 4 °C, อุณหภูมิหลอม ( $T_m$ ) ตั้งแต่ 40 ถึง 180 °C

โดย PHBV เป็นโคพอลิเมอร์ระหว่าง 3-hydroxybutyrate (HB) และ 3-hydroxyvalerate ซึ่งสมบัติของพอลิเมอร์ชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของ HB และ HV โดย PHBV เป็นพอลิเมอร์ที่เปราะ (brittle) มีค่า modulus ที่สูง ในขณะที่เดียวกันการเพิ่มขึ้นของปริมาณ HV ใน PHBV จะสามารถปรับปรุงให้พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่น (flexible) มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่า modulus ลดลง

## 2.5 พอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blends) [3, 7-9]

การทำพอลิเมอร์เบลนด์เป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก ซึ่งเป็นวิธีที่ต้นทุนต่ำ และใช้เวลาน้อย เมื่อเทียบกับการหามอนอเมอร์ชนิดใหม่ หรือหาวิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ใหม่ โดยการนำพอลิเมอร์เบลนด์เป็นการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ สารละลาย (solution) หรือสารหลอมเหลว (molten) มาเบลนด์ให้เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous blending) ได้เป็นพอลิเมอร์เบลนด์ ซึ่งมีสมบัติที่เด่นของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมา

รวมกัน นอกจากนี้ยังได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติหลากหลาย เพียงแค่ปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสม แต่การเบลนด์พอลิเมอร์ต่างชนิดกันให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัมนั้นเป็นไปได้ยาก โดยจะพบว่าพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะกระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง โดยจะต้องมีการกระจายตัวขนาดเล็ก มีความสม่ำเสมอ และมีแรงยึดติดที่พื้นผิว (interfacial adhesion) มิฉะนั้นจะทำให้เกิดจุดบกพร่อง (defects) ภายในพอลิเมอร์เบลนด์ที่รอยต่อระหว่างเฟส ทำให้มีการส่งผ่านแรงจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่งได้ไม่ดี และเป็นจุดเริ่มต้นในการแตกหัก ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ที่นำมาเบลนด์ ดังนั้นในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จึงต้องพิจารณาความสามารถในการเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์เบลนด์

### ชนิดของพอลิเมอร์เบลนด์ (Types of polymer blends)

การจำแนกพอลิเมอร์เบลนด์จากความเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกัมนั้น (miscible) ในระดับโมเลกุล (molecular level) แบ่งได้ 3 แบบดังนี้

1) พอลิเมอร์เบลนด์ที่เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ (Miscible blend) พอลิเมอร์ที่เบลนด์เข้ากันได้ อย่างเป็นเนื้อเดียวกัมนั้นในระดับโมเลกุลเกิดเป็นพอลิเมอร์ชนิดใหม่และมีสมบัติผสมผสานของพอลิเมอร์ที่นำมาผสม โดยสมบัติต่างๆจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนการเบลนด์ ความเข้ากันได้มีลักษณะนี้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์สูงในรูปแบบพันธะไฮโดรเจน หรือการเกิดผลึกร่วมกัน และแสดงค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) เพียงค่าเดียว

2) พอลิเมอร์เบลนด์ที่เข้ากันได้ (Compatible blend) เนื่องจากความแตกต่างทางด้านเคมีและฟิสิกส์ พอลิเมอร์จึงไม่เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ แต่จะเกิดการแยกเฟส โดยพอลิเมอร์ที่มีสัดส่วนมากกว่าเป็นเฟสต่อเนื่อง (Continuous matrix phase) จะแสดงสมบัติเด่นกว่าพอลิเมอร์ที่มีสัดส่วนน้อยกว่าซึ่งเป็นเฟสกระจาย (Dispersed phase) ถ้าสองเฟสมีการกระจายตัวอย่างดีและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันดี (interfacial adhesion) จะส่งผลให้สมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ดีขึ้น แต่หากเฟสกระจายมีขนาดอนุภาคใหญ่และกระจายไม่สม่ำเสมอจะทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ไม่ดี

3) พอลิเมอร์เบลนด์ที่เข้ากันไม่ได้ (Incompatible blend) เป็นพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่เข้ากัน ทำให้ได้พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีสมบัติเชิงกลด้อย เนื่องจากเกิดการแยกเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิดอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลจากแรงเหนี่ยวระหว่างเฟสต่ำ สมบัติเชิงกลแย่ และทำให้ตัวทำละลายแพร่เข้าไปได้ง่าย เนื่องจากมีช่องว่างหรือปริมาตรอิสระมาก

เนื่องจากสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ สัดส่วนของการเบลนด์ และโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์ ดังนั้นการใช้สารเชื่อมประสานในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์เบลนด์ กระบวนการเชื่อมประสานต้องสามารถลดแรงตึงผิวระหว่างเฟส ทำให้อนุภาคที่กระจายตัวมีขนาดเล็กลง ทำให้ให้เกิดเสถียรภาพทางโครงสร้างพื้นฐานในระหว่างการได้รับความร้อน

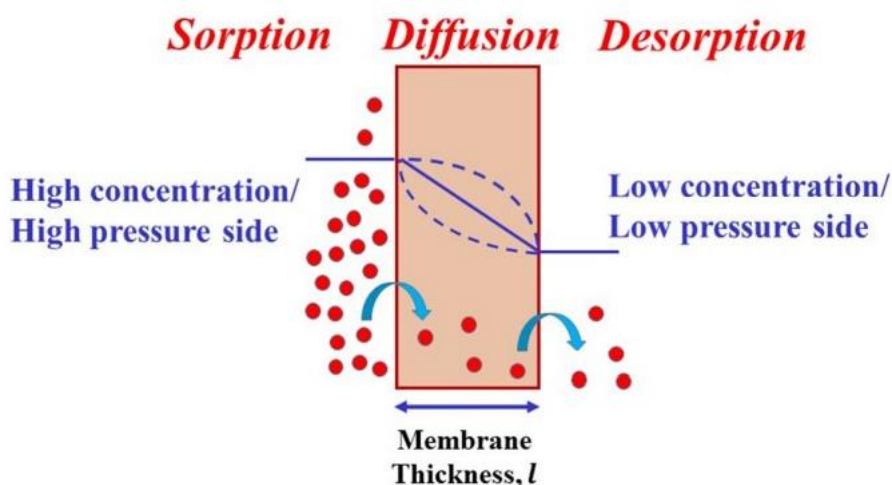
และแรงเค้นระหว่างการผสม และต้องคงไว้ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสแม้ว่าพอลิเมอร์เบลนด์จะอยู่ในสถานะของแข็ง

## 2.6 สารช่วยประสาน (Compatibilizer)

การเพิ่มความเข้ากันได้ในพอลิเมอร์เบลนด์ (Compatibilization) เป็นกระบวนการในการปรับปรุง interfacial adhesion ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์เบลนด์ที่ไม่สามารถเข้ากันได้ดี โดยการลดแรงตึงผิวบริเวณรอยต่อระหว่างเฟส ปรับปรุงและเพิ่มเสถียรภาพลักษณะสัณฐานของพอลิเมอร์เบลนด์ การเพิ่มความเข้ากันได้ในพอลิเมอร์เบลนด์สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การเติมองค์ประกอบที่สามปริมาณเล็กน้อย ซึ่งสามารถเข้ากันได้ดีกับทั้งสองเฟสของพอลิเมอร์เบลนด์ การเติมพอลิเมอร์ร่วมที่มีส่วนซึ่งสามารถเบลนด์เข้ากันได้ดีกับองค์ประกอบหนึ่ง และมีอีกส่วนที่สามารถเบลนด์เข้ากันได้ดีกับอีกองค์ประกอบหนึ่ง และการเบลนด์แบบเกิดปฏิกิริยา (reactive compounding) ซึ่งจะช่วยให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ในพอลิเมอร์เบลนด์อย่างน้อยหนึ่งชนิดได้รับการปรับปรุง ทำให้มีส่วนที่สามารถเบลนด์เข้ากันได้ดีกับองค์ประกอบอื่นเกิดขึ้น เป็นต้น

Reactive compatibilizer คือ เป็นวิธีการที่มีเติมสารช่วยผสมในพอลิเมอร์เบลนด์โดยทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างพอลิเมอร์ในองค์ประกอบในระหว่างกระบวนการผสม เป็นการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสส่งผลให้อนุภาคที่กระจายตัวมีขนาดเล็กลง โดยเติมสารเคมีลงในพอลิเมอร์เบลนด์เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้โดยเกิดอันตรกิริยาระหว่างเฟส ซึ่งทำหน้าที่คล้ายสารลดแรงตึงผิว ตัวอย่างเช่นการเติม สารประกอบอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ (organic peroxide) คือสารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจนสองอะตอมติดกันเรียกว่า หมูเปอร์ออกไซด์ (peroxy group) -O-O- ในโครงสร้าง ซึ่งเมื่อได้รับความร้อนทำให้เกิด free radical ในรูปแบบ R-O• ดังนั้นเปอร์ออกไซด์อินทรีย์จึงมีประโยชน์ในฐานะตัวเริ่มปฏิกิริยา (radical initiator) สำหรับการเกิดพอลิเมอร์ไซโซ ซึ่งสารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์มีหลากหลายประเภท เช่น polyester, peroxydicarbonate, diacyl peroxides, diacyl peroxides, hydroperoxide และ peroxyketals เป็นต้น ทั้งนี้การใช้งานต้องคำนึงถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของเปอร์ออกไซด์ซึ่งมักจะแสดงในรูปแบบครึ่งชีวิต (half-life) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

## 2.7 การถ่ายเทมวลสารในฟิล์มพอลิเมอร์ (Mass transfer in polymer films) [1, 10, 11]



รูปที่ 2.5 ภาพประกอบแบบจำลองการซึมผ่านแบบ solution-diffusion [11]

การที่โมเลกุลขนาดเล็ก เช่น  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  และ  $N_2$  สามารถซึมผ่านพอลิเมอร์เมมเบรนหรือฟิล์ม เนื่องจากความแตกต่างของ pressure ทำหน้าที่เป็นแรงเคลื่อนให้โมเลกุลเคลื่อนที่ผ่านจากบริเวณที่มี pressure สูงไปยังด้านที่มี pressure ต่ำ ซึ่งการอธิบายปรากฏการณ์ของการซึมผ่านของโมเลกุลขนาดเล็กในพอลิเมอร์โดยใช้แบบจำลอง solution-diffusion ประกอบด้วยสามขั้นตอน (a) การดูดซับ (sorption) ของโมเลกุลขนาดเล็กที่มีความเข้มข้นสูงเข้าสู่ผิวเมมเบรนหรือฟิล์ม (b) การแพร่ผ่าน (diffusion) ของโมเลกุลขนาดเล็กจากบริเวณความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำผ่านเมมเบรนหรือฟิล์ม และ (c) การคายซับ (desorption) ผ่านการระเหยจากพื้นผิวฝั่งที่มีความเข้มข้นต่ำของเมมเบรนหรือฟิล์ม

โดยปกติค่าที่ส่งผลถึงการเพิ่มขึ้น หรือลดลงของสมบัติการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำผ่านฟิล์มมักจะกล่าวถึงส่วนของการละลายกับส่วนของการแพร่ ดังนั้นความสามารถในการซึมผ่าน (permeability,  $P$ ) จึงสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ในการแพร่ หรือ diffusion coefficient,  $D$  และสัมประสิทธิ์ในการละลาย หรือ solubility coefficient,  $S$

$$P = D * S \quad (1)$$

สัมประสิทธิ์ในการแพร่ ( $D$ ) อธิบายถึงอัตราการเคลื่อนที่หรือจลนศาสตร์ของสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กผ่านสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งมักจะคำนวณจาก Fick's first law หรือ second law of diffusion สำหรับสัมประสิทธิ์ในการละลาย ( $S$ ) แสดงถึงค่าการละลายของสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กในพอลิเมอร์เป็นอัตราส่วนของความเข้มข้นของสารโมเลกุลขนาดเล็กก่อนและหลังการซึมผ่านพอลิเมอร์ต่อความดันของก๊าซ หรือที่รู้จักใน Henry's law

การแพร่ของโมเลกุลขนาดเล็กในสายโซ่พอลิเมอร์มักจะเคลื่อนที่ผ่านการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตามระยะทาง (concentration gradient) อธิบายตาม Fick's law จะได้อัตราของโมเลกุลที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดหนึ่งต่อเวลา กำหนดว่าเกิดการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง และเป็นการแพร่แบบ steady state ซึ่งความเข้มข้นไม่ขึ้นกับเวลา

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{Q}{At} \quad (2)$$

เมื่อ F คือ ฟลักซ์ หรือ อัตราการถ่ายโอนมวล (rate of mass transfer) ของโมเลกุลขนาดเล็ก (มีปริมาณ Q) ในหนึ่งหน่วยพื้นที่ (A) ต่อหนึ่งหน่วยเวลา (t) โดยที่ C คือความเข้มข้นของสารโมเลกุลขนาดเล็ก x คือ ทิศทางในการเคลื่อนที่ของสารโมเลกุลขนาดเล็ก ซึ่ง  $\partial C/\partial x$  คือค่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตามระยะทาง หรือ concentration gradient ในทิศทาง x

หากความเข้มข้นของก๊าซหรือไอน้ำทั้งสองด้านของฟิล์มพอลิเมอร์ ( $C_1$  และ  $C_2$ ) และความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ (L) และเป็นกรณี steady state จะได้ว่า  $\partial C/\partial x$  สามารถใช้  $(C_1 - C_2)/L$  ได้

$$\frac{Q}{At} = D \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{(C_1 - C_2)}{L} \quad (3)$$

$$Q = D \frac{(C_1 - C_2) At}{L} \quad (4)$$

สำหรับก๊าซ ที่มีความเข้มข้น (C) บริเวณผิวจะขึ้นอยู่กับความดัน (p) ตาม Henry's law

$$C = S * p \quad (5)$$

โดย S คือ สัมประสิทธิ์ในการละลายของสารโมเลกุลเล็กในพอลิเมอร์ ดังนั้นปริมาณการซึมผ่านของสารโมเลกุลเล็กที่ผ่านฟิล์มพอลิเมอร์จะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์ในการแพร่ และสัมประสิทธิ์ในการละลาย ซึ่ง  $\Delta p$  คือ pressure gradient ระหว่าง 2 ฝั่งของฟิล์มพอลิเมอร์

$$P = \frac{Q L}{A t \Delta p} \quad (6)$$

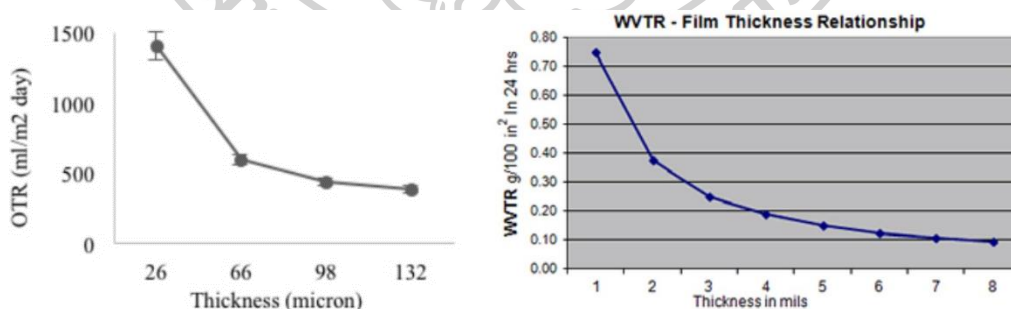
Fick's theory สันนิษฐานว่าแรงขับในการแพร่ผ่านมาจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตามระยะทาง หรือ concentration gradient และไม่มีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารโมเลกุลขนาดเล็กกับสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งในความเป็นจริงการแพร่มีความซับซ้อนมาก เป็นผลมาจาก (1) concentration gradient มีการเคลื่อนที่แบบ non-linear มีการเปลี่ยนแปลงในการเคลื่อนที่เมื่ออยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ (2) แรงขับ (driving force) อาจมาจาก chemical potential, molecular dynamic และการ

กระจายตัวของ free volume ในเนื้อพอลิเมอร์ (3) การเกิด interaction ระหว่างสารโมเลกุลเล็กกับสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบ non-Fickian ได้

**ตารางที่ 2.1** ตารางการเปรียบเทียบการซึมผ่าน Barrier Parameters

Barrier Property	Equation	Unit
Water Vapor Transmission Rate (WVTR)	$WVTR = \frac{\text{weight passed through}}{\text{area} \cdot \text{time}}$	$\text{g/m}^2\text{-day}$
Oxygen Transmission Rate (OTR)	$OTR = \frac{\text{volume passed through}}{\text{area} \cdot \text{time}}$	$\text{cm}^3/\text{m}^2\text{-day}$

ในการทดสอบ gas transmission rate (GTR) จำเป็นต้องคงค่า L และ  $\Delta p$  ที่เท่ากันเพื่อให้สอดคล้องกับสมการที่ 6 สำหรับสมบัติการต้านทานการซึมผ่านไม่ได้ขึ้นกับธรรมชาติของวัสดุอย่างเดียว แต่จะขึ้นกับอุณหภูมิ ความดัน และความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งในการศึกษาสมบัติการซึมผ่านมักจะถูกศึกษาโดยมีการควบคุมสภาวะ อีกทั้ง transmission rate และ permeance มีการเปลี่ยนแปลงไปตามความหนาของฟิล์ม แต่สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพการซึมผ่านได้คร่าวๆสำหรับฟิล์มพอลิเมอร์ที่มีความหนา  $>10 \mu\text{m}$  [12] ในสภาวะและความหนาเดียวกัน โดยความหนาจะส่งผลน้อยลงแบบการลดลงของกราฟของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล



**รูปที่ 2.6** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และไอน้ำกับความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ (ซ้าย) OTR ของ PLA film ในแต่ละความหนา [13] และ (ขวา) WVTR ของ polyethylene film ในแต่ละความหนา [14] (1 mil = 25  $\mu\text{m}$ )

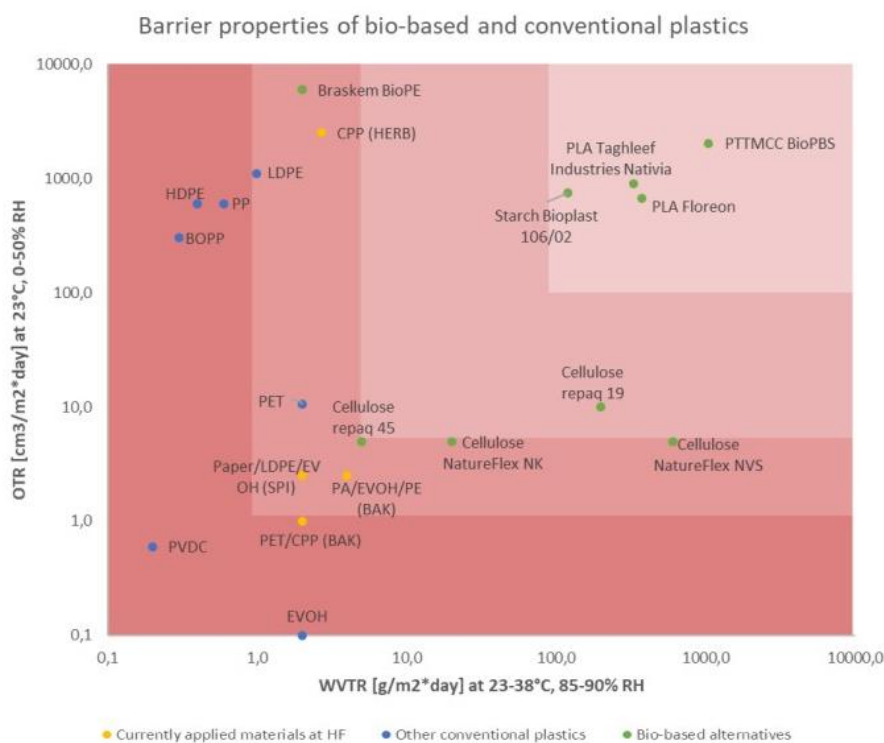
## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การจำแนกประเภทของการต้านการซึมผ่าน (Barrier classification) ตามการซึมผ่านของฟิล์มพอลิเมอร์ และความเหมาะสมในการใช้งานกับบรรจุภัณฑ์ [15] มีการจำแนกประเภทเป็นระดับสูงมาก, สูง, กลาง และ ต่ำ ซึ่งการจำแนกประเภทเหล่านี้ในแต่ละแหล่งอ้างอิงให้ค่าที่ไม่เท่ากันแต่เป็นช่วงที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากไม่ได้มีข้อกำหนดในการใช้งานกับบรรจุภัณฑ์แต่ละประเภทอย่างแน่ชัด โดยในตารางที่ 2.2 เป็นการจำแนกประเภทการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำตามความต้องการในการใช้งานของบรรจุภัณฑ์ โดยใช้ค่า OTR และ WVTR พบว่า PVDC และ EVOH มีการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้สูง ในขณะที่พลาสติกที่แตกสลายได้ทางชีวภาพอื่น ๆ มีการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่ต่ำ แต่ข้อจำกัดของพลาสติกที่แตกสลายได้ทางชีวภาพสำหรับการต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำจะถูกจำกัดอยู่ในประเภทต่ำ หรือมีการต้านการซึมผ่านของไอน้ำที่ไม่ค่อยดี ด้วยเหตุนี้จึงมีการวิจัย พัฒนาและปรับปรุงการต้านการซึมผ่านของก๊าซ เพื่อให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ และการใช้งานด้านอื่น ๆ ที่ต้องการการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และไอน้ำที่ต่ำ

**ตารางที่ 2.2** การจำแนกประเภทของการต้านการซึมผ่าน (Barrier classification) ตามค่า OTR และ WVTR [15]

Barrier classification	OTR [ $\text{cm}^3/\text{m}^2/\text{day}$ ] at 23°C, 0% RH	WVTR [ $\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ ] at 38°C, 90%RH	applied for
low	>100	>100	frozen foods, fruit, vegetables, sugar
medium	6-100	6-100	chilled foods (e.g. dairy)
high	1-5	1-5	dry foods, high aroma content, oxidation sensitive (e.g. peanuts, coffee, spices)
very high	<1	<1	high sensitivity products (e.g. infant nutrition)



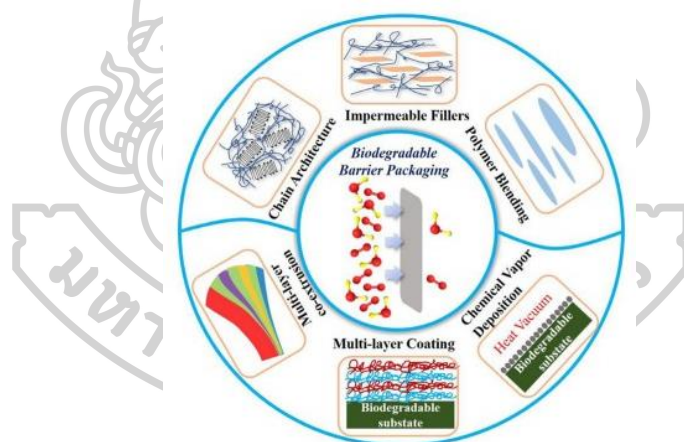


**รูปที่ 2.7** ค่าการต้านทานการซึมผ่าน (OTR และ WVTR) ของ petroleum-based plastics และ bio-based polymers [15]

สำหรับรูปที่ 2.7 แสดงค่า OTR กับ WVTR ของฟิล์มพอลิเมอร์เป็นการเปรียบเทียบอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน กับการซึมผ่านของไอน้ำของพอลิเมอร์แต่ละชนิด โดยการซึมผ่านของไอน้ำของ petroleum-based plastics มีค่าที่ต่ำกว่า biodegradable plastic ซึ่ง PET และ PP เป็น petroleum-based plastics ที่มีการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำที่ดี จึงพบการใช้งานพอลิเมอร์สองชนิดนี้ในการใช้งานบรรจุภัณฑ์อย่างมาก สำหรับ biodegradable plastic ยังมีข้อจำกัดในการนำใช้งานด้านฟิล์มบรรจุภัณฑ์โดยพบว่าทั้งการซึมผ่านของไอน้ำยังมีค่าที่สูงกว่า petroleum-based plastics แต่การซึมผ่านของออกซิเจนของ biodegradable plastic บางชนิดมีค่าที่ต่ำกว่า petroleum-based plastics

การปรับปรุงสมบัติการต้านทานการซึมผ่าน (barrier properties) ของก๊าซและไอน้ำ ให้สามารถต้านทานการซึมผ่านได้มากขึ้น สามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น การปรับปรุงโครงสร้างของพอลิเมอร์ (polymer structure/architecture tailoring) ตัวอย่างเช่น การสังเคราะห์พอลิเมอร์ให้มี -OH ในโครงสร้างของ PE หรือ (-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-) จะได้โครงสร้างทางเคมีของ PVOH ซึ่งมีการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่สูงกว่า PE [16], การทำฟิล์มหลายชั้น (multi-layer coextrusion) เป็นการรวมข้อดีของฟิล์มแต่ละชนิดไว้ในแต่ละชั้นเพื่อให้ฟิล์มโดยรวมมีสมบัติที่หลากหลาย เช่น การทำฟิล์ม

หลายชั้นที่มี EVOH อยู่ชั้นตรงกลางมีการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่สูง แต่การต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำที่แย่ ดังนั้นจึงประกอบ PP อยู่ชั้นนอกที่มีสมบัติที่ง่ายต่อการปิดผนึกด้วยความร้อน และมีความต้านทานซึ่งผ่านของไอน้ำได้ดี, การเคลือบปรับปรุงผิว (coating) เป็นวิธีเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ ซึ่งการเคลือบผิวฟิล์มคล้ายกับ coextrusion หรือ lamination ซึ่งจะได้ฟิล์มหลายชั้นแต่ต่างกันที่ฟิล์มที่ได้จากการเคลือบผิวจะมีความบางระดับไมโครจนถึงระดับนาโนสเกลได้ รวมทั้งการใช้นาโนเทคโนโลยีเข้ามาปรับปรุงสมบัติการต้านทานการซึมผ่าน เป็นวิธีที่ทำให้เกิดการแพร่ของก๊าซและไอน้ำยากขึ้นจากเส้นทางที่คดเคี้ยว (tortuous path) ในเนื้อฟิล์มพอลิเมอร์ อีกทั้งหลังจากที่มีการเติมอนุภาคนาโนช่วยเหนียวทำให้เกิดผลึกมากขึ้น อนุภาคนาโนมีทั้งชนิดที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จะส่งผลต่อ solubility coefficient ของฟิล์ม nanocomposite ตัวอย่างของอนุภาคนาโน เช่น clay, graphene, chitosan และอื่น ๆ แต่วิธีที่ใช้กันแพร่หลาย และมีความคุ้มค่าในภาคอุตสาหกรรมคือพอลิเมอร์เบลนด์ หรือ polymer blending ซึ่งโดยทั่วไปมักใช้ในการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ แต่สำหรับการปรับปรุงการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำ มักจะทำการเบลนด์กับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติการต้านทานการซึมผ่านที่สูง



รูปที่ 2.8 แนวทางหลักในการปรับปรุงบรรจุภัณฑ์ให้มีสมบัติการต้านทานการซึมผ่านที่สูง [1]

จากการศึกษาการเตรียมฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารที่ต้านทานแบคทีเรียจากพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PBS/PBAT ที่ไม่เติมและเติมเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาโดยนางสาวณัฐกานต์ ยังชีพยืนอยู่ดี [3] ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้เปอร์ออกไซด์ 2 ชนิด คือ DCP หรือ Dicumyl peroxide และ Perkadox 14S ประกอบด้วยเปอร์ออกไซด์อยู่ 40 % ส่วนที่เหลือคือแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกา หลังจากการเบลนด์กับ PBAT ในสัดส่วนที่สูงขึ้น ส่งผลให้ elongation at break เพิ่มขึ้น และหลังจากมีการเติม DCP พบว่าสามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์เบลนด์ แต่การขึ้นรูป

เป็นไปได้ยากเนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางมากเกินไปจากความว่องไวของ DCP ทางผู้วิจัยจึงเปลี่ยนชนิดเปอร์ออกไซด์เป็น Perkadox 14S พบว่าหลังจากมีการเติม Perkadox 14S สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้จากการเกิดการเชื่อมขวางของ PBS และ PBAT เมื่อศึกษาค่ามัมส์สัมผัสของหยดน้ำกับฟิล์มพอลิเมอร์พบว่าเมื่อสัดส่วนของ PBAT เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ามัมส์สัมผัสของหยดน้ำลดลง เนื่องจาก PBAT มีขั้วมากกว่า PBS นอกจากนี้การเติม PBAT ส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของส่วน amorphous และหลังจากที่เติม Perkadox 14S พบว่าค่ามัมส์สัมผัสน้ำมีค่าลดลง และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับระบบที่ไม่เติม Perkadox 14S

การศึกษาการเบลนด์ PLA กับ PBSA โดย Bishwabhusana Palai และคณะ [17] ซึ่งมีการเติม Epoxy functionalised styrene acrylate (ESA) หรือ Joncryl<sup>®</sup> ADR 4368 ในปริมาณคงที่ 3 %wt ซึ่งเป็น chain extender ทำหน้าที่เป็น compatibilizer ทำการเบลนด์ในขั้นตอนเดียว และขึ้นรูปด้วยวิธีการ blown film extrusion โดยพบว่าหลังจากการเบลนด์ PLA/PBSA/ESA (S1, S2 และ S3) มีโครงสร้างเป็นแบบ long chain branching (LCB) ซึ่งสามารถช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล การซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์เบลนด์ฟิล์ม พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ฟิล์มมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ลดลง 60% และ 14% ตามลำดับเมื่อเทียบกับ PLA

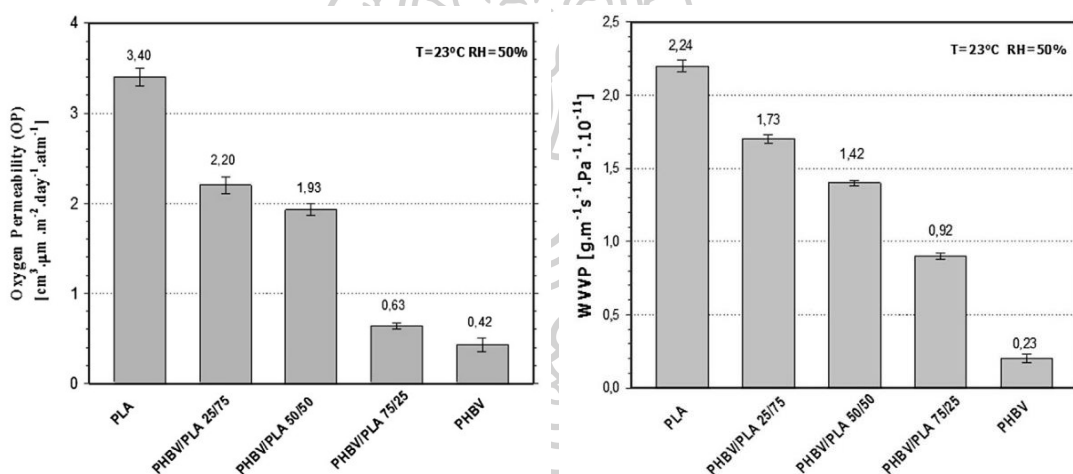
**ตารางที่ 2.3** ตารางแสดงค่า Oxygen และ Water Vapor Permeability ของ PLA/PBSA และ PLA/PBSA/ESA [17]

Sample Name	OTR (cc/m <sup>2</sup> .day)	O <sub>2</sub> Permeability (cc/m <sup>2</sup> .24h×cm/bar)	WVTR (gm/m <sup>2</sup> .day)	Water Vapour Permeability (gm/m <sup>2</sup> .24h× cm/bar)
VPLA	318.25	122.96	175.00	0.88
PBSA	365.78	155.17	231.82	1.28
80PLA/20PBSA	158.53	69.65	163.56	0.93
90PLA/10PBSA	167.79	72.45	189.31	1.06
95PLA/5PBSA	173.52	80.18	196.23	1.18
S1	109.95	49.14	129.63	0.75
S2	125.14	59.72	134.62	0.84
S3	130.88	57.50	145.83	0.83

การเตรียมฟิล์มจากการเบลนด์ของ PHBA กับ PBAT ของ Mara Cunha และคณะ [18] และทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มผ่านกระบวนการ blown film extrusion ซึ่งจะมีหัว die สองแบบโดยจะได้ฟิล์ม mono-layered film และ bi-layered film โดยพบว่า PBAT ช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์ ส่วน PHBV ส่งผลให้สมบัติการซึมผ่านของพอลิเมอร์เบลนด์ดีขึ้น และ

เมื่อทำการขึ้นรูปฟิล์มแบบ bi-layered film พบว่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์เทียบเท่ากับ PBAT ซึ่งสามารถออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้งานกับบรรจุภัณฑ์อาหารได้

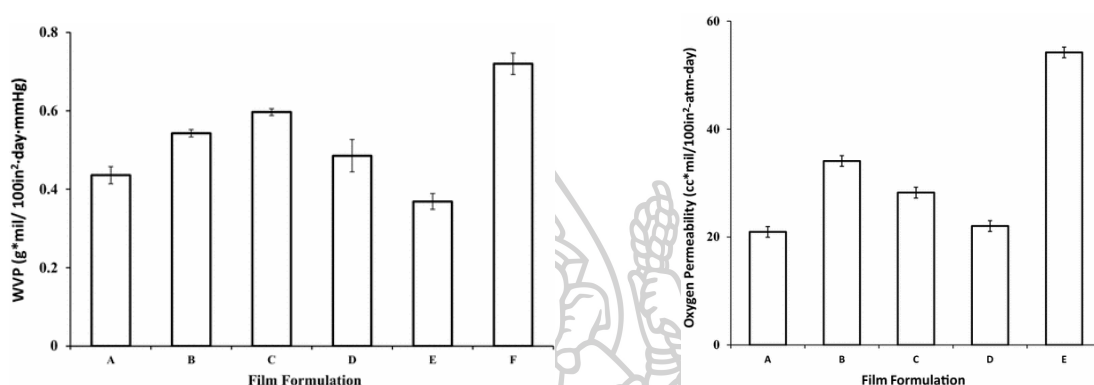
จากงานวิจัยของ Idris Zembouai และคณะ [19] ได้ศึกษาสมบัติหลังจากการเบลนด์ พอลิเมอร์ที่สามารถแตกสลายได้ทางชีวภาพระหว่าง poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) หรือ PHBV กับ polylactide หรือ PLA ซึ่งหลังจากการเบลนด์พบว่าการเพิ่มขึ้นของสัดส่วน PHBV สามารถช่วยปรับปรุงการต้านทานการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และไอน้ำ ให้มีค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และไอน้ำได้ยากขึ้นของพอลิเมอร์เบลนด์ PHBV/PLA และยังปรับปรุงการเกิดผลึกของ PLA เกิดการตกผลึกมากขึ้น โดยผลึก PHBV ทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสให้กับ PLA ซึ่งในการเกิดผลึกเป็นการเพิ่มความคดเคี้ยวในการแพร่ผ่านของก๊าซ (tortuosity of the diffusion path) อีกทั้งการที่มี PLA ในองค์ประกอบพอลิเมอร์เบลนด์ส่งผลให้ความหนืดของโดยรวมของพอลิเมอร์เบลนด์มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.9 อิทธิพลของสัดส่วน PHBV ต่อ (ซ้าย) oxygen permeability (OP) และ (ขวา) water vapor permeability (WVP) ของ PHBV/PLA blend [19]

จากงานวิจัยของ Qirui Sun และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ poly(propylene carbonate) หรือ PPC สัดส่วน PLA:PPC 40:60 ในระบบทั้งที่เติมและไม่เติม chain extender (Joncryl ADR 4368-C) พบว่าหลังจากเติม chain extender มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ และ interfacial adhesion ระหว่างสองเฟสมีรูปแบบ PLA-Joncryl-PPC copolymer แต่การเติม chain extender ชัดขวางการตกผลึกของ PLA ในพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PPC สำหรับการซึมผ่านของไอน้ำเมื่อมีการเบลนด์ PLA จะช่วยลดในการซึมผ่านของไอน้ำ เมื่อเทียบกับ PPC เมื่อมีการเติม chain extender พบว่าในการเติม chain extender ปริมาณน้อย (0.2 phr) จะทำให้การซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ chain extender (1 phr) การซึมผ่าน

ของไอน้ำมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการเติม chain extender ที่ 0.2 phr เป็นผลจากการขัดขวางการตกผลึก PLA หลังจากเติม chain extender และเมื่อเพิ่มปริมาณ chain extender จะเกิดการเชื่อมขวางมากยิ่งขึ้นสามารถขัดขวางการแพร่ผ่านของก๊าซได้ สำหรับค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนพบว่าพอลิเมอร์เบลนด์ PLA/PPC มีค่าการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนที่ต่ำกว่า PLA และ PPC ทั้งที่เติมและไม่เติม chain extender โดยการเติม chain extender ในปริมาณมากจะทำให้การซึมผ่านของออกซิเจนลดลงกว่าการเติม chain extender ปริมาณน้อย

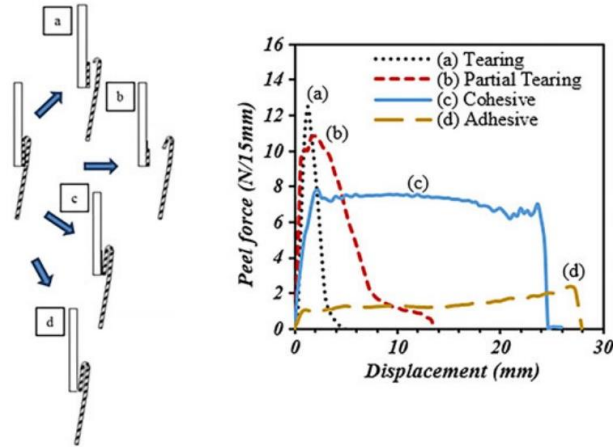


รูปที่ 2.10 (ซ้าย) water vapor permeability (WVP) และ (ขวา) oxygen permeability (OP)

ของ PLA/PPC ทั้งที่เติมและไม่เติม Joncryl โดย A PLA/PPC (40/60) blend films, B PLA/PPC/Joncryl (40/60/0.2 phr) blend films, C PLA/PPC/Joncryl (40/60/0.5 phr) blend films, D PLA/PPC/Joncryl (40/60/1 phr) blend films, E PLA films และ F PPC films [20]

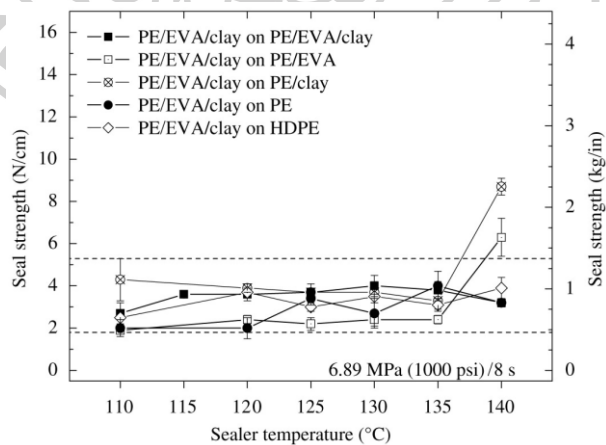
การศึกษาความเป็นไปได้ในการทำฟิล์มฝาปิดบรรจุภัณฑ์ที่สามารถลอกออกได้ (lidding films) โดย Pitcha Liewchirakorn และคณะ [21] ใช้ฟิล์มที่มีการเบลนด์ระหว่าง PLA กับ PBAT ที่มีความหนาต่างกัน (20, 35 และ 50  $\mu\text{m}$ ) ทำการปิดผนึกด้วยความร้อนบน PLA sheet (350  $\mu\text{m}$ ) ที่อุณหภูมิการซีลต่าง ๆ โดยจะพบกลไกของการลอกออกที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2.11 โดย (a) tearing failure ไม่เกิดการลอกออกของฟิล์มขณะทดสอบ เนื่องจากความแข็งแรงของการซีลที่สูง หรือ seal strength มีค่าสูงกว่า tensile strength ของฟิล์ม ส่งผลให้ฟิล์มขาดออกจากกัน (b) partial tearing failure พบว่าแรงที่ใช้ในการลอกน้อยกว่าการแตกหักแบบ tearing failure เล็กน้อย แต่ฟิล์มจะเริ่มเกิดการลอกออก และขาดออกจากกัน (c) cohesive failure ฟิล์มมีแนวโน้มที่จะลอกออกได้ในขณะทดสอบ และค่า peel strengths น้อยกว่าการแตกหักแบบ tearing และ partial tearing failure จะเป็นค่าเฉลี่ยระหว่าง 20 - 80% ของระยะการลอก (displacements) และ (d) adhesive failure ฟิล์มจะสามารถลอกออกจาก substrate ได้ง่ายโดยไม่มีฟิล์มเหลือติดอยู่กับ substrate และมีค่า peel strength ที่ต่ำ สำหรับงานวิจัยนี้ ฟิล์ม PLA/PBAT 80:20 ที่ความหนา 20  $\mu\text{m}$  เหมาะสมใช้

เป็นฟิล์มฝาปิดผนึกบน PLA sheet ได้ เนื่องจากมีความสามารถ easy-peel lidding film โดยมีความแข็งแรง peel strength ที่ 8 - 10 N/15 mm ในช่วงอุณหภูมิ 76 - 105 °C



รูปที่ 2.11 กราฟลักษณะการลอกออกฟิล์มพอลิเมอร์จาก PLA, PBAT และ 20PBAT/80PLA โดย (a) tearing, (b) partial tearing, (c) cohesive และ (d) adhesive [21]

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการซีลด้วยความร้อนของฟิล์ม polyethylene-based nanocomposite ในช่วงอุณหภูมิการซีลที่ต่างกัน บน substrate ที่ต่างกัน ซึ่งมีการรายงานค่า seal strength ในช่วง 1.8 - 5.3 N/cm (1-2.5 lb/in) [22] พบว่าเป็นช่วงของการลอกออกจากการซีลด้วยความร้อนที่ลอกออกได้ง่าย (easy-open peel) สำหรับ flexible packaging บริเวณเส้นประแนวนอนของรูปที่ 2.12

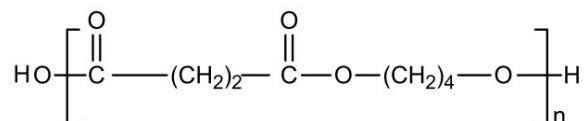


รูปที่ 2.12 Seal strengths กับอุณหภูมิการซีลของ PE/EVA/clay บน substrate ต่างชนิดกัน [22]

### บทที่ 3

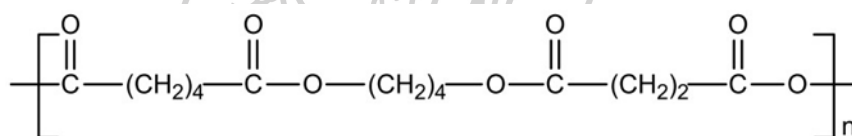
#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย



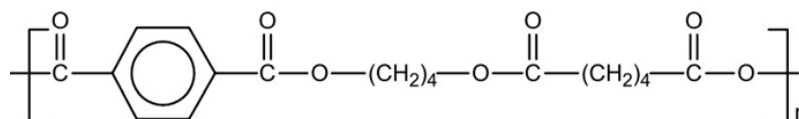
รูปที่ 3.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [23]

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate, PBS) BioPBS™ FZ91PM จาก PTT MCC Biochem Company Limited เหมาะสำหรับการขึ้นรูปโดยกระบวนการ blown film extrusion และ cast film extrusion



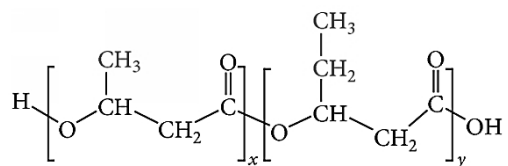
รูปที่ 3.2 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต-โค-อะดิเปต [23]

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต-โค-อะดิเปต (Poly(butylene succinate-co-adipate), PBSA) BioPBS™ FD92PM จาก PTT MCC Biochem Company Limited เหมาะสำหรับการขึ้นรูปโดยกระบวนการ blown film extrusion และ cast film extrusion



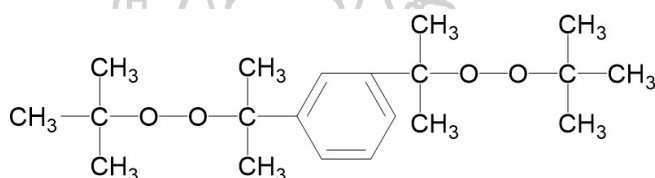
รูปที่ 3.3 โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต [23]

พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลต (Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) Ecoflex® F Blend C1200 จาก BASF chemical จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา เหมาะสำหรับการขึ้นรูปโดยกระบวนการ blown film extrusion และ cast film extrusion



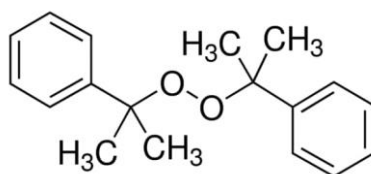
รูปที่ 3.4 โครงสร้างทางเคมีของพอลิไฮดรอกซีบิวทีเรตโควาริเรต [24]

พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรตโควาริเรต (Poly(hydroxybutyrate-co-valerate), PHBV) ENMAT Y1000P จาก บริษัท Tianan Biologic material จำกัด ประเทศจีน โดยมีปริมาณไฮดรอกซีวาริเรต (hydroxy valerate content) 3 mol% สามารถขึ้นรูปโดยกระบวนการ injection molding, thermoforming, blown films extrusions และ cast film extrusions



รูปที่ 3.5 โครงสร้างทางเคมีของ Di(tert-butylperoxyisopropyl) benzene (Perkadox® 14S) [25]

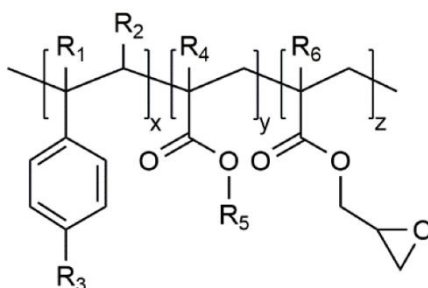
Di(tert-butylperoxyisopropyl) benzene (Perkadox® 14S) (DB) มีลักษณะเป็นผงสีขาว มีปริมาณเปอร์ออกไซด์ 40% โดยน้ำหนัก ส่วนองค์ประกอบอื่นเป็น  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{SiO}_2$  จากบริษัท Akzo Nobel ประเทศไทย ใช้เป็น free radical initiator เพื่อทำหน้าที่เพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) ในการเบลนด์โดยมี  $t_{1/2}$  ที่อุณหภูมิ 180 °C ประมาณ 2.5 นาที [26, 27]



รูปที่ 3.6 โครงสร้างทางเคมีของ Dicumyl peroxide [28]

Dicumyl peroxide (DCP) 99% มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาว จากบริษัท Thermo Fisher Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้เป็น free radical initiator เพื่อทำหน้าที่เพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) ในการเบลนด์โดยมี  $t_{1/2}$  ที่อุณหภูมิ 180 °C ประมาณ 0.7 นาที [26, 27]





**รูปที่ 3.7** โครงสร้างทางเคมีของ Multifunctional epoxy chain extender Joncryl® ADR 4468 โดยที่ R<sub>1</sub> ถึง R<sub>5</sub> เป็น H, CH<sub>2</sub> หรือหมู่ alkyl [29]

Multifunctional epoxy chain extender Joncryl® ADR 4468 (ECE) เป็นสารเคมีประเภท Multifunctional epoxide ทำหน้าที่เป็นตัวขยายสายโซ่ (Chain extender) และสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) จากบริษัท BASF Chemical Co., Ltd. มีลักษณะเป็นผลึกใส มีค่า Epoxy equivalent weight เท่ากับ 310 กรัมต่อโมล, อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T<sub>g</sub>) 59 °C, น้ำหนักโมเลกุล 7250 และอุณหภูมิหลอมในช่วง 120-140 °C

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน

- 3.2.1 เครื่องผสมภายในแบบปิด (Internal mixer) รุ่น MX 105-D40L50 บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด ประเทศไทย
- 3.2.2 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) รุ่น PR10-W300L350 บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด ประเทศไทย
- 3.2.3 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Co-rotating twin screw extruder) L/D = 40 รุ่น HRJ-25 บริษัท Enmach Co.,Ltd. ประเทศจีน
- 3.2.4 เครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder) รุ่น LBE20-30/P บริษัท แล็บเทค เอนจิเนียริง จำกัด ประเทศไทย

### 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์และทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์

- 3.3.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM) รุ่น MIRA3 บริษัท TESCAN ประเทศสาธารณรัฐเช็ก
- 3.3.2 ตู้ควบคุมความชื้น (Desiccator Dry cabinet) รุ่น DE-80AD บริษัท ชายน้ลูชั่น จำกัด ประเทศไทย

- 3.3.3 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของก๊าซ (Gas permeability tester, GTR) รุ่น GDP-C บริษัท Brugger ประเทศเยอรมัน
- 3.3.4 เครื่องทดสอบสมบัติการดึงยืด (Universal Testing Machine) รุ่น NRI-TS500-5B บริษัท นรินทร์อินสทรูเมนต์ จำกัด ประเทศไทย
- 3.3.5 เครื่องซีลปิดปากถุง แบบสายพานต่อเนื่อง รุ่น BSV-5I บริษัท ทียู แพ็ค จำกัด ประเทศไทย

### 3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

#### 3.4.1 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding)

การศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จาก PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PBAT หรือ PHBV ในอัตราส่วน 80:20 ผ่านปฏิกิริยา free radical โดยเติม DB ในปริมาณ 0.02 phr และปฏิกิริยา condensation โดยเติม ECE ในปริมาณ 0.1 phr และปฏิกิริยารวมกันของปฏิกิริยา free radical และปฏิกิริยา condensation โดยเติม DB 0.02 phr + ECE 0.1 phr โดยสัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการทดลองโดยการเบลนด์กับ PBAT ดังตารางที่ 3.1 และการเบลนด์กับ PHBV ดัง

ตารางที่ 3.2 ซึ่งในการเบลนด์กับ PHBV มีการเปลี่ยนชนิดของ peroxide โดยเปลี่ยนจาก DB เป็น DCP เติมในปริมาณที่เท่ากัน ในการทดลองดำเนินการจากการผสมพอลิเมอร์และ reactive agent ในบีกเกอร์และคลุกให้เข้ากัน จากนั้นทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) ที่อุณหภูมิ 180 °C ความเร็วรอบในการผสม 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที โดยมีการติดตามค่าแรงบิดระหว่างการผสม หลังจากนั้นนำพอลิเมอร์ที่ได้ไปบดด้วยเครื่องบด (grinder) ซึ่งก่อนการผสมนำพอลิเมอร์ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 °C ชั่วครู่ จากนั้นทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding) ที่อุณหภูมิ 190 °C โดยควบคุมความหนาฟิล์มพอลิเมอร์ให้มีความหนา 100  $\mu\text{m}$  ก่อนนำไปทดสอบอื่น ๆ ในขั้นต่อไป

**ตารางที่ 3.1** สัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PBAT

reaction	Sample	PBS (wt%)	PBSA (wt%)	PBAT (wt%)	DB (phr)	ECE (phr)
Non-reactive	PBS/PBAT 80/20	80	-	20	-	-
	PBSA/PBAT 80/20	-	80	20	-	-
Free radical	PBS/PBAT 80/20 DB0.02	80	-	20	0.02	-
	PBSA/PBAT 80/20 DB0.02	-	80	20	0.02	-

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) สัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PBAT

reaction	Sample	PBS (wt%)	PBSA (wt%)	PBAT (wt%)	DB (phr)	ECE (phr)
Condensation	PBS/PBAT 80/20 ECE0.1	80	-	20	-	0.1
	PBSA/PBAT 80/20 ECE0.1	-	80	20	-	0.1
Free radical + Condensation	PBS/PBAT 80/20 DB0.02 ECE0.1	80	-	20	0.02	0.1
	PBSA/PBAT 80/20 DB0.02 ECE0.1	-	80	20	0.02	0.1

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PHBV

reaction	Sample	PBS (wt%)	PBSA (wt%)	PHBV (wt%)	DB (phr)	ECE (phr)	DCP (phr)
Non-reactive	PBS/PHBV 80/20	80	-	20	-	-	-
	PBSA/PHBV 80/20	-	80	20	-	-	-
Free radical	PBS/PHBV 80/20 DB0.02	80	-	20	0.02	-	-
	PBSA/PHBV 80/20 DB0.02	-	80	20	0.02	-	-
	PBS/PHBV 80/20 DCP0.02	80	-	20	-	-	0.02
	PBSA/PHBV 80/20 DCP0.02	-	80	20	-	-	0.02
Condensation	PBS/PHBV 80/20 ECE0.1	80	-	20	-	0.1	-
	PBSA/PHBV 80/20 ECE0.1	-	80	20	-	0.1	-

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) สัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PHBV

reaction	Sample	PBS (wt%)	PBSA (wt%)	PHBV (wt%)	DB (phr)	ECE (phr)	DCP (phr)
Free radical + Condensation	PBS/PHBV 80/20 DB0.02 ECE0.1	80	-	20	0.02	0.1	-
	PBSA/PHBV 80/20 DB0.02 ECE0.1	-	80	20	0.02	0.1	-
	PBS/PHBV 80/20 DCP0.02 ECE0.1	80	-	20	-	0.1	0.02
	PBSA/PHBV 80/20 DCP0.02 ECE0.1	-	80	20	-	0.1	0.02

### 3.4.2 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder)

หลังจากการศึกษสมบัติของการเบลนด์ด้วยเครื่องผสมแบบปิด และขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน จึงเลือกบางสูตรที่คาดว่าจะไม่เกิดปัญหาในการเบลนด์แบบต่อเนื่องในเครื่อง twin-screw extruder โดยจะเลือกสูตรที่ไม่เกิดการ crosslinking จากผลของค่าแรงบิดในระหว่างการผสมในการทดลองระดับ lab scale ซึ่งจะเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์จาก PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PBAT หรือ PHBV ที่อัตราส่วน 80:20 โดยการเบลนด์ในระบบ reactive blend เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ ซึ่งก่อนทำการอบไล่ความชื้นพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 60 °C ซ้ำมคิน หลังจากนั้นทำการเบลนด์เพื่อให้ได้เม็ดคอมพาวด์ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin-screw extruder) อุณหภูมิในการผสม 90 - 170 °C และความเร็วรอบสกรู 250 รอบต่อนาที โดยสัดส่วนการผสมแสดงดังตารางที่ 3.3 ทำการอบไล่ความชื้นอุณหภูมิ 60 °C ซ้ำมคินก่อนทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder) อุณหภูมิการขึ้นรูป 100, 165, 170, 185 °C, ความเร็วรอบสกรู 95 รอบต่อนาที, อุณหภูมิลูกกลิ้งหล่อเย็น 20 °C, ความเร็วของลูกกลิ้งหล่อเย็น (chill roll speed) 3 m/min และความเร็วของลูกกลิ้งในการดึงฟิล์ม (nip roll speed) 2.5 m/min โดยควบคุมความหนาฟิล์มพอลิเมอร์ให้มีความหนา 100  $\mu\text{m}$  ก่อนนำไปทดสอบอื่น ๆ ในขั้นต่อไป

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนของสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ของ PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PBAT หรือ PHBV ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder)

Sample	PBS (wt%)	PBSA (wt%)	PBAT (wt%)	PHBV (wt%)	DB (phr)	ECE (phr)	DCP (phr)
PBS/PBAT 80/20 ECE0.1	80	-	20	-	-	0.1	-
PBSA/PBAT 80/20 ECE0.1	-	80	20	-	-	0.1	-
PBS/PHBV 80/20 DB0.02 ECE0.1	80	-	-	20	0.02	0.1	-
PBS/PHBV 80/20 DCP0.02 ECE0.1	80	-	-	20	-	0.1	0.02
PBSA/PHBV 80/20 DB0.02 ECE0.1	-	80	-	20	0.02	0.1	-
PBSA/PHBV 80/20 DCP0.02 ECE0.1	-	80	-	20	-	0.1	0.02

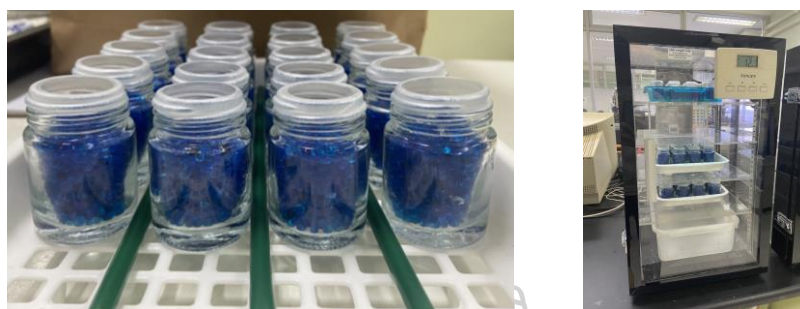
### 3.4.3 การทดสอบอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) และไอน้ำ (WVTR)



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน (Oxygen transmission rate, OTR)

สมบัติอัตราการซึมผ่านของออกซิเจน (Oxygen transmission rate, OTR) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3985 โดยนำฟิล์มตัวอย่างกำหนดความหนา 100  $\mu\text{m}$  ติดกับแผ่นทดสอบอลูมิเนียมพอยล์ที่มีพื้นที่ในการทดสอบคงที่ 5.064  $\text{cm}^2$  ก่อนการทดสอบปั๊มดูดอากาศออกให้เป็นสุญญากาศทั้งด้านบนฟิล์มทดสอบและด้านล่างฟิล์มทดสอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำทดสอบโดยปล่อยก๊าซออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ให้มีความดัน 1 บรรยากาศด้วยอัตรา 50  $\text{cc}/\text{min}$  ที่บริเวณ

ด้านบนของฟิล์มทดสอบและเครื่องทดสอบจะวัดความดันทั้ง 2 ด้านของฟิล์มทดสอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิที่ 23 °C และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ 50 %RH ซึ่งค่า OTR ที่ได้จะแสดงในหน่วย  $\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$



รูปที่ 3.9 การทดสอบอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR)

สมบัติอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate, WVTR) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E96 โดยวิธี Cup method ฟิล์มตัวอย่างกำหนดความหนา 100  $\mu\text{m}$  ใช้ขวดแก้วยาหม่องขนาด 20 g (เส้นผ่านศูนย์กลางภายในขวดแก้วซึ่งเป็นพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความชื้น 2.4 เซนติเมตร) บรรจุซิลิกาเจลทำหน้าที่เป็นสารดูดความชื้นปิดผนึกรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแก้วด้วย High vacuum grease และพาราฟินฟิล์ม นำชิ้นงานใส่ตู้จำลองสภาพอากาศที่มีสารละลายอิ่มตัว โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ให้มีความชื้นสัมพัทธ์ 75 %RH ควบคุมอุณหภูมิ 23 °C แล้วชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ 24 ชั่วโมงเป็นเวลา 240 ชั่วโมง โดยทำการทดสอบสุทธละ 5 sample ค่า WVTR คำนวณจากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นกับเวลาที่ทดสอบ ซึ่งค่า WVTR ที่ได้แสดงในหน่วย  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$

#### 3.4.4 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์

ลักษณะสัณฐานวิทยา (morphology) โดยนำชิ้นงานสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular shape) ของพอลิเมอร์เบลนด์ทั้งที่เติมและไม่เติม reactive agent ไปแช่ในไนโตรเจนเหลวจนแข็งตัว จากนั้นหักอย่างรวดเร็วให้เกิดการแตกหัก (cryo-fracture) แล้วเคลือบด้วยแพลทตินัม-ทองบริเวณส่วนที่แตกหักด้วยกระบวนการ sputtering ก่อนนำไปศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

### 3.4.5 การศึกษาสมบัติเชิงกล

การศึกษาสมบัติเชิงกล (tensile properties) ด้วย universal testing machine สำหรับชิ้นงานที่ได้หลังจากการผสมแบบปิด (internal mixer) และขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-638 type V โดยชิ้นงานจะมีลักษณะดัมเบล ความเร็วในการดึงชิ้นงาน 10 mm/min โดยขนาด load cell 1 kN และสำหรับฟิล์มที่ได้หลังจากการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extrusion) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-882 โดยเตรียมชิ้นงานฟิล์มให้มีความยาว 177.8 mm กว้าง 25.4 mm โดยความยาวเกจ (gauge length) 127 mm ระยะการจับชิ้นงานด้านละ 25.4 mm ความเร็วในการดึงชิ้นงาน 12.5 mm/min โดยขนาด load cell 500 N



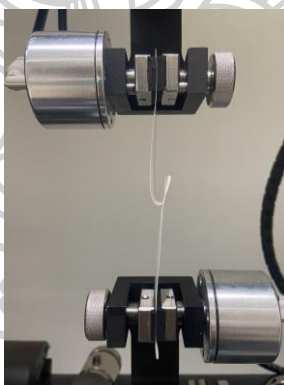
รูปที่ 3.10 เครื่อง universal testing machine

### 3.4.6 การทดสอบความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อน (peel strength test)



รูปที่ 3.11 เครื่องซีลปิดปากถุงแบบสายพานต่อเนื่อง

กระบวนการปิดผนึก หรือ ซีล ด้วยความร้อนของฟิล์มขึ้นงานกับตัวอย่างภาตบรรจุภัณฑ์ โดยเตรียมทั้งฟิล์มขึ้นงานกับภาตมีความยาว 3.5 นิ้ว กว้าง 1 นิ้ว โดยตัวอย่างภาตบรรจุภัณฑ์เตรียมจากพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PBS/PLA/PBAT (35/30/35) มีความหนา 800  $\mu\text{m}$  ซึ่งเป็นการเลียนแบบขอบภาตบรรจุภัณฑ์ (Tray) ทำการปิดผนึกด้วยความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ ใช้เวลาในการซีล 8 วินาที (18 rpm) มีความกว้างรอยซีล 1 cm ด้วยเครื่องซีลปิดปากถุงแบบสายพานต่อเนื่อง



รูปที่ 3.12 การทดสอบความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อน (Peel strength test)

ความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อน (Peel strength test) โดยนำฟิล์มที่ได้จากการซีลมาทดสอบด้วย universal testing machine ตามมาตรฐาน ASTM F88 (Technique C) มุมในการลอก  $180^\circ$  ระยะห่างระหว่างที่จับ 101.6 mm ระยะการจับขึ้นงานด้านละ 25.4 mm อัตราการลอกขึ้นงาน 200 mm/min โดยขนาด load cell 500 N



## บทที่ 4

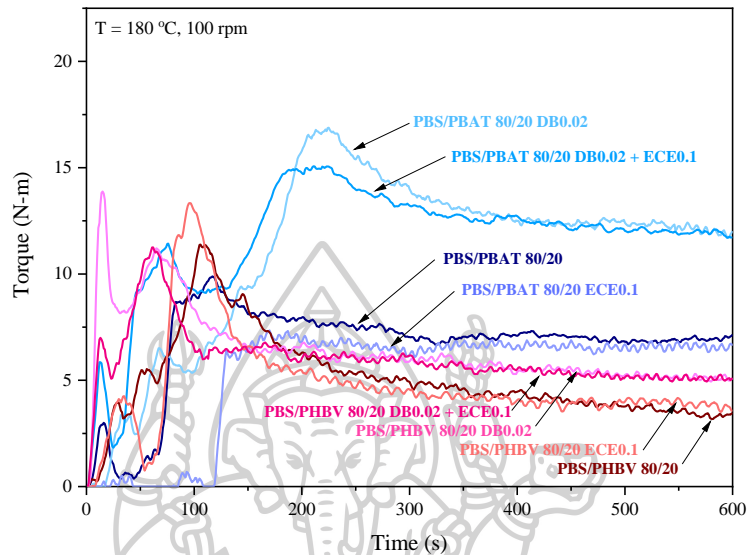
### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติการซึมผ่านของก๊าซ สมบัติเชิงกล และความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อน (peel strength test) ของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในอัตราส่วน 80/20 ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend ซึ่งการเบลนด์ในระบบ reactive ผ่าน 3 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยา free radical, ปฏิกิริยา condensation และปฏิกิริยารวมกันของปฏิกิริยา free radical กับปฏิกิริยา condensation โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน โดยในตอนแรกเป็นการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ในระดับ lab scale ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding) ส่วนในตอนที่สองเป็นการผสมพอลิเมอร์เบลนด์ในระดับกึ่งอุตสาหกรรมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder)

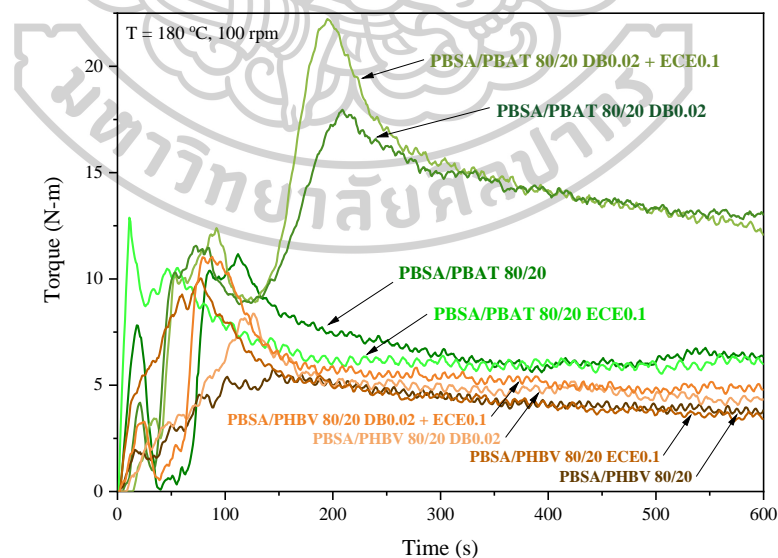
#### 4.1 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding)

ในส่วนแรกของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และไอน้ำ สมบัติเชิงกล และ peel strength test ของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ที่อัตราส่วน 80:20 ผ่านปฏิกิริยา free radical โดยจะเติม DB ในปริมาณ 0.02 phr และปฏิกิริยา condensation โดยเติม ECE ในปริมาณ 0.1 phr และปฏิกิริยารวมกันของปฏิกิริยา free radical กับปฏิกิริยา condensation โดยเติม DB 0.02 phr + ECE 0.1 phr ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding) โดยควบคุมให้มีความหนา 100  $\mu\text{m}$

4.1.1 ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างการผสม และดัชนีการไหลโดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend



รูปที่ 4.1 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมของ PBS/PBAT 80/20 blend และ PBS/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend

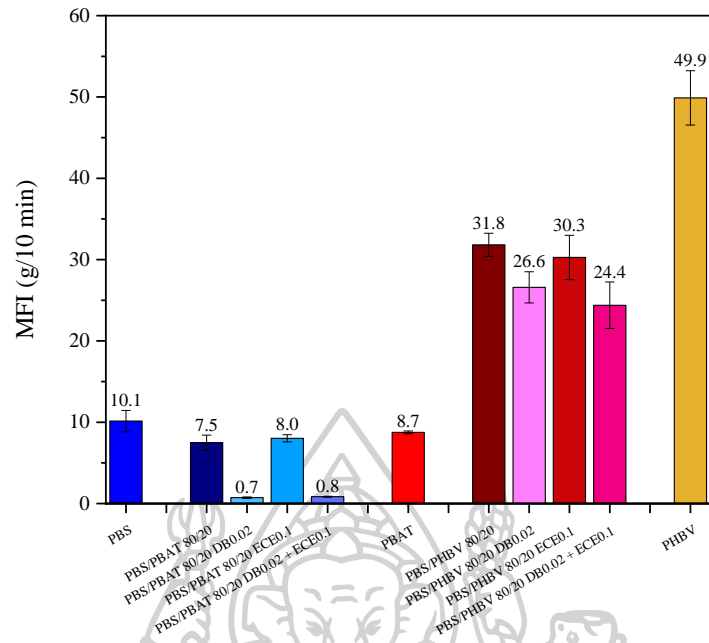


รูปที่ 4.2 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมของ PBSA/PBAT 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend

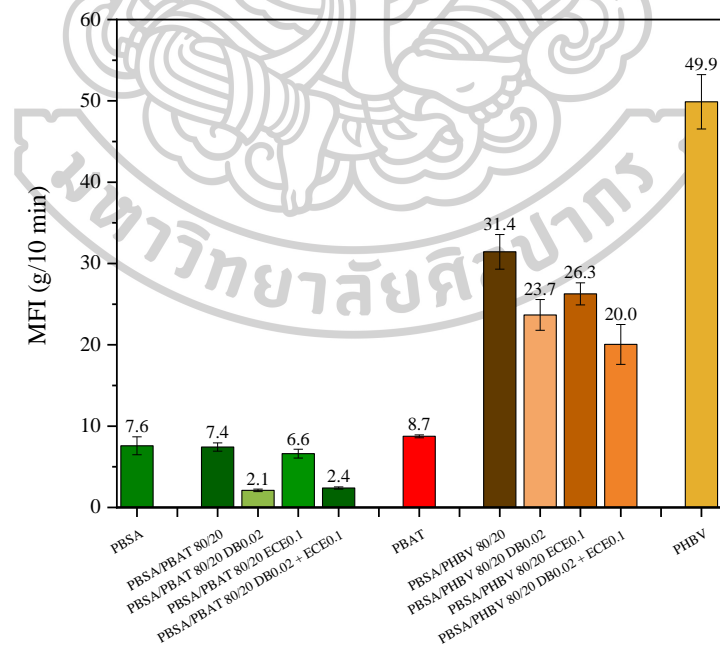
การติดตามค่าแรงบิดระหว่างการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) ที่อุณหภูมิ 180 °C ความเร็วรอบในการผสม 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากรูปที่ 4.1 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมที่มี PBS เป็นองค์ประกอบหลักที่มีการเบลนด์กับ PBAT เป็นเฟสรองจะมีค่าแรงบิดที่สูงกว่าการเบลนด์กับ PHBV เป็นเฟสรอง เนื่องจากความหนืดของ PHBV ที่น้อยมาก และ PHBV สามารถเกิดการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอม [5] เมื่อพิจารณาการเบลนด์ PBS/PBAT 80/20 พบว่าการเบลนด์ที่มีการเติม DB 0.02 phr ค่าแรงบิดในช่วง 10 นาทีเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการเบลนด์แบบ non-reactive อย่างชัดเจน และการเบลนด์ที่มีการเติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr ค่าแรงบิดใกล้เคียงกับการเบลนด์ที่เติม DB 0.02 phr และลักษณะของกราฟที่มีการเติม DB 0.02 phr และ DB 0.02 + ECE 0.1 phr มีลักษณะกราฟแรงบิดคล้ายกับการ crosslink ของยาง สำหรับการเติม ECE 0.1 phr ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงบิดระหว่างการผสม

เมื่อพิจารณา PBS/PHBV 80/20 พบว่าการเบลนด์ที่มีการเติม DB 0.02 phr และ DB 0.02 + ECE 0.1 phr ส่งผลให้ค่าแรงบิดระหว่างการผสมมีค่าสูงขึ้นมากกว่าการเบลนด์แบบ non-reactive แต่ลักษณะกราฟแรงบิดไม่พบลักษณะ crosslink คล้ายยาง สำหรับการเบลนด์ที่มีการเติม ECE 0.1 phr ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงบิดระหว่างการผสม และจากรูปที่ 4.2 การเบลนด์โดยมี PBSA เป็นองค์ประกอบหลักก็ให้ผลที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการเบลนด์โดยมี PBS เป็นองค์ประกอบหลัก โดย PBSA ที่เบลนด์กับ PBAT เป็นเฟสรองจะแสดงค่าแรงบิดระหว่างการผสมสูงกว่าการเบลนด์ที่มี PHBV เป็นเฟสรอง และเมื่อการเบลนด์ในระบบ reactive ที่มีการเติม DB 0.02 phr และ DB 0.02 + ECE 0.1 phr ค่าแรงบิดระหว่างการผสมมีค่าสูงขึ้นมากกว่าการเบลนด์ในระบบ non-reactive และการเติม ECE 0.1 phr

การเบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PBAT หรือ PHBV เป็นเฟสรองและเติม DB 0.02 phr แสดงให้เห็นค่าแรงบิดระหว่างการผสมเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับการเบลนด์ในระบบ non-reactive และการเติม ECE 0.1 phr แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาหลังจากที่เติม DB ผ่านปฏิกิริยา free radical ซึ่งมีความ active มากกว่าการเติม ECE ผ่านปฏิกิริยา condensation แต่การที่เบลนด์กับ PHBV ไม่พบลักษณะกราฟแรงบิดที่เกิดการ crosslink คล้ายยาง เนื่องจากเกิดการแข่งขันกันระหว่างการเกิดการเชื่อมขวางและการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งในการเกิดการเชื่อมขวางไม่ได้เกิดการเชื่อมขวางทั้งหมดจนพอลิเมอร์เบลนด์ได้รับความร้อนแล้วไหลไม่ได้แต่เป็น dynamic crosslink ซึ่งจะเกิดการ crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์บางส่วน (partially crosslinked) กระจายอยู่ในส่วนที่ไหลได้ ซึ่งหลังจากที่มีการเติม reactive agent เป็นการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์เบลนด์ส่งผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์มีความหนืดที่สูงขึ้น

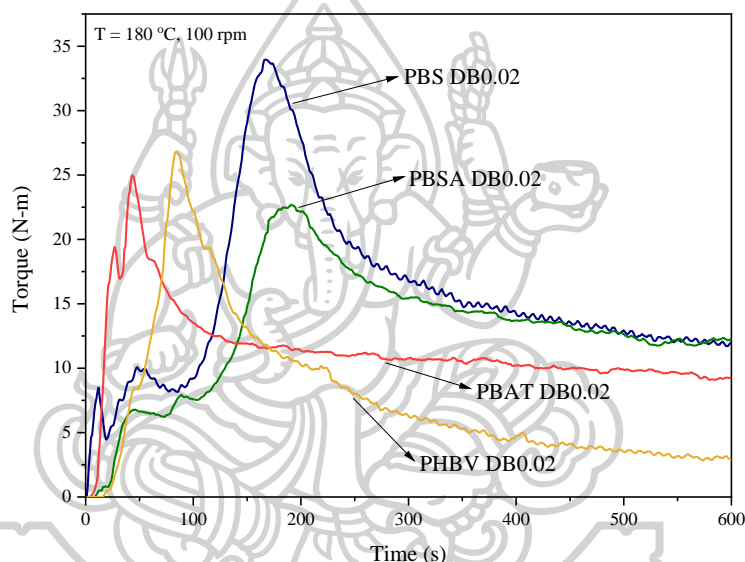


รูปที่ 4.3 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ของ PBS/PBAT 80/20 blend และ PBS/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend



รูปที่ 4.4 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ของ PBSA/PBAT 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend

จากรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์โดยพบว่า พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีการเติม reactive agent จะมีความหนืดที่สูงขึ้นโดยพิจารณาจากค่าดัชนีการไหลที่มีค่าลดลง และเมื่อพิจารณา พอลิเมอร์เบลนด์ที่เบลนด์กับ PBAT โดยเติม DB0.02 phr และ DB 0.02 + ECE 0.1 phr จะมีค่าดัชนีการไหลที่ลดลงมากสอดคล้องกับกราฟค่าแรงบิดซึ่งเป็นผลจากการเกิดการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้น สำหรับการเบลนด์กับ PHBV โดยที่เติม DB0.02 phr และ DB 0.02 + ECE 0.1 phr จะพบว่า มีค่าดัชนีการไหลลดลงเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับกราฟค่าแรงบิดที่สูงขึ้นแต่กราฟแรงบิดไม่เกิดลักษณะการ crosslink คล้ายๆ โดยการเติม ECE 0.1 phr ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิดซึ่งสอดคล้องกับดัชนีการไหลที่ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับกับการเบลนด์แบบ non-reactive

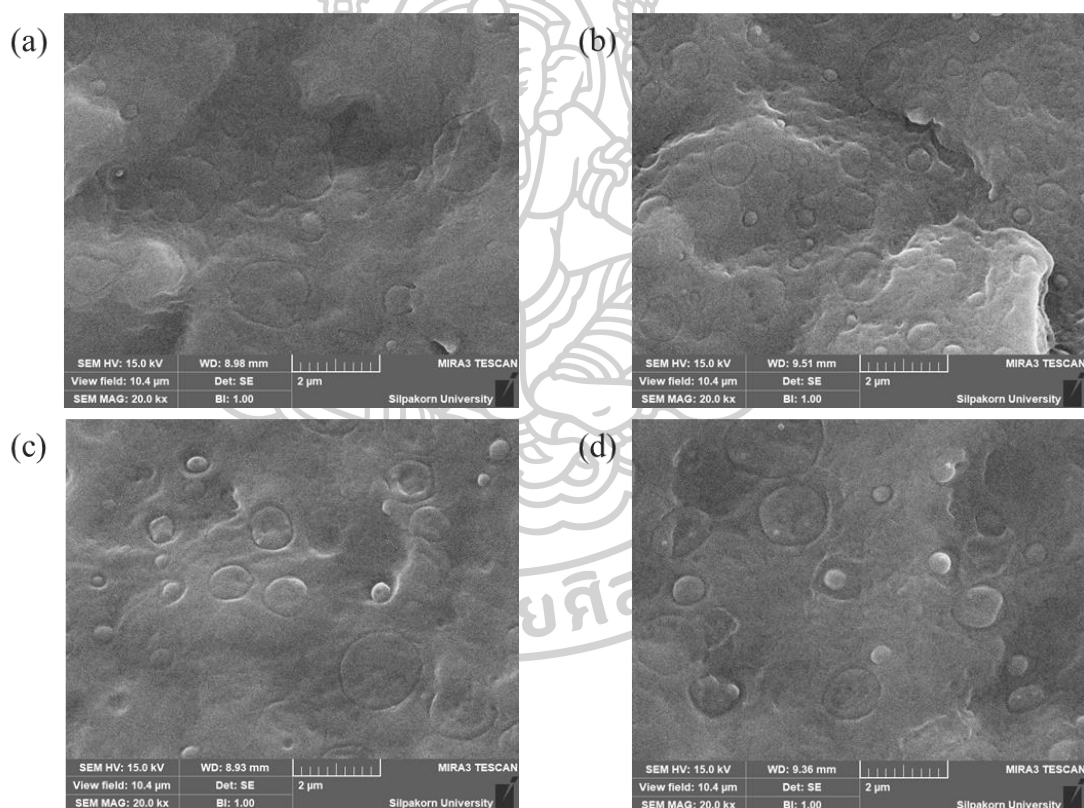


รูปที่ 4.5 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมของ PBS DB 0.02 phr, PBSA DB 0.02 phr, PBAT DB 0.02 phr และ PHBV DB 0.02 phr

การยืนยันถึงการเชื่อมขวางในสายโซ่พอลิเมอร์ และความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของ reactive agent กับพอลิเมอร์ จึงทำการเบลนด์ PBS, PBSA, PBAT และ PHBV กับ reactive agent ดังรูปที่ 4.5 พบว่า PBS และ PBSA มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับ DB มากกว่า PBAT และ PHBV โดยสังเกตหลังจากที่เติม DB 0.02 phr ลักษณะของกราฟแรงบิดกับเวลาในช่วง 10 นาที มีลักษณะการ crosslink คล้ายๆ ซึ่งจากลักษณะของกราฟแสดงให้เห็นถึงการเกิดการเชื่อมขวางของพอลิเมอร์ โดย DB หรือ Di(tert-butylperoxyisopropyl) benzene ทำหน้าที่เป็น free radical initiator จะเกิดการเชื่อมขวางผ่านปฏิกิริยา free radical ซึ่งระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางของ macro free radical สำหรับ ECE หรือ Multifunctional epoxy chain extender ประกอบไปด้วยหมู่ epoxide ซึ่งมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา condensation

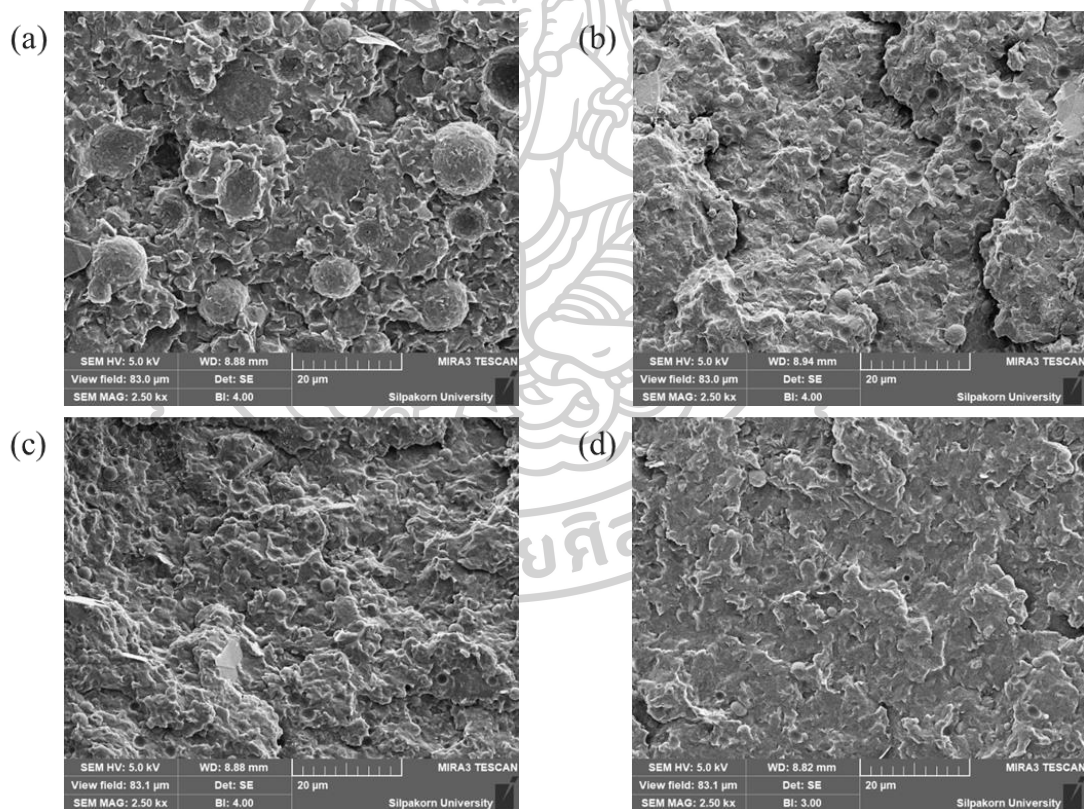
กับหมู่ carboxylic ของพอลิเมอร์ [5] เมื่อพิจารณาลักษณะการ crosslink คล้ายๆของ PBS และ PBSA ที่มีการเติม DB 0.02 phr แสดงลักษณะเช่นเดียวกับการเบลนด์ของ PBS/PBAT และ PBSA/PBAT ที่มีการเติม DB 0.02 phr โดยเป็นผลจากพอลิเมอร์เฟสหลักที่ว่องไวกับ DB ที่มีปริมาณมากทำให้เกิดการเชื่อมขวางในสายโซ่พอลิเมอร์ สำหรับ PHBV ที่มีการเติม DB 0.02 phr พบว่าค่าแรงบิตระหว่างการผลิตมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดแสดงถึงเกิดการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนมากกว่า การเกิดการเชื่อมขวาง และยืนยันได้ว่า PHBV เมื่อได้รับความร้อนเกิดการสลายตัวขึ้น

#### 4.1.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาหลังจากการเบลนด์ของ PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend



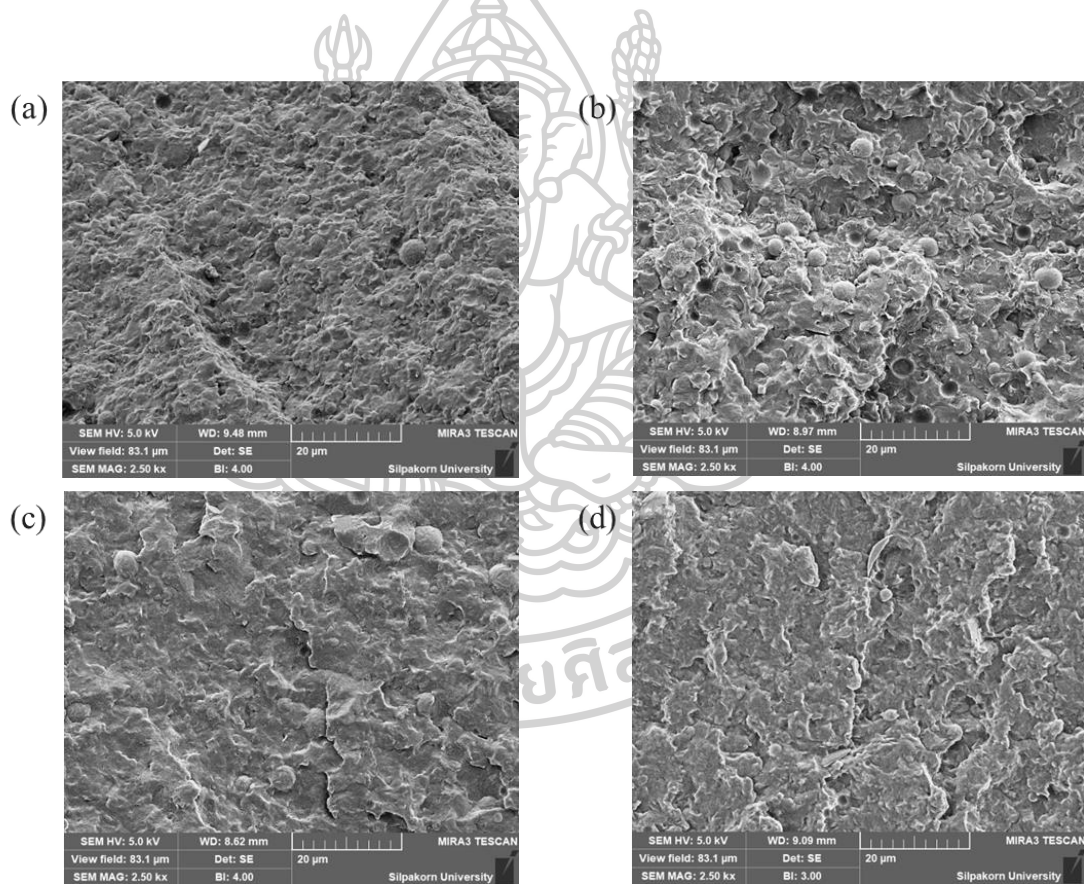
รูปที่ 4.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (a) PBS/PBAT 80/20, (b) PBS/PBAT 80/20 ECE 0.1 phr, (c) PBSA/PBAT 80/20 และ (d) PBSA/PBAT 80/20 ECE 0.1 phr ที่หักในไนโตรเจนเหลว ตามลำดับ

ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์บริเวณผิวการหักชิ้นงานในไนโตรเจนเหลว หลังจากการเบลนด์และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยความร้อน โดยแสดงภาพที่กำลังขยาย 20,000 เท่า แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของสูตรที่ไม่เกิดการ crosslink เนื่องจากยังสามารถขึ้นรูปได้ เมื่อพิจารณาการเบลนด์ PBS/PBAT 80/20 พบว่า PBS/PBAT 80/20 มีลักษณะสัณฐานวิทยาแบบอนุภาคกลมของเฟสรองกระจายอยู่ในเฟสหลัก ขนาดอนุภาคประมาณ 0.5 – 1.8  $\mu\text{m}$  และการเบลนด์ PBS/PBAT 80/20 ที่มีการเติม ECE 0.1 phr พบว่ามีอนุภาคกลมมากขึ้น ขนาดอนุภาคเล็กลงซึ่งขนาดอนุภาคลดลงเหลือประมาณ 0.1 – 0.8  $\mu\text{m}$  สำหรับลักษณะสัณฐานวิทยาของ PBSA/PBAT 80/20 ก็มีลักษณะสัณฐานวิทยาเช่นเดียวกับการที่มี PBS เป็นองค์ประกอบหลัก โดยการเบลนด์ที่เติม ECE 0.1 phr เพียงพอที่จะสามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ที่ยั่งยืนจากอนุภาคของเฟสกระจายที่เล็กลง



รูปที่ 4.7 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (a) PBS/PHBV 80/20, (b) PBS/PHBV 80/20 DB 0.02 phr, (c) PBS/PHBV 80/20 ECE 0.1 phr และ (d) PBS/PHBV 80/20 DB 0.02 + ECE 0.1 phr ที่หักในไนโตรเจนเหลว ตามลำดับ

ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์บริเวณผิวการหักชิ้นงานในไนโตรเจนเหลว หลังจากการเบลนด์และขึ้นรูปชิ้นงานด้วยความร้อน โดยแสดงภาพที่กำลังขยาย 2,500 เท่า แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของ PBS/PHBV 80/20 ทั้งที่เติมและไม่เติม reactive agent มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระแตกต่างการเบลนด์กับ PBAT เป็นผลจาก PHBV ที่เติมลงไปแสดงถึงความเข้ากันได้ยากของ PBS และ PHBV โดยพบว่าการเบลนด์ในระบบ non-reactive จะพบอนุภาคกลมของเฟสรองกระจายอยู่ในเฟสหลัก โดยอนุภาคกลมมีขนาดประมาณ 5 - 10  $\mu\text{m}$  หลังจากการเบลนด์ในระบบ reactive ที่มีการเติม DB 0.02 phr, ECE 0.1 phr และ DB 0.02 phr + ECE 0.1 phr พบว่าอนุภาคกลมของเฟสรองเพิ่มมากขึ้นขนาดอนุภาคเล็กลง โดยมีขนาดอนุภาค 2 - 4  $\mu\text{m}$  แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุง interfacial adhesion ระหว่างผิวที่ติดขึ้นของทั้งเฟสหลักและเฟสกระจาย



**รูปที่ 4.8** ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (a) PBSA/PHBV 80/20, (b) PBSA/PHBV 80/20 DB 0.02 phr, (c) PBSA/PHBV 80/20 ECE 0.1 phr และ (d) PBSA/PHBV 80/20 DB 0.02 + ECE 0.1 phr ที่หักในไนโตรเจนเหลว ตามลำดับ

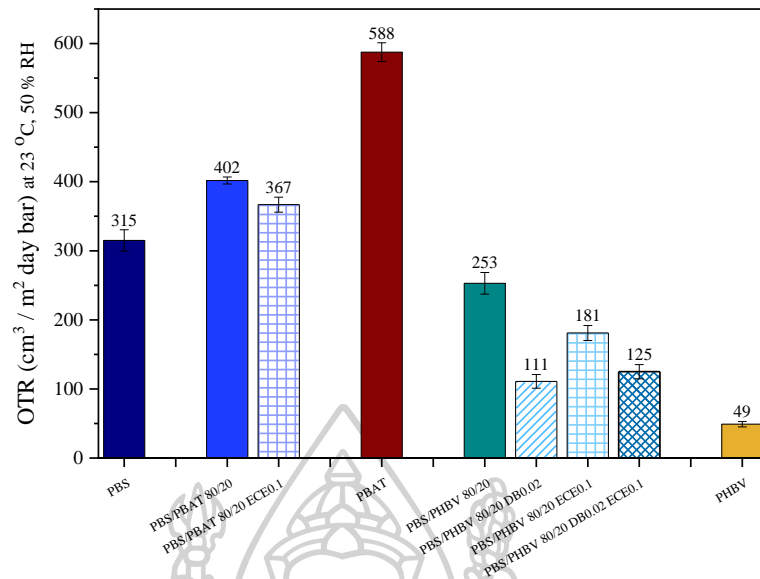


ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์บริเวณผิวการหักชิ้นงานในไนโตรเจนเหลว หลังจากการเบลนด์และขึ้นรูปด้วยความร้อน โดยแสดงภาพที่กำลังขยาย 2,500 เท่า แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาของ PBSA/PHBV 80/20 ที่ไม่เติม reactive agent มี droplet ที่มีขนาดเล็กกระจาย ใน matrix แสดงถึงความเข้ากันได้ของ PBSA กับ PHBV ที่มีความเข้ากันได้ดีกว่า PBS กับ PHBV ที่ยังไม่เติม reactive agent เมื่อทำการเบลนด์ในระบบ reactive พบว่าอนุภาคกลมของเฟสรองไม่ได้เปลี่ยนแปลง แต่มีการปรับปรุง interfacial adhesion ระหว่างผิวที่ดีขึ้นของทั้งเฟสหลักและเฟสกระจาย สำหรับในกรณีของ PBSA/PHBV 80/20 DB 0.02 phr พบว่า interfacial adhesion ระหว่างผิวแย่งอาจเป็นผลมาจาก matrix เกิดการเชื่อมขวางจากการเติม peroxide และ matrix มีความว่องไวกับ peroxide

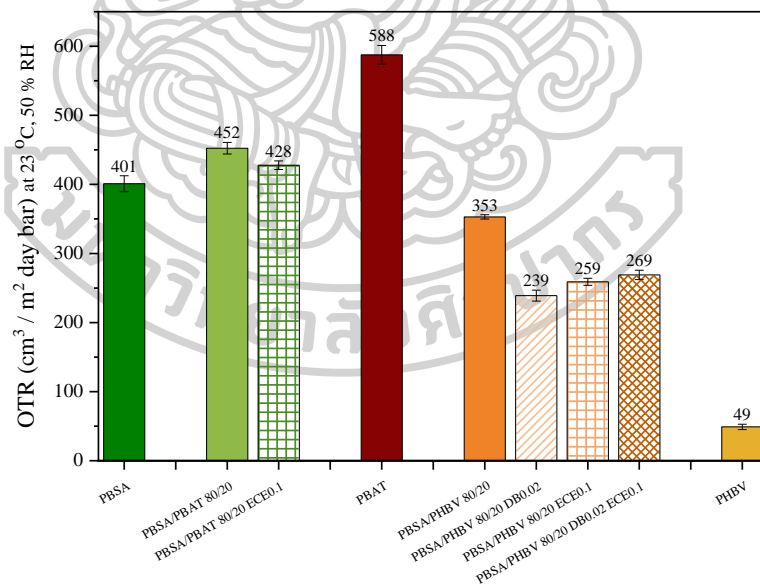
#### 4.1.3 ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของ PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend

การศึกษาการซึมผ่านซึ่งจะทำการขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้หลังจากการเบลนด์ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) ด้วยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding) โดยควบคุมความหนาฟิล์มให้มีความหนา 100  $\mu\text{m}$  โดยปกติค่าที่ส่งผลถึงการเพิ่มขึ้น หรือลดลงของสมบัติการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำผ่านฟิล์ม มักจะกล่าวถึงส่วนของการละลาย (solubility) กับส่วนของการแพร่ (diffusion) ซึ่งในผลการทดลองเป็นการแสดงถึงทั้ง 2 ส่วนโดยวัดปริมาณก๊าซออกซิเจนและไอน้ำที่ละลายเข้าไปในเนื้อฟิล์ม แพร่ผ่านฟิล์ม ละลายออกไปอีกฝั่งของฟิล์ม นั่นคือค่า Oxygen transmission rate (OTR) และค่า Water vapor transmission rate (WVTR)

##### 4.1.3.1 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen transmission rate ; OTR) ของ PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend



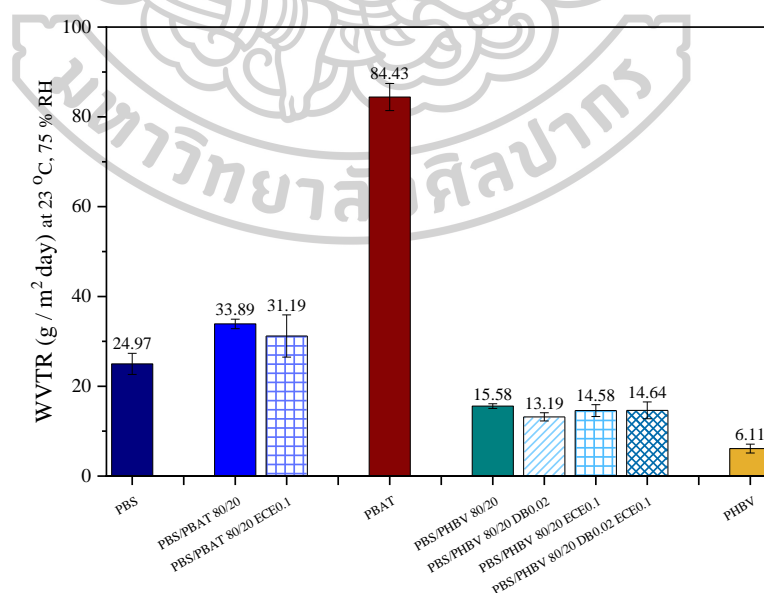
รูปที่ 4.9 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) ของ PBS/PBAT 80/20 blend และ PBS/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend



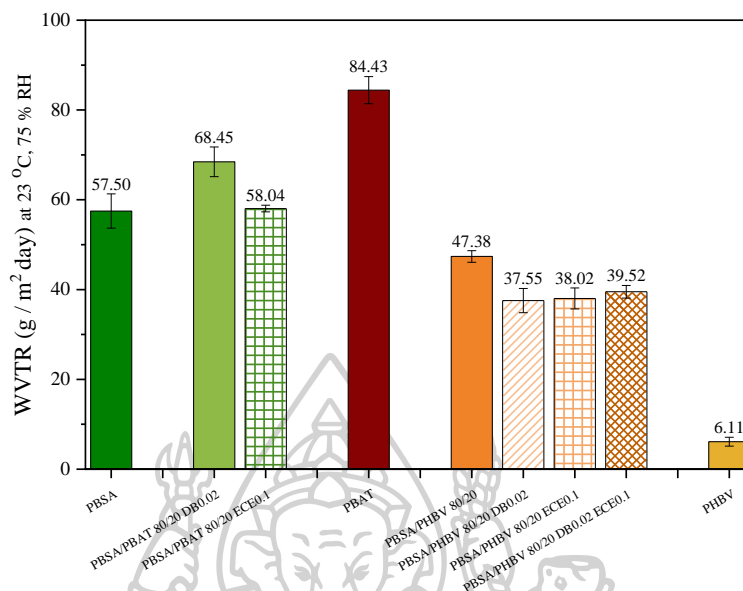
รูปที่ 4.10 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) ของ PBSA/PBAT 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend

จากรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 แสดงอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน หรือ OTR ของ PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักตามลำดับที่เบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend ซึ่ง PBS จะมีค่า OTR น้อยกว่า PBSA สำหรับ PBAT จะมีค่า OTR สูงที่สุด ส่วน PHBV จะมีค่า OTR ที่ต่ำที่สุด เมื่อพิจารณาการเบลนด์ของ PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PBAT พบว่าการเบลนด์ในระบบ non-reactive ค่า OTR ของ PBS/PBAT 80/20 มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PBS เช่นเดียวกันกับ PBSA/PBAT 80/20 ค่า OTR มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ PBSA เนื่องจาก PBAT เป็นพอลิเมอร์ที่มีอัตราการซึมผ่านที่สูงกว่าทั้ง PBS และ PBSA และเมื่อพิจารณา PBS/PBAT และ PBSA/PBAT ที่มีการเติม ECE 0.1 phr พบว่าค่า OTR มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการเบลนด์แบบ non-reactive แต่ก็มีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ในเฟสหลัก เมื่อพิจารณาการเบลนด์ของ PBS และ PBSA ที่เบลนด์กับ PHBV ที่เป็นเฟสรองจะพบว่าการเบลนด์ในระบบ non-reactive ค่า OTR ลดลงน้อยกว่าฟิล์มพอลิเมอร์เฟสหลัก และเมื่อมีการเบลนด์ที่มีการเติม reactive agent พบว่า ค่า OTR มีแนวโน้มลดลงมากกว่าการเบลนด์ในระบบ non-reactive แต่ชนิดของ reactive agent ไม่ได้ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านของออกซิเจนอย่างชัดเจน

**4.1.3.2 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate ; WVTR) ของ PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend**



**รูปที่ 4.11** อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของ PBS/PBAT 80/20 blend และ PBS/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend



รูปที่ 4.12 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของ PBSA/PBAT 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend

จากรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 แสดงอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ หรือ WVTR ของ PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend แสดงให้เห็นถึงค่า WVTR ของ PBS ที่น้อยกว่า PBSA ส่วน PBAT นั้นมีค่า WVTR ที่สูงที่สุด สำหรับ PHBV นั้นมีค่า WVTR ที่ต่ำที่สุด และเมื่อพิจารณาการเบลนด์ โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักที่เบลนด์กับ PBAT ที่เป็นเฟสรองพบว่าค่า WVTR ในการเบลนด์แบบ non-reactive ค่า WVTR มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์เฟสหลัก เนื่องจาก PBAT เป็นพอลิเมอร์ที่มีอัตราการซึมผ่านที่สูงกว่าทั้ง PBS และ PBSA และเมื่อ PBS/PBAT และ PBSA/PBAT ที่เติม ECE 0.1 phr ส่งผลให้ค่า WVTR มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับการเบลนด์แบบ non-reactive ซึ่งใกล้เคียงกับค่า WVTR ของพอลิเมอร์ในเฟสหลัก และเมื่อพิจารณาการเบลนด์ของ PBS และ PBSA ที่เป็นเฟสหลักกับ PHBV เป็นเฟสรองจะพบว่าค่า WVTR ในระบบ non-reactive ค่า WVTR ลดลงน้อยกว่าฟิล์มพอลิเมอร์เฟสหลัก และเมื่อมีการเบลนด์ที่มีการเติม reactive agent พบว่า ค่า WVTR มีแนวโน้มลดลงมากกว่าการเบลนด์ในระบบ non-reactive ซึ่งชนิดของ reactive agent ไม่ได้ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านของไอน้ำอย่างชัดเจน

จากผลการทดลองอัตราการซึมผ่านทั้งของออกซิเจนและไอน้ำ พบว่าการที่ค่า OTR และ WVTR ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงมิได้หลายปัจจัยซึ่งมีความซับซ้อน แต่จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าการที่ค่า OTR และ WVTR ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นผลจากชนิดของพอลิเมอร์ซึ่ง PBAT การซึมผ่านของก๊าซที่สูงกว่าพอลิเมอร์เฟสหลักส่งผลให้แนวโน้มของการซึมผ่านเพิ่มขึ้น ส่วน PHBV มีการซึมผ่านของก๊าซที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์เฟสหลักส่งผลให้แนวโน้มของการซึมผ่านลดลง

หลังจากที่มีการเบลนดีในระบบ reactive จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำ (OTR และ WVTR) มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการเบลนด์แบบ non-reactive เนื่องจากหลังจากการเบลนดีในระบบที่มีการเติม reactive agent มีการปรับปรุง interfacial adhesion ระหว่างผิวของพอลิเมอร์ทั้งสองเฟสที่ดีขึ้น มีความเข้ากันได้มากยิ่งขึ้น และการเติม reactive agent ส่งผลให้เกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นจากดัชนีการไหลที่ลดลง เกิดเป็นโครงสร้างที่มีการเชื่อมขวางทำให้สามารถปรับปรุงการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และไอน้ำได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Qirui Sun และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PLA กับ PPC ในระบบทั้งที่เติมและไม่เติม chain extender พบว่าหลังจากเติม chain extender มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ และ interfacial adhesion ระหว่างสองเฟสมีรูปแบบ PLA-Joncryl-PPC copolymer เมื่อมีการเติม chain extender จะเกิดการเชื่อมขวางเกิดเป็นโครงสร้าง long chain branching และ cross-linking structures สามารถช่วยขัดขวางการแพร่ผ่านของก๊าซได้

#### 4.1.4 ศึกษาสมบัติเชิงกลของ PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend

การศึกษสมบัติเชิงกลหลังจากการเบลนด์ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) และอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนให้เป็นชิ้นงานทดสอบการดึงยึดตามมาตรฐาน ASTM D638 type V จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ทดสอบด้วยเครื่อง universal testing machine ด้วยอัตราเร็ว 10 mm/min ใช้ load cell 10 kN

**ตารางที่ 4.1** สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend

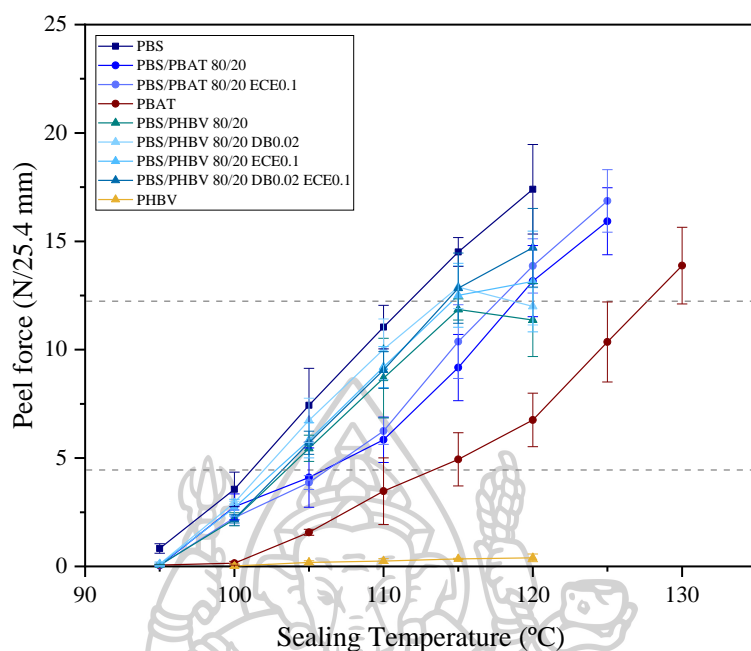
Sample	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile strength at break (MPa)
PBS	325 ± 7.35	234 ± 4.00	35.8 ± 1.85
PBSA	176 ± 9.78	489 ± 77.93	22.8 ± 2.32
PBS/PBAT 80/20	249 ± 12.83	441 ± 81.49	35.8 ± 4.25
PBS/PBAT 80/20 ECE0.1	241 ± 8.68	386 ± 49.52	34.1 ± 2.03
PBSA/PBAT 80/20	112 ± 4.81	549 ± 19.31	21.7 ± 0.81
PBSA/PBAT 80/20 ECE0.1	110 ± 9.43	601 ± 55.02	21.8 ± 0.79
PBAT	44 ± 6.03	1332 ± 117.55	27.3 ± 5.69
PBS/PHBV 80/20	507 ± 49.28	10.2 ± 3.29	27.6 ± 3.28
PBS/PHBV 80/20 DB0.02	582 ± 45.11	12.2 ± 4.00	26.2 ± 3.54
PBS/PHBV 80/20 ECE 0.1	576 ± 48.99	11.3 ± 2.50	29.1 ± 4.45
PBS/PHBV 80/20 DB0.02 + ECE 0.1	582 ± 45.11	12.2 ± 4.00	26.2 ± 3.54
PBSA/PHBV 80/20	258 ± 43.46	11.6 ± 0.45	15.9 ± 1.05
PBSA/PHBV 80/20 DB0.02	308 ± 23.08	12.8 ± 1.06	15.9 ± 1.09
PBSA/PHBV 80/20 ECE 0.1	236 ± 32.83	15.0 ± 3.55	14.2 ± 1.73
PBSA/PHBV 80/20 DB0.02 + ECE 0.1	308 ± 23.08	12.8 ± 1.06	15.9 ± 1.09
PHBV	1476 ± 113.33	6.2 ± 1.60	37.3 ± 0.99

สมบัติเชิงกลของ PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend ดังตารางที่ 4.1 โดยความแตกต่างของ PBS จะมีค่า Young's modulus มากกว่าและมี % Elongation at break ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับ PBSA เมื่อพิจารณาการเบลนด์กับ PBAT โดย PBAT มีความยืดหยุ่นที่สูง โดยหลังจากการเบลนด์กับเฟสรอง PBAT ทั้งในระบบ non-reactive และ reactive blend พบว่าค่า Young's

modulus มีค่าลดลง และค่า Elongation at break มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์เฟสหลัก แต่ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างการเบลนด์ทั้งในระบบที่เติมและไม่เติม reactive agent เมื่อพิจารณาการเบลนด์กับ PHBV ซึ่งมีค่า Young's modulus ที่สูงมากและค่า Elongation at break น้อยมาก ซึ่งหลังจากการเบลนด์กับ PHBV ที่เป็นเฟสรอง ทั้งในระบบ non-reactive และ reactive blend พบว่าค่า Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้นและค่า Elongation at break มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์เฟสหลัก สำหรับค่า Tensile strength at break มีค่าใกล้เคียงกันของพอลิเมอร์เบลนด์ทั้งในระบบที่เติมและไม่เติม reactive agent

#### 4.1.5 การศึกษาความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อนของ PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend

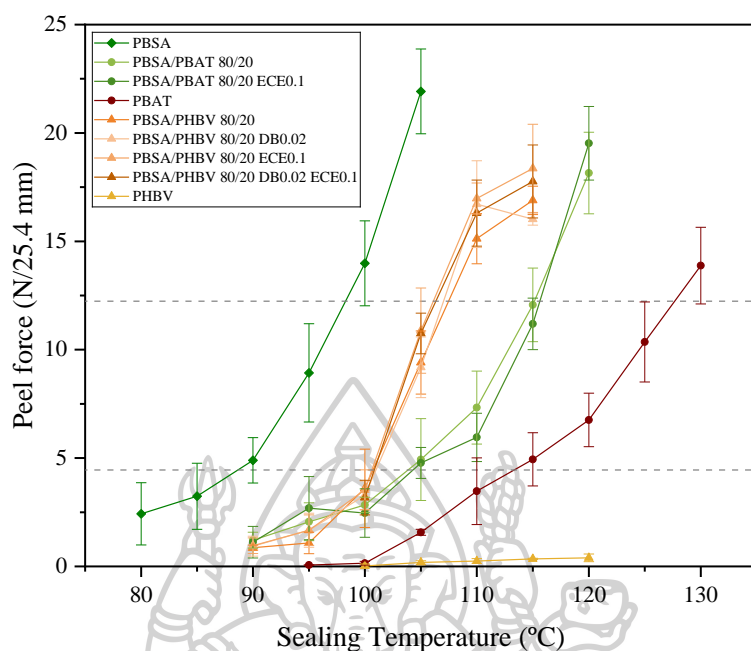
การศึกษาความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อนของฝาปิดกับบรรจุภัณฑ์สามารถซีลแล้วลอกออกได้ง่าย (easy-open peel) โดยนำฟิล์มที่ได้หลังจากการเบลนด์และอัดขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยความร้อนให้มีความหนาของฟิล์มที่ 100  $\mu\text{m}$  หลังจากนั้นทำการซีลด้วยความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ กับถาด PBS blend sheet ที่มีความหนา 800  $\mu\text{m}$  จากนั้นทดสอบความแข็งแรงของการลอก (Peel strength test) โดยนำฟิล์มที่ได้จากการซีลมาทดสอบด้วย universal testing machine ตามมาตรฐาน ASTM F88 (Technique C) มุมในการลอก 180° อัตราการลอกขึ้นงาน 200 mm/min โดยขนาด load cell 500 N ซึ่งแรงเฉลี่ยที่อยู่ในช่วง 4.45 – 12.24 N/25.4 mm เป็นแรงที่สามารถซีลแล้วลอกออกได้ง่าย (easy-open peel) [22]



**รูปที่ 4.13** กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBS/PBAT 80/20 blend และ PBS/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend บน PBS blend sheet

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBS เป็นองค์ประกอบหลักที่เบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend ดังรูปที่ 4.13 โดยเส้นประคือช่วง easy-open peel พบว่า PBS มีช่วงอุณหภูมิการซีลแล้วลอกออกได้ง่ายในช่วง 105 - 110 °C ส่วน PBAT ช่วงอุณหภูมิการซีลแล้วลอกออกได้ง่ายที่สูงขึ้นช่วง 115 - 125 °C สำหรับ PHBV ซีลไม่ติดกับภาตเนื่องจากมีอุณหภูมิหลอมที่สูงเมื่อพิจารณา PBS/PBAT blend มีช่วง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลอยู่ระหว่าง PBS กับ PBAT โดยช่วงอุณหภูมิการซีลแล้วลอกออกได้ง่ายในช่วง 105 - 120 °C ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิการซีลแล้วลอกออกได้ง่ายกว้างมากขึ้น สำหรับ PBS/PHBV blend พบว่า ค่า Peel force หลังจากเบลนด์กับ PHBV ทั้งในระบบที่เติมและไม่เติม reactive agent มีค่าลดลงน้อยกว่า PBS เล็กน้อย และอยู่ในช่วงอุณหภูมิการซีลแล้วลอกออกได้ง่ายในช่วง 105 - 115 °C แต่เมื่ออุณหภูมิการซีลสูงขึ้น 120 °C ค่า Peel force มีค่าใกล้เคียงกับการซีลที่อุณหภูมิที่ 115 °C ซึ่งเป็นข้อจำกัดของฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์กับ PHBV โดยฟิล์มขาดออกก่อนการลอกออกจากภาต



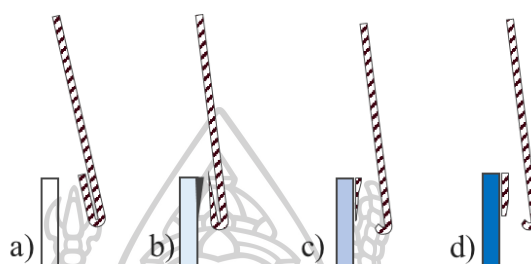


**รูปที่ 4.14** กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBSA/PBAT 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend บน PBS blend sheet

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลโดยมี PBSA เป็นองค์ประกอบหลักดังรูปที่ 4.14 พิจารณาในช่วง easy-open peel พบว่า PBSA มีช่วงอุณหภูมิการซีลแล้วลอกออกได้ง่ายที่ช่วง 90 - 100 °C เนื่องจาก PBSA มีอุณหภูมิการหลอมต่ำกว่า PBS และหลังจากการเบลนด์กับ PBAT ทั้งใน non-reactive และ reactive blend พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง PBSA และ PBAT โดยช่วงอุณหภูมิการซีลแล้วลอกออกได้ง่ายที่ช่วง 105 - 115 °C ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิการซีลแล้วลอกออกได้ง่ายกว้างมากขึ้น สำหรับ PBS/PHBV blend พบว่า ค่า Peel force หลังจากเบลนด์กับ PHBV ทั้งในระบบที่เติมและไม่เติม reactive agent มีค่าลดลงน้อยกว่า PBSA เล็กน้อย และอยู่ในช่วงอุณหภูมิการซีลแล้วลอกออกได้ง่ายที่ช่วง 100 - 105 °C ซึ่งแนวโน้มของ Peel force กับอุณหภูมิของ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับ PBS เป็นองค์ประกอบหลัก

จากรูปที่ 4.15 แสดงถึงรูปแบบพฤติกรรมการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อน โดยจะแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะ ดังนี้ (a) adhesive peel फिल्मพอลิเมอร์จะสามารถลอกออกจาก substrate ได้ง่ายโดยไม่มีฟิล์มเหลือติดอยู่กับ substrate (b) cohesive peel फिल्मมีแนวโน้มที่จะ

ลอกออกได้ในขณะทดสอบ แต่จะมีฟิล์มพอลิเมอร์บางส่วนติดอยู่ที่ substrate ซึ่งการลอกออกของแบบ (a) adhesive peel และ (b) cohesive peel ถือว่าเป็นการลอกออกของฝาปิดบรรจุภัณฑ์ได้ง่าย ส่วนแบบ (c) partial tearing peel พบว่าแรงที่ใช้ในการลอกจะมากกว่า 2 แบบข้างต้นซึ่งฟิล์มพอลิเมอร์จะเริ่มเกิดการลอกออกและจะขาดออกจากกัน และแบบ (d) tearing peel ไม่เกิดการลอกออกของฟิล์มพอลิเมอร์ขณะทดสอบ เนื่องจากความแข็งแรงของการปิดผนึกที่สูง ส่งผลให้ฟิล์มขาดออกจากกัน

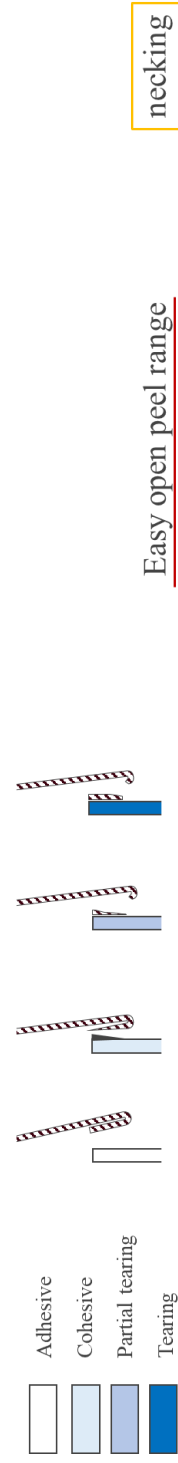


รูปที่ 4.15 รูปแบบพฤติกรรมการลอกออก a) adhesive peel, b) cohesive peel, c) partial tearing peel และ d) tearing peel

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการลอกออกของฝากับถาดในช่วง easy-open peel หรือช่วงเส้นสีแดงจากตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 พบว่าหลังจากการลอกออกของ PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักที่เบลนด์กับ PBAT เป็นเฟสรอง มีการลอกออกแบบ adhesive peel ซึ่งฟิล์มจะสามารถลอกออกจากถาดได้ง่ายโดยไม่มีฟิล์มเหลือติดอยู่กับถาด สำหรับการเบลนด์ที่ PHBV เป็นเฟสรองมีการลอกออกแบบ adhesive peel แต่เมื่ออุณหภูมิในการซีลสูงขึ้นพบว่าการลอกออกแบบ cohesive peel ซึ่งฟิล์มมีแนวโน้มที่จะลอกออกได้ในขณะทดสอบแต่จะพบชิ้นของฟิล์มบางส่วนติดอยู่กับถาด ซึ่งในทางอุตสาหกรรมยอมรับในการลอกออกสองแบบข้างต้นว่าสามารถลอกออกได้ง่าย

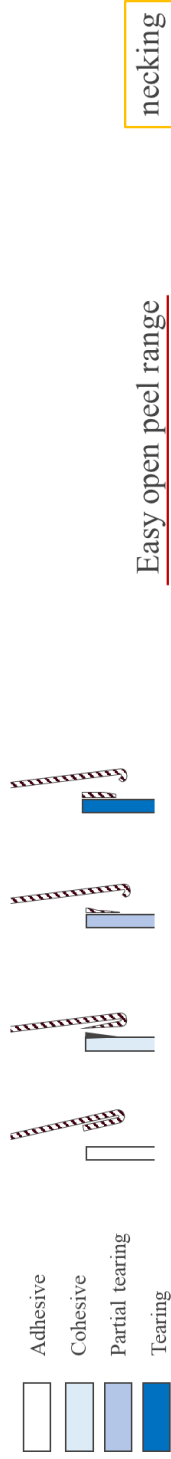
ตารางที่ 4.2 แสดงค่า Peel force และพฤติกรรมการลอกออกของฟลักซ์กาวในช่วง easy-open peel ของ PBS/PBAT blend และ PBS/PHBV blend

Sample / Sealing Temperature (°C)	95	100	105	110	115	120	125	130
PBS	0.83 ± 0.22	3.56 ± 0.80	7.44 ± 1.70	11.04 ± 1.00	14.51 ± 0.66	17.40 ± 2.06		
PBS/PBAT 80/20	0.05 ± 0.02	2.75 ± 0.60	4.10 ± 1.37	5.85 ± 1.05	9.18 ± 1.53	13.17 ± 1.64	15.93 ± 1.55	
PBS/PBAT 80/20 ECE0.1	0.04 ± 0.02	2.25 ± 0.35	3.87 ± 0.32	6.25 ± 0.62	10.37 ± 1.70	13.86 ± 1.25	16.87 ± 1.44	
PBAT	0.07 ± 0.01	0.15 ± 0.08	1.57 ± 0.14	3.47 ± 1.54	4.94 ± 1.23	6.76 ± 1.23	10.36 ± 1.85	13.88 ± 1.77
PBS/PHBV 80/20	0.07 ± 0.03	2.18 ± 0.30	5.45 ± 0.61	8.69 ± 1.84	11.86 ± 0.49	11.37 ± 1.68		
PBS/PHBV 80/20 DB0.02	0.12 ± 0.09	2.95 ± 0.06	6.74 ± 1.02	10.02 ± 1.40	12.89 ± 0.99	12.07 ± 0.86		
PBS/PHBV 80/20 ECE0.1	0.10 ± 0.06	2.71 ± 0.39	5.82 ± 0.81	9.20 ± 0.94	12.51 ± 1.47	13.15 ± 2.33		
PBS/PHBV 80/20 DB0.02 ECE0.1		2.19 ± 0.19	5.71 ± 0.53	9.07 ± 0.85	12.84 ± 1.62	14.71 ± 1.81		
PHBV		0.02 ± 0.09	0.18 ± 0.08	0.25 ± 0.11	0.35 ± 0.03	0.40 ± 0.18		



ตารางที่ 4.3 แสดงค่า Peel force และพฤติกรรมการลอกออกของฟลักซ์กาวในช่วง easy-open peel ของ PBSA/PBAT blend และ PBSA/PHBV blend

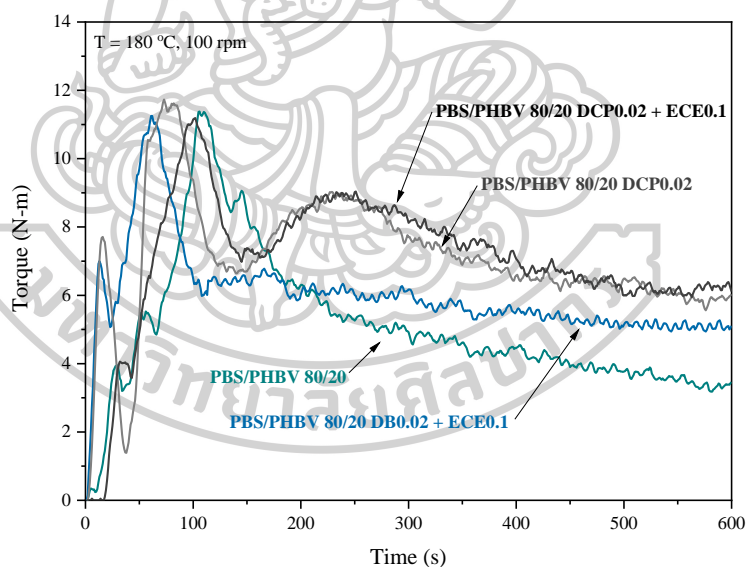
Sample / Sealing Temperature (°C)	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125
PBSA	2.43 ± 1.44	3.24 ± 1.52	4.89 ± 1.05	8.93 ± 2.27	13.99 ± 1.96	21.92 ± 1.96				
PBSA/PBAT 80/20	1.21 ± 0.37	2.06 ± 0.87	2.84 ± 0.35	4.93 ± 1.89	7.33 ± 1.68	12.07 ± 1.70	18.15 ± 1.88			
PBSA/PBAT 80/20 ECE0.1	1.12 ± 0.73	2.69 ± 1.46	2.46 ± 1.12	4.78 ± 0.71	5.95 ± 1.11	11.19 ± 1.19	19.53 ± 1.70			
PBAT	0.07 ± 0.01	0.15 ± 0.08	0.15 ± 0.08	1.57 ± 0.14	3.47 ± 1.54	4.94 ± 1.23	6.76 ± 1.23	10.36 ± 1.85		
PBSA/PHBV 80/20	0.86 ± 0.12	1.09 ± 0.50	3.61 ± 1.81	9.41 ± 1.46	15.13 ± 1.16	16.89 ± 0.66				
PBSA/PHBV 80/20 DB0.02	0.93 ± 0.46	1.67 ± 0.78	3.28 ± 0.66	9.19 ± 1.40	16.72 ± 2.00	16.03 ± 0.28				
PBSA/PHBV 80/20 ECE0.1	0.95 ± 0.36	1.67 ± 0.71	3.53 ± 0.92	10.88 ± 1.97	16.98 ± 0.72	18.37 ± 2.03				
PBSA/PHBV 80/20 DB0.02 ECE0.1	3.18 ± 0.80	10.75 ± 0.94	16.31 ± 1.52	17.77 ± 1.68						
PHBV	0.02 ± 0.09	0.18 ± 0.08	0.25 ± 0.11	0.35 ± 0.03	0.40 ± 0.18					



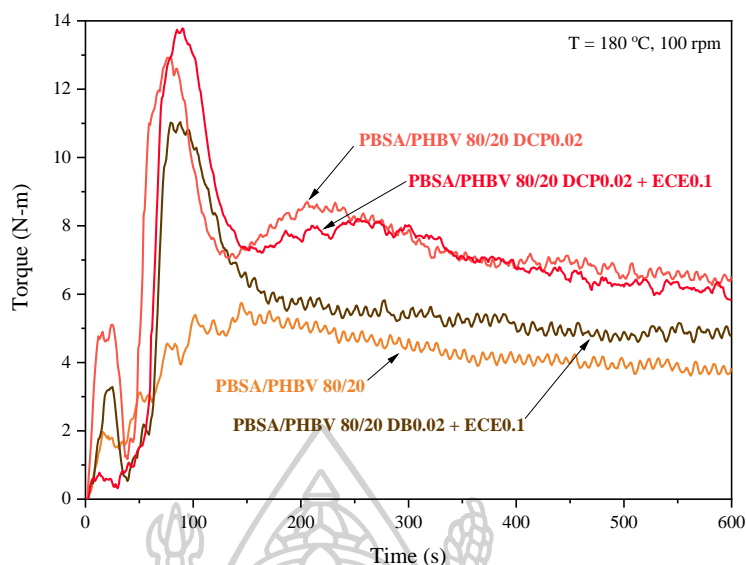
#### 4.2 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PHBV และเปลี่ยนชนิดของ peroxide จาก DB เป็น DCP ในปริมาณที่เท่ากัน

การศึกษาสมบัติการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และไอน้ำ สมบัติเชิงกล และ peel strength test ของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PHBV ที่อัตราส่วน 80:20 ผ่านปฏิกิริยา free radical โดยจะเติม DCP แทน DB ในปริมาณเท่ากันคือ 0.02 phr และปฏิกิริยารวมกันของปฏิกิริยา free radical กับปฏิกิริยา condensation โดยเติม DCP 0.02 phr + ECE 0.1 phr ซึ่งความแตกต่างของ DB จะมีอัตราเร็วในการแตกตัวของ peroxide จากค่า  $t_{1/2}$  2.5 นาที ซึ่งต่างกับ DCP มีค่า  $t_{1/2}$  0.7 นาที ที่ 180 °C ทำการเบลนด์ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding) โดยควบคุมให้มีความหนาประมาณ 100  $\mu\text{m}$

##### 4.2.1 ศึกษาผลของค่าแรงบิดในระหว่างการผสม PBS/PHBV blend และ PBSA/PHBV blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend



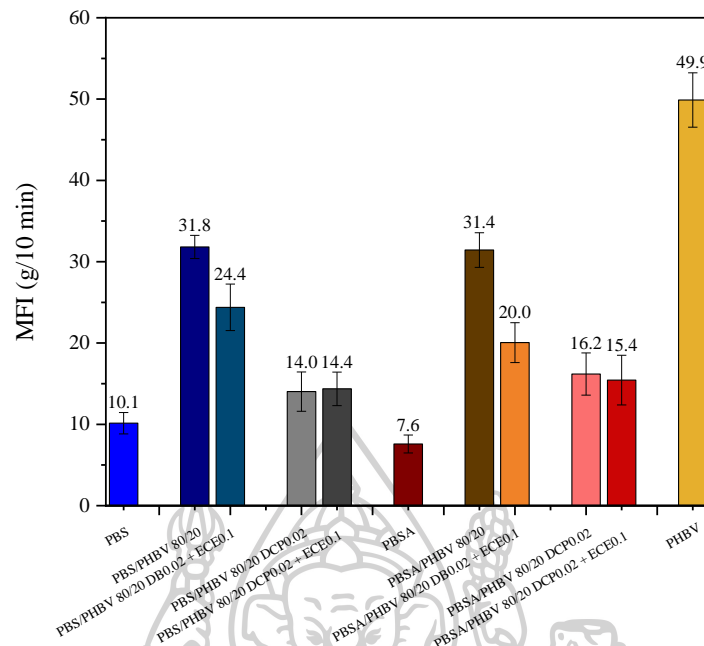
รูปที่ 4.16 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมของ PBS/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และที่เติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr, DCP 0.02 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr



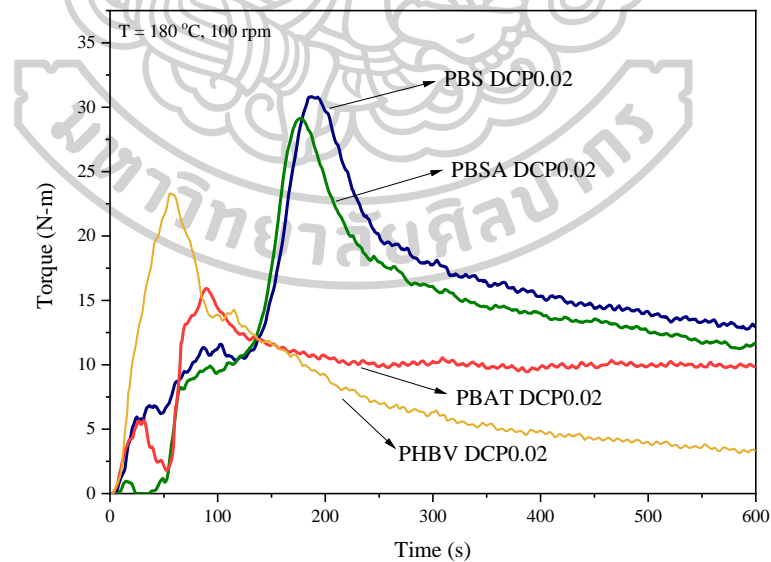
รูปที่ 4.17 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมของ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และที่เติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr, DCP 0.02 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr

การติดตามค่าแรงบิดระหว่างการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) ที่อุณหภูมิ 180 °C ความเร็วรอบในการผสม 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ของการเบลนด์ PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PHBV ที่เป็นเฟสรองในอัตราส่วน 80:20 แต่เมื่อมีการเบลนด์ผ่านปฏิกิริยา free radical โดยเติม DCP 0.02 phr พบว่า ค่าแรงบิดมีค่าสูงกว่าการเบลนด์โดยใช้ DB 0.02 phr และเมื่อเปลี่ยนการเติม DB เป็น DCP กราฟค่าแรงบิดที่ได้มีลักษณะคล้ายกับการ crosslink ของยาง และการเบลนด์ผ่านการรวมกันของปฏิกิริยา free radical กับปฏิกิริยา condensation โดยเติม DCP 0.02 phr + ECE 0.1 phr พบว่าค่าแรงบิดมีค่าใกล้เคียงกับการเติม DCP 0.02 phr เพียงอย่างเดียว และลักษณะกราฟก็เกิดลักษณะการ crosslink คล้ายยาง เช่นเดียวกัน

ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์หลังจากการผสมพบว่าค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มีลักษณะกราฟค่าแรงบิดที่มีการ crosslink คล้ายยาง ซึ่งเป็นการเติม DCP ในปริมาณ 0.02 phr จะมีค่าแรงบิดที่ลดลงมากกว่าการใช้ DB ในปริมาณที่เท่ากันและการเบลนด์ในระบบ reactive การที่กราฟค่าแรงบิดมีลักษณะการ crosslink คล้ายยาง และค่าดัชนีการไหลลดลง เป็นผลจากการ crosslink ในสายโซ่พอลิเมอร์บางส่วนกระจายอยู่ในส่วนที่ไหลได้ ซึ่งหลังจากที่มีการเติม reactive agent เป็นการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์เบลนด์ส่งผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์เบลนด์มีความหนืดที่สูงขึ้น



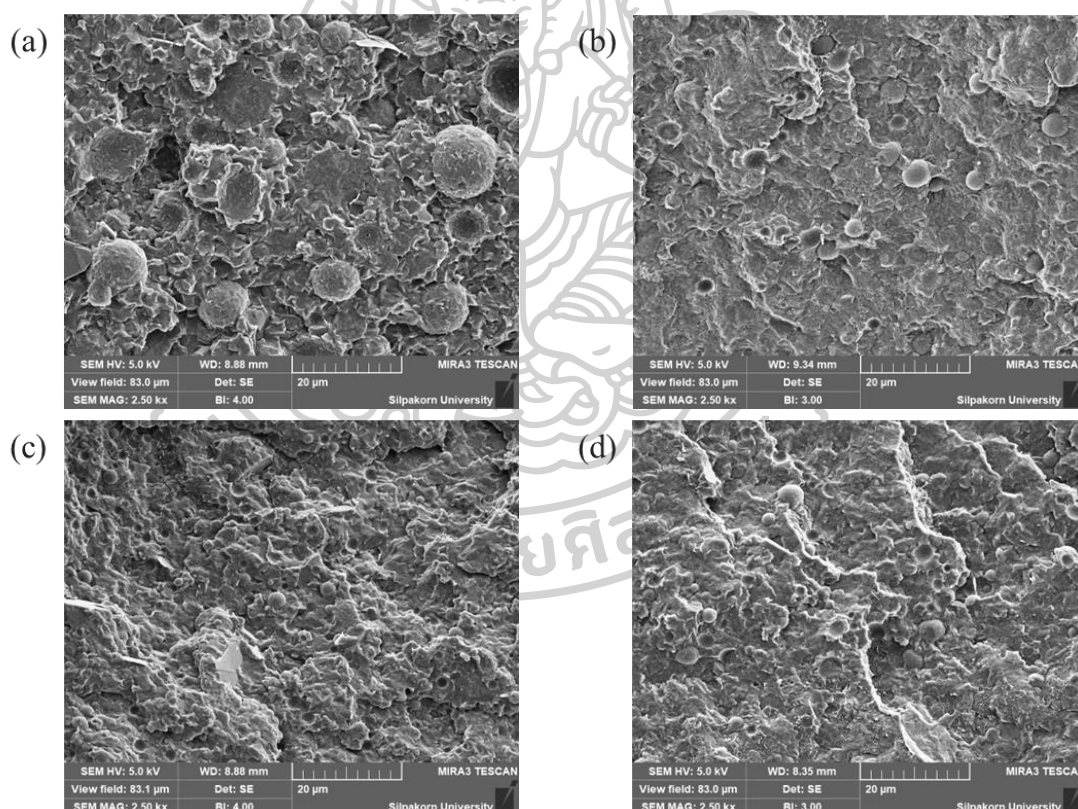
รูปที่ 4.18 ค่าดัชนีการไหลของโพลิเมอร์blend ของ PBS/PHBV 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และที่เติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr, DCP 0.02 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr



รูปที่ 4.19 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมของ PBS DCP 0.02 phr, PBSA DCP 0.02 phr, PBAT DCP 0.02 phr และ PHBV DCP 0.02 phr

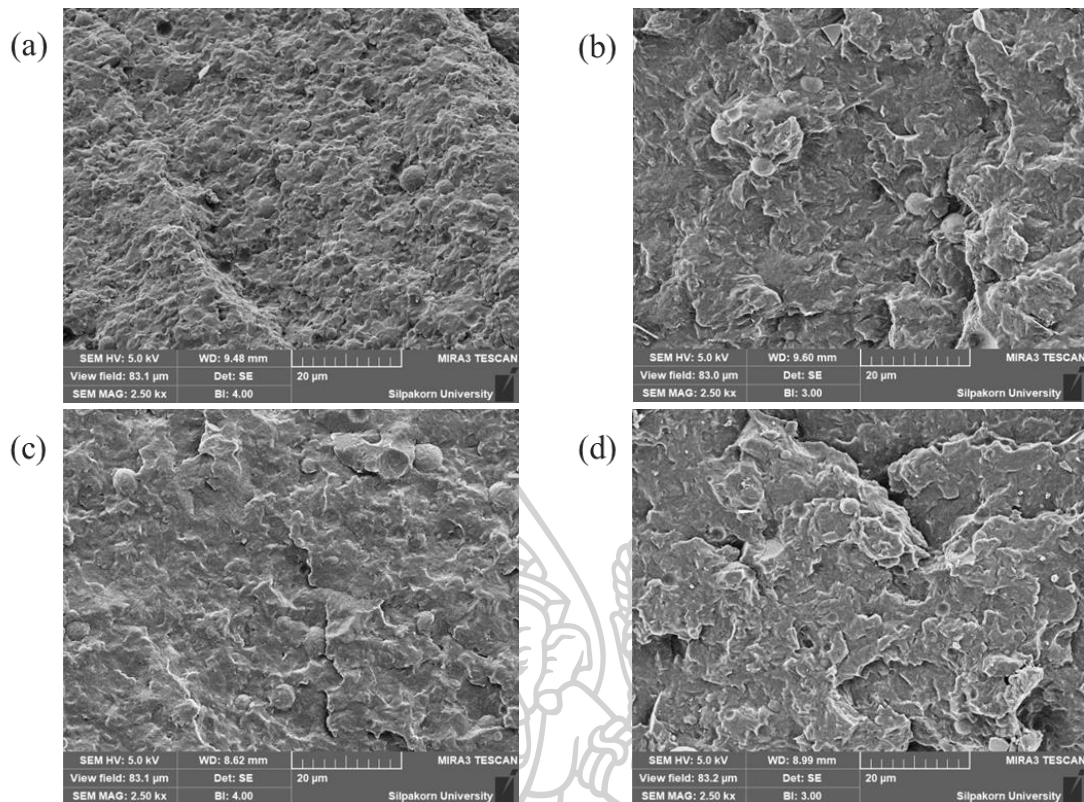
การเพิ่มขึ้นของค่าแรงบิดหลังจากที่มีการเติม DCP 0.02 phr แสดงให้เห็นถึงความว่องไวต่อ PBS และ PBSA มากกว่า PHBV สำหรับค่า  $t_{1/2}$  ของ DCP ที่อุณหภูมิ 180 °C ประมาณ 0.7 นาที [26, 27] ซึ่งมี  $t_{1/2}$  น้อยกว่า DB ที่มีค่า  $t_{1/2}$  ประมาณ 2.5 นาที ที่อุณหภูมิ 180 °C [26, 27] โดยความแตกต่างของ peroxide สองชนิดนี้มี  $t_{1/2}$  ที่แตกต่างกันในระหว่างการเบลนด์ แต่ในทางกลับกัน ปริมาณ peroxide ใน DB มีส่วนประกอบ 40% ซึ่งน้อยกว่า DCP ส่งผลให้ DCP ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า DB จากปริมาณ peroxide ที่มากกว่าและเกิดลักษณะกราฟ crosslink ในระหว่างการเบลนด์

#### 4.2.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาหลังจากการเบลนด์ของ PBS/PHBV blend และ PBSA/PHBV blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend



รูปที่ 4.20 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (a) PBS/PHBV 80/20, (b) PBS/PHBV 80/20 DCP 0.02 phr, (c) PBS/PHBV 80/20 ECE 0.1 phr และ (d) PBS/PHBV 80/20 DCP 0.02 + ECE 0.1 phr ที่หักไนโตรเจนเหลว ตามลำดับ



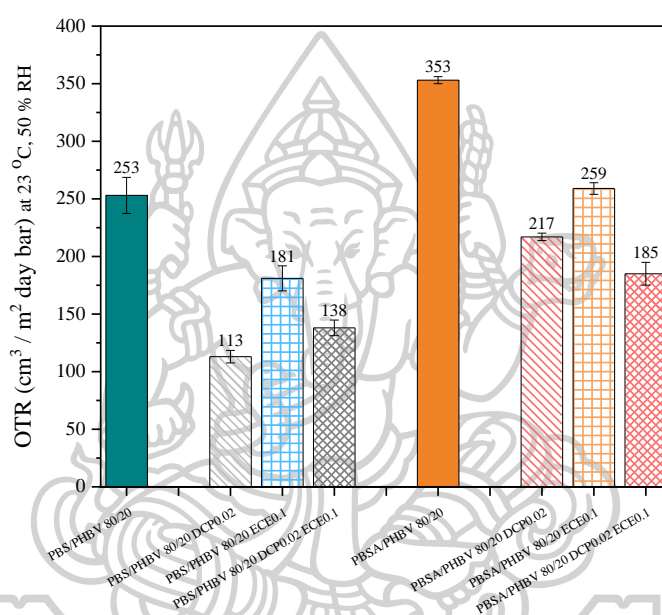


รูปที่ 4.21 ลักษณะสัณฐานวิทยาของ (a) PBSA/PHBV 80/20, (b) PBSA/PHBV 80/20 DCP 0.02 phr, (c) PBSA/PHBV 80/20 ECE 0.1 phr และ (d) PBSA/PHBV 80/20 DCP 0.02 + ECE 0.1 phr ที่หักในไนโตรเจนเหลว ตามลำดับ

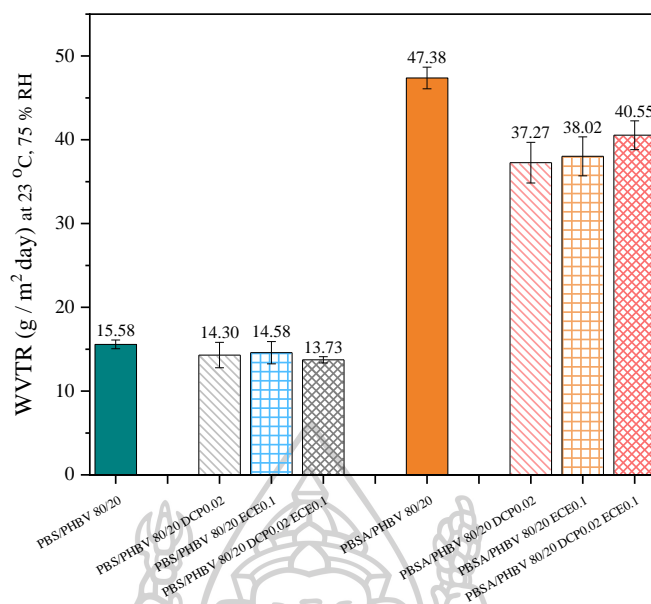
ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์บริเวณผิวการหักชิ้นงานในไนโตรเจนเหลว หลังจากการเบลนด์ และขึ้นรูปด้วยความร้อน โดยแสดงภาพที่กำลังขยาย 2,500 เท่า แสดงลักษณะ สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักโดยมี PHBV เป็น เฟสรอง โดยพบว่าหลังจากการเบลนด์ในระบบ reactive ที่มีการเติม DCP 0.02 phr และ DCP 0.02 phr + ECE 0.1 phr อนุภาคกลมเพิ่มมากขึ้นและมีขนาดอนุภาคเล็กลง แสดงให้เห็นถึงการ ปรับปรุง interfacial adhesion ระหว่างผิวที่ตีขึ้นของทั้งเฟสหลักและเฟสกระจายเช่นเดียวกันกับการใช้ DB เป็น peroxide

#### 4.2.3 ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของ PBS/PHBV blend และ PBSA/PHBV blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend

การศึกษาการซึมผ่านหลังจากการเปลี่ยนชนิดของ peroxide จาก DB เป็น DCP ในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้การขึ้นรูปฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้หลังจากการเบลนด์ด้วยเครื่องเบลนด์แบบปิด (internal mixer) ด้วยการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding) โดยควบคุมความหนาฟิล์มให้มีความหนา 100  $\mu\text{m}$  โดยศึกษาอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen transmission rate ; OTR) และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate ; WVTR)



รูปที่ 4.22 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) ของ PBS/PHBV 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และที่เติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr, DCP 0.02 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr



**รูปที่ 4.23** อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของ PBS/PHBV 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และที่เติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr, DCP 0.02 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr

อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน หรือ OTR และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ หรือ WVTR ของทั้ง PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PHBV ที่เป็นเฟสรอง หลังจากการเบลนด์ โดยเปลี่ยนจาก DB เป็น DCP พบว่า ทั้งค่า OTR และ WVTR มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการเบลนด์แบบ non-reactive เนื่องจากหลังจากการเบลนด์ในระบบที่มีการเติม reactive agent มีการปรับปรุง interfacial adhesion ระหว่างผิวของพอลิเมอร์ทั้งสองเฟสที่ดีขึ้น มีความเข้ากันได้มากยิ่งขึ้น เกิดเป็นโครงสร้างที่มีการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้สามารถปรับปรุงการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และไอน้ำได้ แต่ค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการใช้ DB เป็น peroxide ดังนั้นการเปลี่ยนชนิดของ peroxide ไม่ได้ส่งผลต่ออัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และไอน้ำของพอลิเมอร์เบลนด์

#### 4.2.4 ศึกษาสมบัติเชิงกลของ PBS/PHBV blend และ PBSA/PHBV blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend

การศึกษาสมบัติเชิงกลหลังจากการเปลี่ยนชนิดของ peroxide จาก DB เป็น DCP ในปริมาณที่เท่ากัน เบลนด์ด้วยเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) และอัดขึ้นรูปด้วยความร้อนให้เป็นชิ้นงานทดสอบการดึงยึดตามมาตรฐาน ASTM D638 type V จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ทดสอบด้วยเครื่อง universal testing machine ด้วยอัตราเร็ว 10 mm/min ใช้ load cell 10 kN

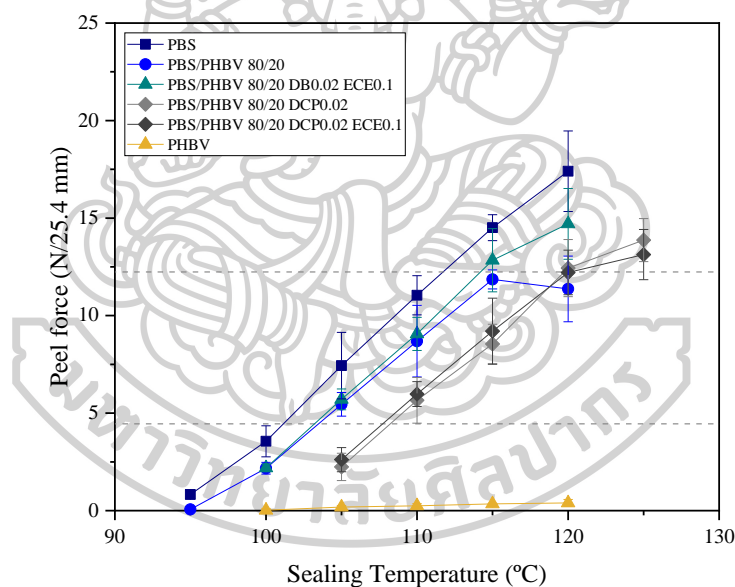
ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของ PBS/PHBV 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และที่เติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr, DCP 0.02 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr

Sample	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile strength at break (MPa)
PBS	325 ± 7.35	234 ± 4.00	35.8 ± 1.85
PBS/PHBV 80/20	507 ± 49.28	10.2 ± 3.29	27.6 ± 3.28
PBS/PHBV 80/20 DCP0.02	663 ± 36.43	10.2 ± 2.46	29.2 ± 4.07
PBS/PHBV 80/20 DCP0.02 + ECE 0.1	684 ± 13.02	11.1 ± 1.76	34.2 ± 1.90
PBSA	176 ± 9.78	489 ± 77.93	22.8 ± 2.32
PBSA/PHBV 80/20	258 ± 43.46	11.6 ± 0.45	15.9 ± 1.05
PBSA/PHBV 80/20 DCP0.02	255 ± 31.83	16.7 ± 2.63	16.8 ± 1.70
PBSA/PHBV 80/20 DCP0.02 + ECE 0.1	267 ± 55.41	21.5 ± 1.61	17.7 ± 1.46
PHBV	1476 ± 113.33	6.2 ± 1.60	37.3 ± 0.99

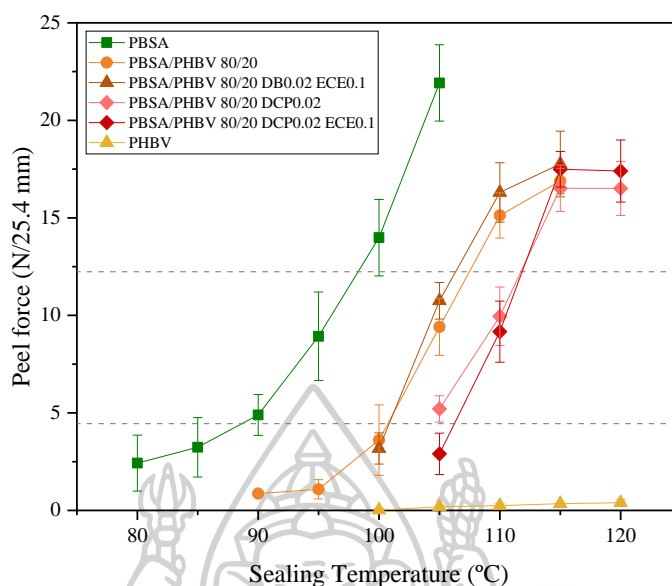
สมบัติเชิงกลหลังจากการเบลนด์โดยมีการเปลี่ยนชนิด peroxide จาก DB เป็น DCP ซึ่งแนวโน้มของสมบัติเชิงกลเป็นเช่นเดียวกันกับการใช้ DB เป็น reactive agent ผ่านปฏิกิริยา free radical โดยหลังจากการเติม DCP 0.02 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr ส่งผลให้ค่า Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้น และค่า Elongation at break มีค่าลดลง เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์เฟสหลัก สำหรับ Tensile strength at break หลังจากการเบลนด์มีค่าใกล้เคียงกัน

#### 4.2.5 การศึกษาความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อนของ PBS/PHBV blend และ PBSA/PHBV blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend

การศึกษาสมบัติการปิดผนึกของฝาปิดกับบรรจุภัณฑ์สามารถซีลแล้วลอกออกได้ง่าย (easy-open peel) โดยนำฟิล์มที่ได้หลังจากการเบลนด์และอัดขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยความร้อนให้มีความหนาของฟิล์มที่ 100  $\mu\text{m}$  หลังจากนั้นทำการซีลด้วยความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ กับถาด PBS blend sheet ที่มีความหนา 800  $\mu\text{m}$  จากนั้นทดสอบความแข็งแรงของการลอก (Peel strength test) โดยนำฟิล์มที่ได้จากการซีลมาทดสอบด้วย universal testing machine ตามมาตรฐาน ASTM F88 (Technique C) มุมในการลอก 180° อัตราการลอกขึ้นงาน 200 mm/min โดยขนาด load cell 500 N ซึ่งแรงเฉลี่ยที่อยู่ในช่วง 4.45 – 12.24 N/25.4 mm เป็นแรงที่สามารถซีลแล้วลอกออกได้ง่าย (easy-open peel)



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBS/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และที่เติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr, DCP 0.02 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr บน PBS blend sheet



รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBSA/PHBV 80/20 blend ทั้งในระบบ non-reactive blend และที่เติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr, DCP 0.02 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr บน PBS blend sheet

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PHBV ที่เป็นเฟสรองโดยมีการเปลี่ยนชนิดของ peroxide จาก DB เป็น DCP ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการใช้ DCP เป็น reactive agent จะส่งผลให้ค่า Peel force กับอุณหภูมิเลื่อนไปในทางที่อุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการใช้ DCP ส่งผลให้สายโซ่เกิดการเชื่อมขวาง ในขณะที่การเบลนด์และกราฟค่าแรงบิดยังมีลักษณะการ crosslink คล้ายๆ การหลอมเพื่อให้ฟิล์มติดกับภาตจะเกิดได้ยากขึ้น ซึ่งมีอุณหภูมิการซีลที่อยู่ในช่วง easy-open peel ที่ 110 - 120 °C สำหรับ PBS เป็นองค์ประกอบหลัก ส่วน PBSA เป็นองค์ประกอบหลักมีอุณหภูมิการซีลที่อยู่ในช่วง easy-open peel ที่ 105 - 110 °C

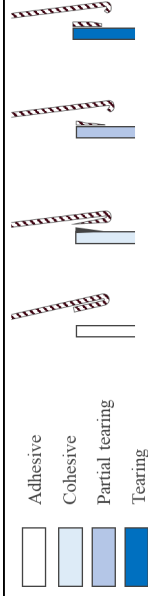
เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของการลอกออกของฟากับภาตในช่วง easy-open peel ในตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 พบว่ามีการลอกออกแบบ adhesive peel แต่เมื่ออุณหภูมิในการซีลสูงขึ้นจะมีการลอกออกแบบ cohesive peel ซึ่งสามารถลอกออกได้ง่าย

ตารางที่ 4.5 แสดงค่า Peel force และพฤติกรรมการลอกออกของฟลักซ์กับอุณหภูมิในช่วง easy-open peel ของ PBS/PHBV blend

Sample / Sealing Temperature (°C)	95	100	105	110	115	120	125
PBS	0.83 ± 0.22	3.56 ± 0.80	7.44 ± 1.70	11.04 ± 1.00	14.51 ± 0.66	17.40 ± 2.06	
PBS/PHBV 80/20	0.07 ± 0.03	2.18 ± 0.30	5.45 ± 0.61	8.69 ± 1.84	11.86 ± 0.49	11.37 ± 1.68	
PBS/PHBV 80/20 DB0.02 ECE0.1	2.19 ± 0.19	2.19 ± 0.19	5.71 ± 0.53	9.07 ± 0.85	12.84 ± 1.62	14.71 ± 1.81	
PBS/PHBV 80/20 DCP0.02			2.24 ± 0.70	5.66 ± 1.17	8.55 ± 1.01	12.44 ± 1.46	13.87 ± 1.10
PBS/PHBV 80/20 DCP0.02 ECE0.1			2.62 ± 0.62	5.98 ± 0.64	9.20 ± 1.70	12.21 ± 1.14	13.13 ± 1.29

ตารางที่ 4.6 แสดงค่า Peel force และพฤติกรรมการลอกออกของฟลักซ์กับอุณหภูมิในช่วง easy-open peel ของ PBSA/PHBV blend

Sample / Sealing Temperature (°C)	80	85	90	95	100	105	110	115	120
PBSA	2.43 ± 1.44	3.24 ± 1.52	4.89 ± 1.05	8.93 ± 2.27	13.99 ± 1.96	21.92 ± 1.96			
PBSA/PHBV 80/20			0.86 ± 0.12	1.09 ± 0.50	3.61 ± 1.81	9.41 ± 1.46	15.13 ± 1.16	16.89 ± 0.66	
PBSA/PHBV 80/20 DB0.02 ECE0.1					3.18 ± 0.80	10.75 ± 0.94	16.31 ± 1.52	17.77 ± 1.68	
PBSA/PHBV 80/20 DCP0.02						5.20 ± 0.67	9.95 ± 1.50	16.52 ± 1.19	16.51 ± 1.39
PBSA/PHBV 80/20 DCP0.02 ECE0.1						2.90 ± 1.06	9.17 ± 1.57	17.49 ± 0.91	17.40 ± 1.59

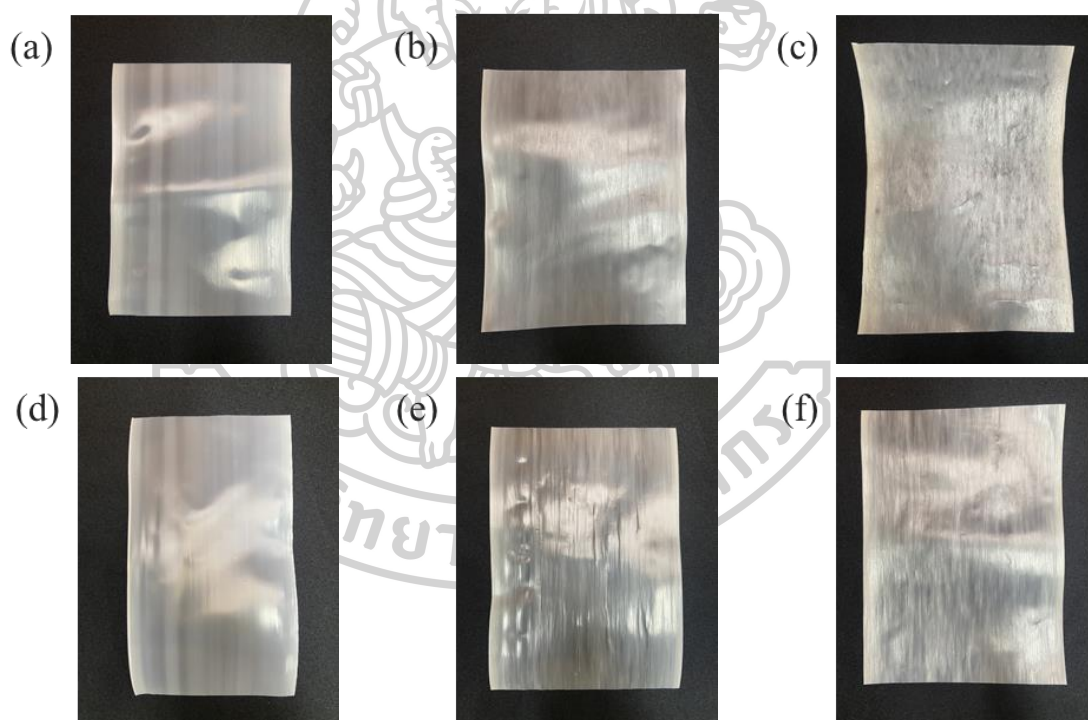


Easy open peel range

necking

#### 4.3 การเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder)

จากการทดลองก่อนหน้านี้เป็นการทดลองในระดับห้องทดลอง เพื่อเป็นการศึกษาในระดับกึ่งอุตสาหกรรมจึงทำการศึกษาในสัดส่วนเดียวกันกับระดับ lab scale โดยการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์ โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PBAT ที่เป็นเฟสรองในระบบ reactive blend ซึ่งเติม ECE 0.1 phr และสำหรับการเบลนด์กับ PHBV ที่เป็นเฟสรองในระบบ reactive blend ซึ่งจะเติม peroxide ต่างชนิดในปริมาณที่เท่ากันดังนี้ DB 0.02 + ECE 0.1 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr ซึ่งทำการเบลนด์ในสัดส่วนเฟสหลักต่อเฟสรอง 80:20 การผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder) โดยควบคุมความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ให้ได้ 100  $\mu\text{m}$

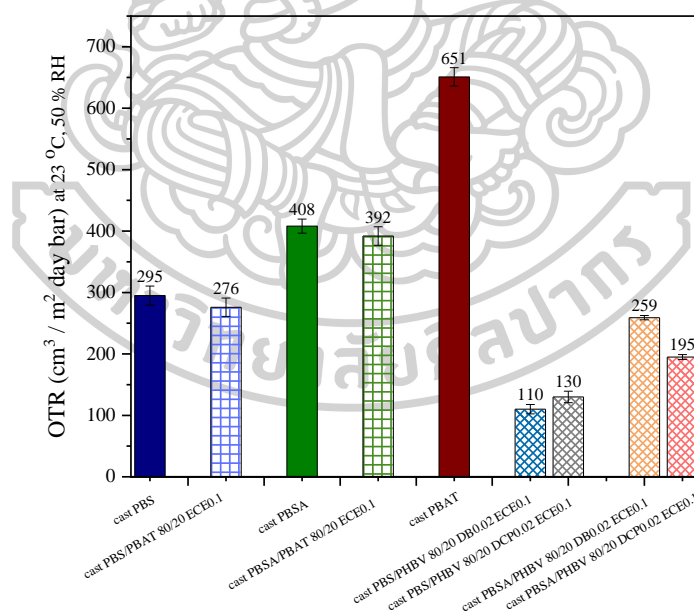


รูปที่ 4.26 ลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์เบลนด์ฟิล์มหลังจากขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder) (a) PBS/PBAT 80/20 ECE0.1, (b) PBS/PHBV 80/20 DB0.02+ECE0.1, (c) PBS/PHBV 80/20 DCP0.02+ECE0.1 (d) PBSA/PBAT 80/20 ECE0.1, (e) PBSA/PHBV 80/20 DB0.02+ECE0.1 และ (f) PBSA/PHBV 80/20 DCP0.02+ECE0.1

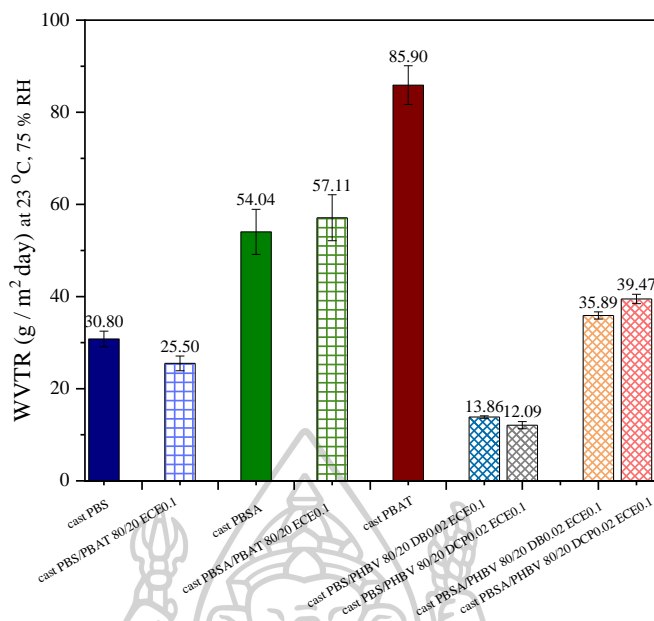


จากการผสมด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (twin-screw extruder) และทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่อง cast film extruder โดยทำการควบคุมความหนาที่ 100  $\mu\text{m}$  ซึ่งสามารถขึ้นรูปฟิล์มในสูตรต่าง ๆ ได้ดี ใน รูปที่ 4.26 (a, b, d และ e) สำหรับการเบลนด์กับ PHBV เป็นเฟสรองและมีการเติม DCP 0.02 + ECE 0.1 phr ของการเบลนด์ทั้ง PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งจะเกิดการเชื่อมขวางที่มากกว่าการใช้ DB ในการเบลนด์ในปริมาณที่เท่ากัน โดยหลังจากการขึ้นรูปฟิล์มด้วย cast film extruder ไม่สามารถควบคุมความหนาฟิล์มให้มีความหนา 100  $\mu\text{m}$  ได้ โดยเมื่อปรับการขึ้นรูปให้ฟิล์มบางลง ฟิล์มจะขาดออกจากกัน และไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจำเป็นต้องปรับการขึ้นรูปให้มีความหนามากขึ้นเพื่อให้ได้ฟิล์มไม่ขาดออกจากกัน โดย PBS/PHBV DCP 0.02 + ECE 0.1 phr มีความหนา  $198 \pm 5.31 \mu\text{m}$  และ PBSA/PHBV DCP 0.02 + ECE 0.1 phr มีความหนา  $172 \pm 4.65 \mu\text{m}$

4.3.1 ศึกษาสมบัติการซึมผ่านของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในระบบ reactive blend ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder)

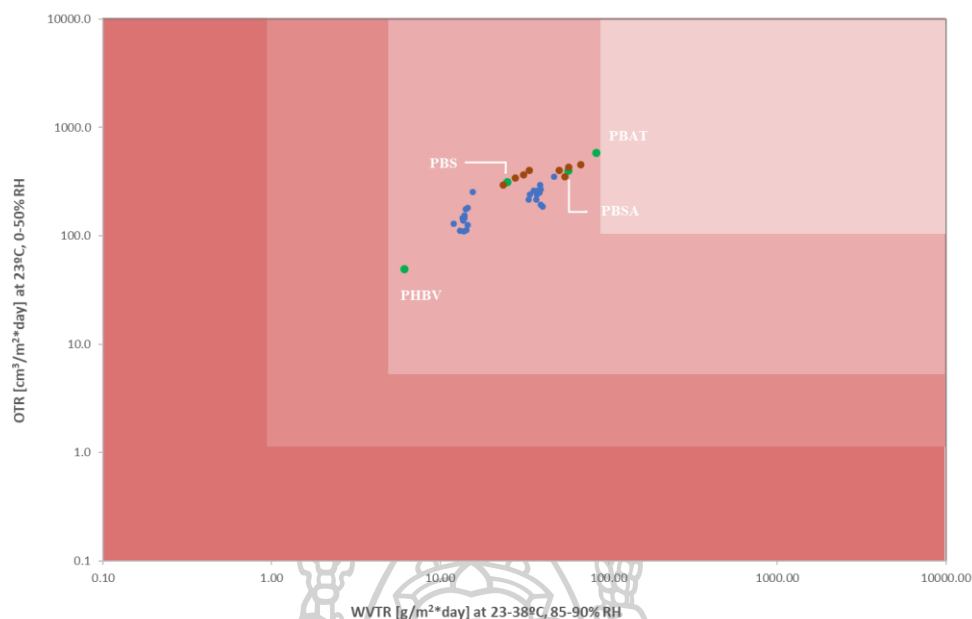


รูปที่ 4.27 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) ของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในระบบ reactive blend ที่ผ่านการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder)



รูปที่ 4.28 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (WVTR) ของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในระบบ reactive blend ที่ผ่านการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder)

จากผลการทดสอบการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำ ของการเบลนด์โดยที่ PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PBAT เป็นเฟสรอง โดยมีการเติม ECE 0.1 phr พบว่า ค่า OTR และค่า WVTR มีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มที่เป็นองค์ประกอบหลักเพียงอย่างเดียว สำหรับการเบลนด์กับ PHBV เป็นเฟสรอง ทั้งการที่เติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr และ DCP 0.02+ ECE 0.1 phr มีค่า OTR และค่า WVTR ลดลงมากกว่าฟิล์มพอลิเมอร์เฟสหลัก แต่การเปลี่ยนชนิด peroxide จาก DB เป็น DCP ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า OTR และ WVTR



รูปที่ 4.29 ค่า OTR และ WVTR ที่ได้จากการทดลอง โดยพล็อตตามการจำแนกประเภทของการต้านการซึมผ่าน (Barrier classification) [15]

จากผลการทดลองอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และไอน้ำ ทั้งในระดับ lab scale และในระดับอุตสาหกรรม พล็อตลงในกราฟ OTR และ WVTR ดังแสดงในรูปที่ 4.29 พบว่าอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และไอน้ำเกาะกลุ่มกันตามการเบลนด์กับเฟสรองแต่ละชนิด โดยการเบลนด์กับ PBAT (จุดสีแดง) แนวโน้มของค่า OTR และ WVTR เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์เฟสหลัก ในส่วนของการเบลนด์กับ PHBV (จุดสีฟ้า) จะมีการซึมผ่านของก๊าซที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์เฟสหลัก ส่งผลให้แนวโน้มของการซึมผ่านลดลง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาเบลนด์ โดยการเบลนด์ในระบบ reactive แนวโน้มของการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและไอน้ำ (OTR และ WVTR) มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการเบลนด์แบบ non-reactive เนื่องจากมีการปรับปรุง interfacial adhesion ระหว่างผิวของพอลิเมอร์ทั้งสองเฟสที่ดีขึ้น มีความเข้ากันได้มากยิ่งขึ้น เกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์ เกิดเป็นโครงสร้างที่มีการเชื่อมขวางทำให้สามารถปรับปรุงการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และไอน้ำได้

4.3.2 ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในระบบ reactive blend ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder)

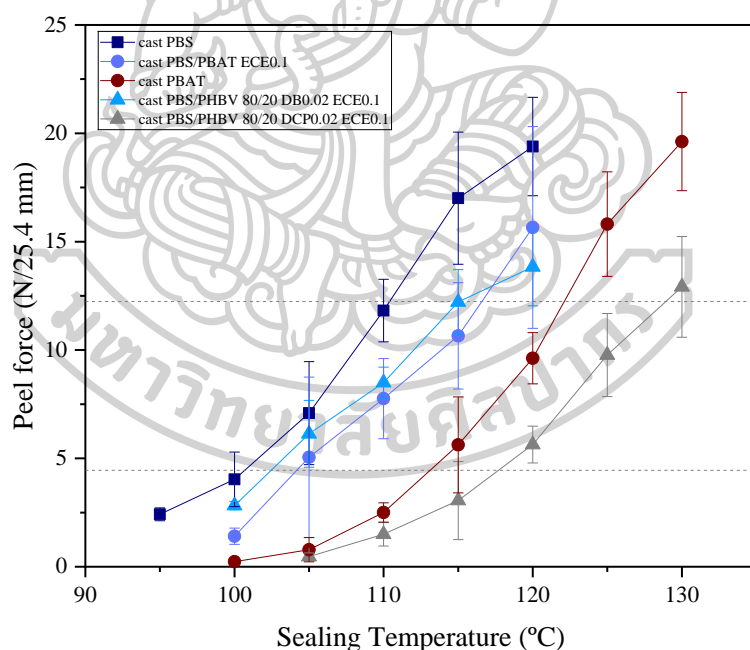
การศึกษสมบัติเชิงกลหลังจากการเบลนด์ สำหรับฟิล์มที่ขึ้นรูปด้วยเครื่อง cast film extruder ตามมาตรฐาน ASTM D-882 ทดสอบด้วยเครื่อง universal testing machine ความเร็วในการดึงขึ้นงาน 12.5 mm/min โดยขนาด load cell 500 N

ตารางที่ 4.7 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในระบบ reactive blend ที่ผ่านการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder)

Sample	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile strength at break (MPa)
Cast PBS	473 ± 30.39	22.5 ± 2.06	26.3 ± 2.71
Cast PBSA	309 ± 49.12	40.4 ± 1.76	16.1 ± 1.45
Cast PBS/PBAT 80/20 ECE 0.1	389 ± 31.48	67.7 ± 23.81	23.8 ± 1.90
Cast PBSA/PBAT 80/20 ECE 0.1	253 ± 18.25	116 ± 33.05	17.6 ± 0.46
Cast PBAT	72 ± 0.59	528 ± 50.46	18.6 ± 3.21
Cast PBS/PHBV 80/20 DB0.02 + ECE 0.1	570 ± 45.03	16.7 ± 2.97	19.5 ± 2.18
Cast PBS/PHBV 80/20 DCP0.02 + ECE 0.1	547 ± 32.98	15.4 ± 2.84	19.9 ± 1.87
Cast PBSA/PHBV 80/20 DB0.02 + ECE 0.1	413 ± 29.15	19.5 ± 1.70	12.8 ± 1.39
Cast PBSA/PHBV 80/20 DCP0.02 + ECE 0.1	424 ± 10.49	19.8 ± 2.02	15.1 ± 0.98

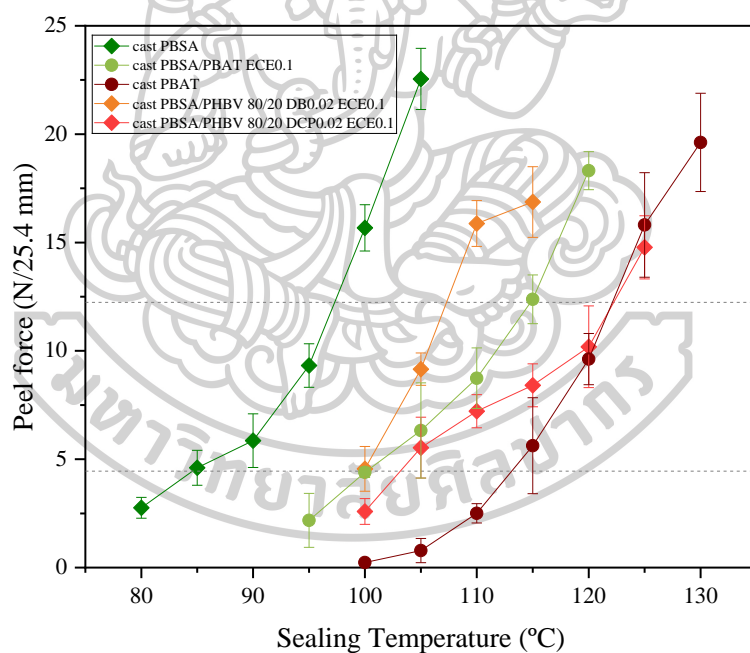
เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่ได้หลังจากการ cast film extrusion ของทั้ง PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อพิจารณาการเบลนด์กับ PBAT เป็นเฟสรอง ที่มีการเติม ECE 0.1 phr พบว่าค่า Young's modulus มีค่าลดลง และค่า Elongation at break เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เฟสหลัก เมื่อพิจารณาการเบลนด์กับ PHBV ที่เป็นเฟสรอง ทั้งที่มีการเติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr และ DCP 0.02 + ECE 0.1 phr พบว่าค่า Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้น และค่า Elongation at break มีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เฟสหลัก และการเปลี่ยนชนิดของ peroxide จาก DB มาเป็น DCP นั้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกล

4.3.3 การศึกษาความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในระบบ reactive blend ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder)



รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในระบบ reactive blend ที่ผ่านการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder) บน PBS blend sheet

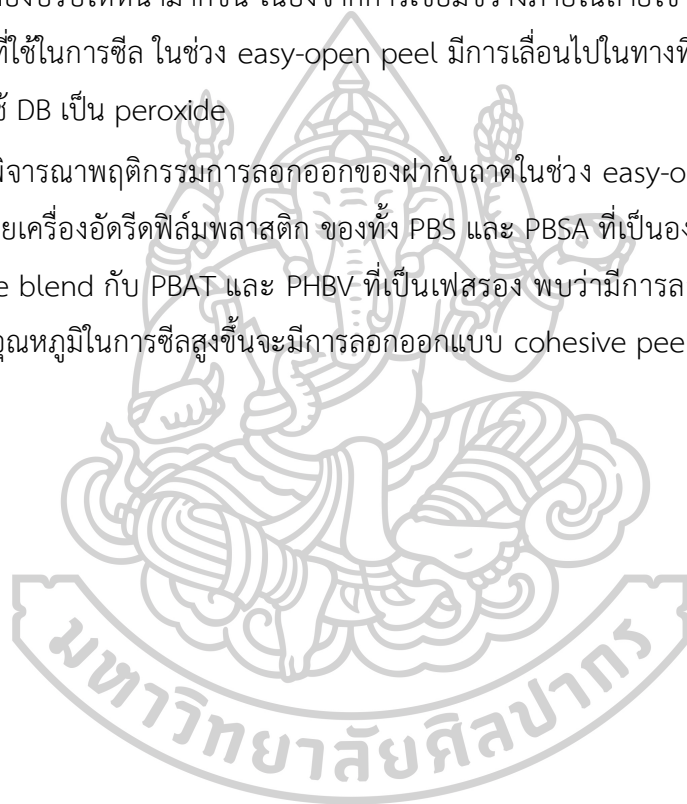
กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS เป็นองค์ประกอบหลัก ที่ผ่านการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก เมื่อเบลนด์กับเฟสรอง PBAT และมีการเติม ECE 0.1 phr พบว่า PBS/PBAT ECE 0.1 มีช่วงอุณหภูมิการซีลแล้วลอกออกได้ง่ายที่ช่วง 105 - 115 °C ซึ่งอยู่ระหว่างค่า Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBS และ PBAT อีกทั้งยังมีอุณหภูมิการซีลที่อยู่ในช่วง easy-open peel กว้างมากขึ้น เมื่อพิจารณาการเบลนด์กับเฟสรอง PHBV ที่มีการเติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr พบว่าค่า Peel force มีค่าลดลงน้อยกว่าฟิล์ม PBS เล็กน้อย และอยู่ในช่วงอุณหภูมิการซีลแล้วลอกออกได้ง่ายที่ช่วง 105 - 115 °C แต่เมื่อเปลี่ยนชนิด peroxide จาก DB เป็น DCP โดยการเบลนด์ PBS/PHBV DCP 0.02 + ECE 0.1 phr นั้นพบว่า ค่า Peel force และอุณหภูมิที่ใช้ในการซีล ในช่วง easy-open peel มีการเลื่อนไปในทางที่อุณหภูมิการซีลที่สูงขึ้น เนื่องจากฟิล์มที่ได้มีความหนามากกว่า 100  $\mu\text{m}$  จากการเกิดการเชื่อมขวางในสายโซ่พอลิเมอร์ จึงทำให้เกิดการหลอมติดกันได้ยากขึ้นแล้วต้องใช้อุณหภูมิสูงในการซีลติด



รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของพอลิเมอร์เบลนด์ โดยมี PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในระบบ reactive blend ที่ผ่านการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (Cast film extruder) บน PBS blend sheet

สำหรับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลักที่ผ่านการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการที่มี PBS เป็นองค์ประกอบหลัก โดยเมื่อการเบลนด์ PBSA กับ PBAT ที่เติม ECE 0.1 phr พบว่าค่า Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลอยู่ระหว่างของ PBSA และ PBAT มีช่วงอุณหภูมิการซีลแล้วลอกออกได้ง่ายกว้างขึ้นที่ช่วง 100 - 115 °C และการเบลนด์ PBSA กับ PHBV ที่เติม DB 0.02 + ECE 0.1 phr พบว่า Peel force มีการเลื่อนของช่วงอุณหภูมิการซีลแล้วลอกออกได้ง่ายที่สูงขึ้นที่ช่วง 100 - 110 °C เมื่อเทียบกับฟิล์ม PBSA เมื่อมีการเปลี่ยนจาก DB เป็น DCP พบว่าฟิล์มที่ขึ้นรูปต้องปรับให้หนามากขึ้น เนื่องจากการเชื่อมขวางภายในสายโซ่ จึงทำให้ค่า Peel force และอุณหภูมิที่ใช้ในการซีล ในช่วง easy-open peel มีการเลื่อนไปในทางที่อุณหภูมิการซีลที่สูงขึ้นมากกว่าการใช้ DB เป็น peroxide

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการลอกออกของฝากับถาดในช่วง easy-open peel หลังจากการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก ของทั้ง PBS และ PBSA ที่เป็นองค์ประกอบหลัก ทั้งการผสม reactive blend กับ PBAT และ PHBV ที่เป็นเฟสรอง พบว่ามีการลอกออกแบบ adhesive peel แต่เมื่ออุณหภูมิในการซีลสูงขึ้นจะมีการลอกออกแบบ cohesive peel ซึ่งสามารถลอกออกได้ง่าย

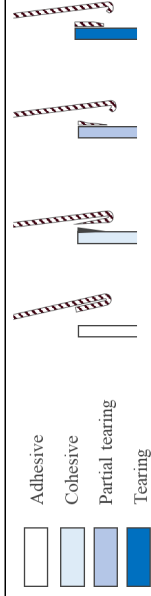


**ตารางที่ 4.8** แสดงค่า Peel force และพฤติกรรมการลอกออกของฟลักซ์ภายใต้ในช่วง easy-open peel ของ cast PBS/PBAT blend และ cast PBS/PHBV blend

Sample / Sealing Temperature (°C)	95	100	105	110	115	120	125	130
cast PBS	2.42 ± 0.30	4.03 ± 1.26	7.09 ± 2.38	11.82 ± 1.44	17.01 ± 3.05	19.39 ± 2.27		
cast PBS/PBAT 80/20 ECE0.1	1.41 ± 0.37	5.05 ± 3.70	7.76 ± 1.85	10.65 ± 2.45	15.66 ± 4.66			
cast PBAT	0.23 ± 0.08	0.79 ± 0.56	2.51 ± 0.45	5.63 ± 2.21	9.62 ± 1.18	15.81 ± 2.41	19.62 ± 2.27	
cast PBS/PHBV 80/20 DB0.02 ECE0.1	2.82 ± 0.19	6.13 ± 1.54	8.50 ± 0.71	12.22 ± 1.49	13.84 ± 1.80			
cast PBS/PHBV 80/20 DCP0.02 ECE0.1	0.47 ± 0.17	1.50 ± 0.54	3.05 ± 1.80	5.64 ± 0.85	9.77 ± 1.92	12.92 ± 2.32		

**ตารางที่ 4.9** แสดงค่า Peel force และพฤติกรรมการลอกออกของฟลักซ์ภายใต้ในช่วง easy-open peel ของ cast PBSA/PBAT blend และ cast PBSA/PHBV blend

Sample / Sealing Temperature (°C)	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125
cast PBSA	2.76 ± 0.48	4.61 ± 0.81	5.86 ± 1.24	9.32 ± 1.01	15.68 ± 1.07	22.55 ± 1.41				
cast PBSA/PBAT 80/20 ECE0.1	2.18 ± 1.24	4.40 ± 0.23	6.33 ± 2.20	8.74 ± 1.40	12.38 ± 1.12	18.32 ± 0.87				
cast PBAT	0.23 ± 0.08	0.79 ± 0.56	2.51 ± 0.45	5.63 ± 2.21	9.62 ± 1.18	15.81 ± 2.41				
cast PBSA/PHBV 80/20 DB0.02 ECE0.1	4.55 ± 1.03	9.16 ± 0.75	15.88 ± 1.06	16.87 ± 1.63						
cast PBSA/PHBV 80/20 DCP0.02 ECE0.1	2.59 ± 0.59	5.54 ± 1.40	7.21 ± 0.76	8.41 ± 0.99	10.19 ± 1.88	14.78 ± 1.46				



Easy open peel range

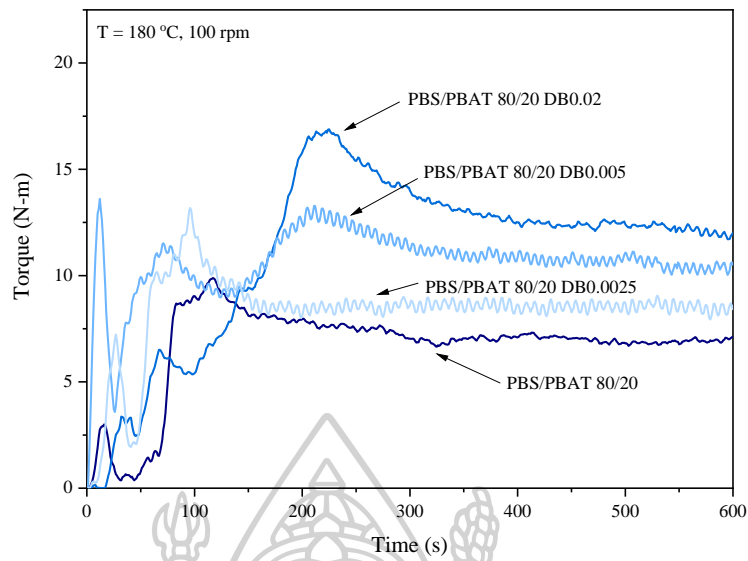
necking



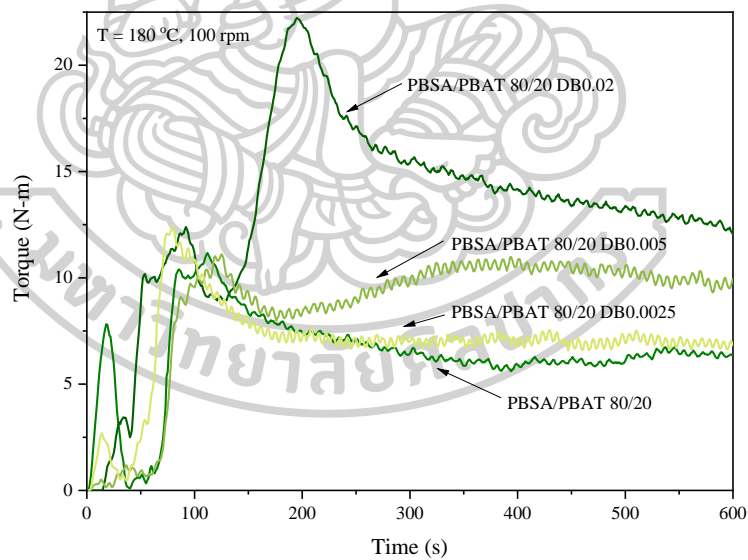
#### 4.4 การศึกษาปริมาณ peroxide ที่เหมาะสมโดยกราฟแรงบิดไม่เกิดลักษณะการ crosslink คล้ายอย่างระหว่างการผสมที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์

จากการทดลองก่อนหน้านี้พบว่าปริมาณ peroxide ที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการเชื่อมขวางที่สูง และผลจากการเชื่อมขวางส่งผลอย่างเห็นได้ชัดกับความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อนของพอลิเมอร์เบลนด์ฟิล์มโดยช่วง easy-open peel จะเลื่อนไปทางที่อุณหภูมิ การปิดผนึกด้วยความร้อนสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อยืนยันว่าเป็นผลของการ crosslink จึงทำการลดปริมาณ peroxide ที่ใช้ในการเบลนด์เฉพาะสูตรที่เกิดการ crosslink โดยการเบลนด์ PBS และ PBSA เป็นเฟสหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT โดยลดปริมาณ DB จาก 0.02 phr เป็น 0.005 และ 0.0025 phr และการเบลนด์กับ PHBV เป็นเฟสรองจะลดปริมาณ DCP จาก 0.02 phr เป็น 0.01 และ 0.005 phr ตามลำดับ

การติดตามค่าแรงบิดระหว่างการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 180 °C ความเร็วรอบในการผสม 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที การเบลนด์ที่มี PBS เป็นเฟสหลักเบลนด์กับ PBAT เป็นเฟสรองหลังจากที่เติม DB ปริมาณเพิ่มขึ้น พบว่าค่าแรงบิดมีค่าสูงขึ้น โดยการที่เติม DB 0.005 และ 0.02 phr จะส่งผลให้กราฟมีลักษณะของการ crosslink คล้ายอย่าง ซึ่งการที่ลดปริมาณ DB เหลือ 0.0025 phr จะไม่เกิดกราฟที่มีลักษณะ crosslink คล้ายอย่าง แต่ค่าแรงบิดยังคงสูงกว่าเมื่อเทียบกับ non-reactive ในส่วนของ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักก็ให้ผลแนวโน้มเช่นเดียวกับ PBS เป็นเฟสหลัก ซึ่งปริมาณ DB ที่ทำให้กราฟไม่เกิดลักษณะ crosslink คล้ายอย่างคือ 0.0025 phr



รูปที่ 4.32 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมของ PBS/PBAT 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DB 0.0025, 0.005 และ 0.02 phr

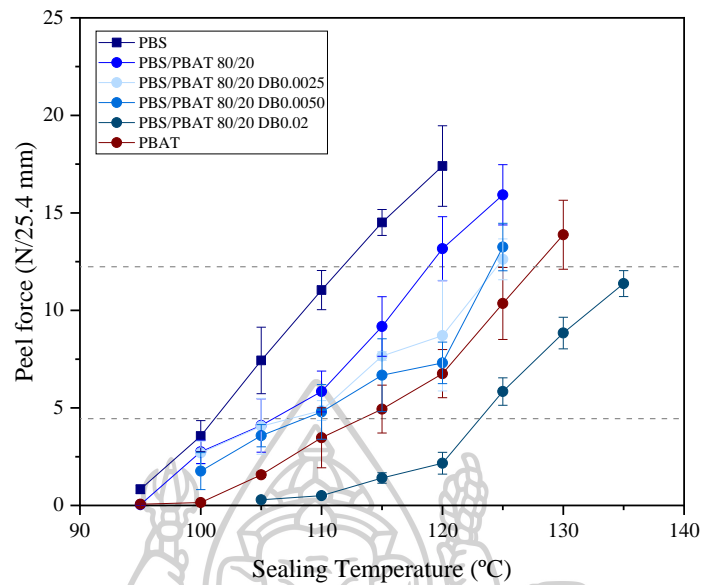


รูปที่ 4.33 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมของ PBSA/PBAT 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DB 0.0025, 0.005 และ 0.02 phr

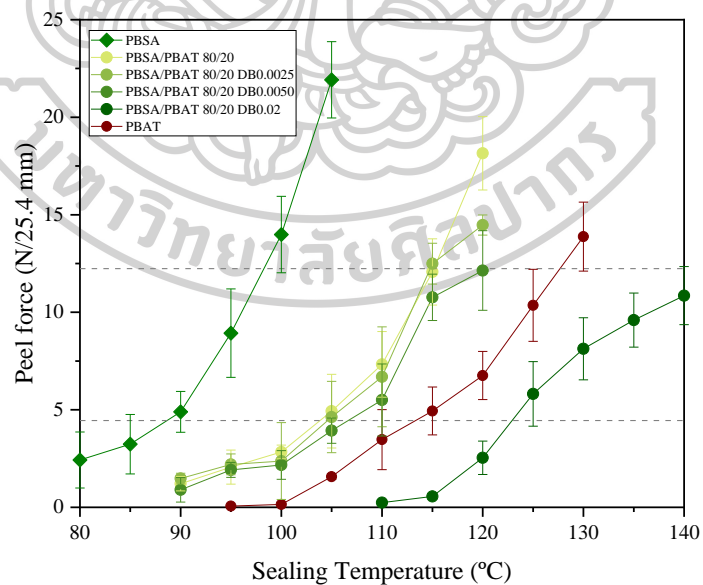
ตารางที่ 4.10 สมบัติเชิงกลของ PBS/PBAT 80/20 blend และ PBSA/PBAT 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DB 0.0025, 0.005 และ 0.02 phr

Sample	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile strength at break (MPa)
PBS/PBAT	249 ± 12.83	441.0 ± 81.49	35.8 ± 4.25
PBS/PBAT DB0.0025	301 ± 18.88	513.0 ± 61.94	34.4 ± 1.41
PBS/PBAT DB0.0050	291 ± 31.92	460.5 ± 16.48	33.7 ± 3.35
PBS/PBAT DB0.02	272 ± 11.66	433.3 ± 87.05	35.0 ± 3.35
PBSA/PBAT	112 ± 4.81	549.3 ± 19.31	21.7 ± 0.81
PBSA/PBAT DB0.0025	148 ± 5.60	673.1 ± 34.25	19.5 ± 1.03
PBSA/PBAT DB0.0050	144 ± 10.47	628.6 ± 32.04	20.2 ± 0.32
PBSA/PBAT DB0.02	116 ± 6.58	619.0 ± 26.84	23.2 ± 3.54

การศึกษาสมบัติเชิงกลหลังจากการลดปริมาณ peroxide ของการเบลนด์ PBS/PBAT และ PBSA/PBAT โดยลดปริมาณ DB พบว่าหลังจากการเบลนด์ที่มีการเติม DB ส่งผลให้ค่า Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้น และค่า Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์เฟสหลัก สำหรับ Tensile strength at break หลังจากการเบลนด์มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในขณะเดียวกันการเติม DB ในปริมาณที่สูงขึ้นจนกราฟค่าแรงบิดมีลักษณะของการ crosslink คล้ายยาง จะส่งผลให้แนวโน้มค่า Young's modulus มีค่าลดลง และค่า Elongation at break มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการเบลนด์โดยกราฟค่าแรงบิดไม่มีลักษณะของการ crosslink ซึ่งเกิด Partially crosslinked ระหว่างการผสม ดังนั้นการเติม DB ในปริมาณมากเกินไปจะทำให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBS/PBAT 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DB 0.0025, 0.005 และ 0.02 phr บน PBS blend sheet

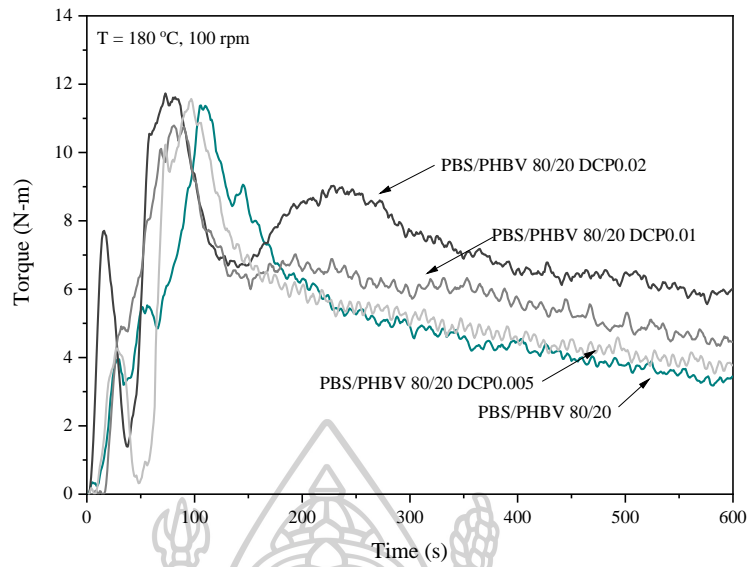


รูปที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBSA/PBAT 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DB 0.0025, 0.005 และ 0.02 phr บน PBS blend sheet

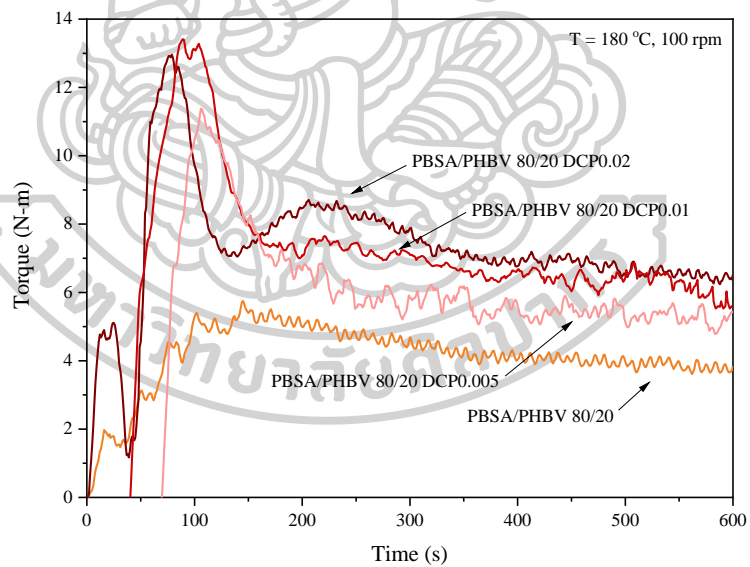
จากรูปที่ 4.34 และรูปที่ 4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการปิดผนึกของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มี PBS และ PBSA เป็นเฟสหลักเบลนด์กับ PBAT เป็นเฟสรอง โดยจะพิจารณาการเชื่อมขวางในสายโซ่ที่มากเกินไปจากการเติม DB ในปริมาณต่างๆ ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึก พบว่าการที่เติม DB ในปริมาณมากจะพบลักษณะของกราฟค่าแรงบิดมีการ crosslink คล้ายๆ ยังส่งผลต่อช่วง easy-open peel เลื่อนไปในทางที่อุณหภูมิการปิดผนึกสูงขึ้น นั่นก็คือการที่พอลิเมอร์เบลนด์มีการเชื่อมขวางที่สูงจะทำให้การปิดผนึกกับถาดนั้นยากขึ้น โดยเมื่อลดปริมาณ DB ลดลงก็จะสามารถทำให้ช่วง easy-open peel เลื่อนไปที่อุณหภูมิการปิดผนึกที่ลดลง

สำหรับการเบลนด์โดย PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PHBV เป็นเฟสรอง การที่เติม DB 0.02 phr จะไม่พบกราฟค่าแรงบิดมีการ crosslink แต่จะพบการเกิดการ crosslink เมื่อเปลี่ยนชนิดของ peroxide จาก DB เป็น DCP ในปริมาณที่เท่ากัน เนื่องจาก DB มีปริมาณ peroxide ที่น้อยกว่า DCP 40%

การติดตามค่าแรงบิดระหว่างการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 180 °C ความเร็วรอบในการผสม 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที การเบลนด์ที่มี PBS เป็นเฟสหลักเบลนด์กับ PHBV เป็นเฟสรองหลังจากที่เติม DCP ปริมาณเพิ่มขึ้น พบว่าค่าแรงบิดมีค่าสูงขึ้น โดยการที่เติม DCP 0.02 phr จะส่งผลให้กราฟมีลักษณะของการ crosslink คล้ายๆ ซึ่งการที่ลดปริมาณ DCP เหลือ 0.01 phr กราฟที่ได้ไม่มีลักษณะของการ crosslink แต่ค่าแรงบิดยังคงสูงกว่าเมื่อเทียบกับ non-reactive ในส่วนของ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักก็ให้ผลแนวโน้มเช่นเดียวกับ PBS เป็นเฟสหลัก ซึ่งปริมาณ DCP ที่ทำให้กราฟไม่เกิดลักษณะ crosslink คล้ายๆคือ 0.01 phr



รูปที่ 4.36 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมของ PBS/PHBV 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DCP 0.005, 0.01 และ 0.02 phr

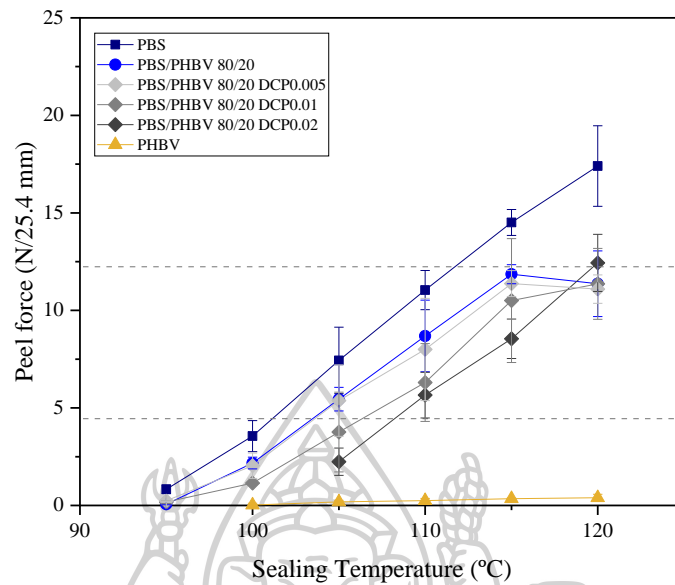


รูปที่ 4.37 ค่าแรงบิดระหว่างการผสมของ PBSA/PHBV 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DCP 0.005, 0.01 และ 0.02 phr

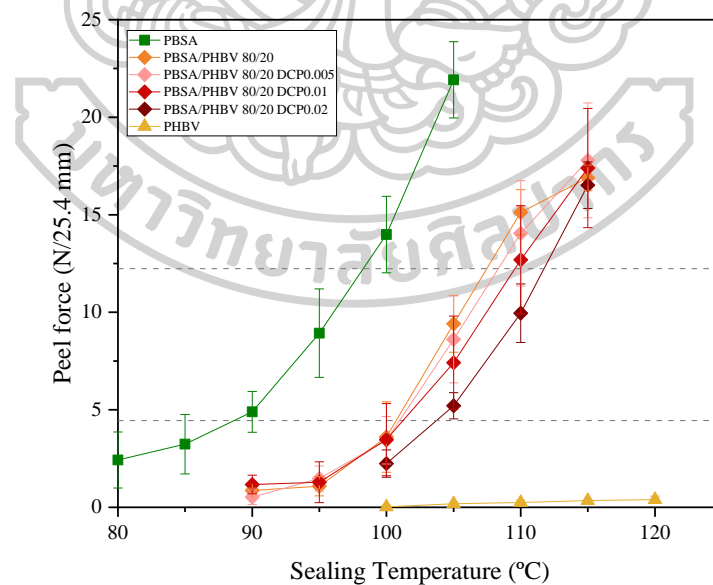
ตารางที่ 4.11 สมบัติเชิงกลของ PBS/PHBV 80/20 blend และ PBSA/PHBV 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DCP 0.005, 0.01 และ 0.02 phr

Sample	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile strength at break (MPa)
PBS/PHBV	507 ± 49.28	10.2 ± 3.29	27.7 ± 3.28
PBS/PHBV DCP0.005	624 ± 35.50	14.4 ± 1.71	31.5 ± 4.02
PBS/PHBV DCP0.01	755 ± 27.23	19.4 ± 2.10	30.5 ± 1.54
PBS/PHBV DCP0.02	663 ± 36.43	10.2 ± 2.46	29.2 ± 4.07
PBSA/PHBV	258 ± 43.46	11.7 ± 0.45	15.9 ± 1.05
PBSA/PHBV DCP0.005	319 ± 21.03	15.0 ± 0.87	21.4 ± 1.84
PBSA/PHBV DCP0.01	374 ± 11.20	21.1 ± 1.47	20.3 ± 1.85
PBSA/PHBV DCP0.02	255 ± 31.83	16.7 ± 2.63	16.8 ± 1.70

การศึกษาสมบัติเชิงกลหลังจากการลดปริมาณ peroxide ของการเบลนด์ PBS/PHBV และ PBSA/PHBV โดยลดปริมาณ DCP พบว่าหลังจากการเบลนด์ที่มีการเติม DCP ส่งผลให้ค่า Young's modulus และค่า Elongation at break มีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์เฟสหลักสำหรับ Tensile strength at break หลังจากการเบลนด์มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ในขณะเดียวกันการเติม DCP ในปริมาณที่สูงขึ้นจนกราฟค่าแรงบิดมีลักษณะของการ crosslink จะส่งผลให้แนวโน้มค่า Young's modulus และค่า Elongation at break มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการเบลนด์โดยกราฟค่าแรงบิดไม่มีลักษณะของการ crosslink ดังนั้นการเติม DCP ในปริมาณมากเกินไปจะทำให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง



รูปที่ 4.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBS/PHBV 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DCP 0.005, 0.01 และ 0.02 phr บน PBS blend sheet



รูปที่ 4.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการซีลของ PBSA/PHBV 80/20 blend ที่ไม่เติมและเติม DCP 0.005, 0.01 และ 0.02 phr บน PBS blend sheet



จากรูปที่ 4.38 และรูปที่ 4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Peel force กับอุณหภูมิที่ใช้ในการปิดผนึกของพอลิเมอร์เบลนด์ที่มี PBS และ PBSA เป็นเฟสหลักเบลนด์กับ PHBV เป็นเฟสรอง โดยจะพิจารณาการเชื่อมขวางในสายโซ่ที่มากเกินไปจากการเติม DCP ในปริมาณต่างๆ ที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึก พบว่าการที่เติม DCP ในปริมาณ 0.02 phr จะพบลักษณะของกราฟค่าแรงบิดมีการ crosslink คล้ายๆ และส่งผลต่อช่วง easy-open peel เลื่อนไปในทางที่อุณหภูมิการปิดผนึกสูงขึ้น ทำให้การปิดผนึกกับถาดนั้นยากขึ้น โดยเมื่อลดปริมาณ DCP เหลือ 0.01 phr ก็จะสามารถทำให้ช่วง easy-open peel เลื่อนไปที่อุณหภูมิการปิดผนึกที่ลดลงใกล้เคียงกับการเบลนด์แบบ non-reactive ในส่วนของพฤติกรรมของการลอกออกของฝากับถาดในช่วง easy-open peel ของ PBS และ PBSA เป็นเฟสหลักที่เบลนด์กับทั้ง PBAT หรือ PHBV เป็นเฟสรอง ทั้งที่เติมและไม่เติม peroxide พบว่ามีการลอกออกแบบ adhesive peel และ cohesive peel เมื่ออุณหภูมิการปิดผนึกสูงขึ้น ซึ่งโดยรวมพอลิเมอร์เบลนด์ฟิล์มจะสามารถลอกออกจากถาดได้ง่ายในขณะทดสอบ

เมื่อทำการเปรียบเทียบชนิด และปริมาณการเติม peroxide โดยพบว่าการใช้ทั้ง DB และ DCP จะทำให้พอลิเมอร์เบลนด์เฟสหลักเกิดการ crosslink เพื่อให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์เบลนด์สูงขึ้นทั้ง 2 ชนิด ซึ่งปริมาณในการเติมของ DB และ DCP จะแตกต่างกันโดยมีผลต่อการ crosslink มากหรือน้อย และความเหมาะสมในการใช้งาน peroxide ชนิด DB จะมีความเหมาะสมมากกว่า เนื่องจากการใช้ DCP เป็น peroxide มีข้อเสียโดยหลังจากการขึ้นรูปเป็นฟิล์มจะมีกลิ่นจาก DCP อยู่จึงไม่เหมาะกับบรรจุภัณฑ์ด้านอาหาร

**ตารางที่ 4.12** แสดงค่า Peel force และพฤติกรรมการลอกออกของฟลักซ์ในช่อง easy-open peel ของ PBS/PBAT และ PBS/PHBV blend ที่มีสารเติม peroxide ในปริมาณต่างๆ

Sample / Sealing Temperature (°C)	95	100	105	110	115	120	125	130	135
PBS/PBAT 80/20	0.05 ± 0.02	2.75 ± 0.60	4.10 ± 1.37	5.85 ± 1.05	9.17 ± 1.53	13.17 ± 1.64	15.93 ± 1.55		
PBS/PBAT 80/20 DB0.0025		2.69 ± 0.78	4.06 ± 1.43	4.87 ± 0.51	7.66 ± 0.22	8.71 ± 2.83	12.62 ± 1.05		
PBS/PBAT 80/20 DB0.005		1.76 ± 0.95	3.58 ± 0.57	4.80 ± 1.40	6.68 ± 1.87	7.31 ± 1.06	13.25 ± 1.22		
PBS/PBAT 80/20 DB0.02			0.29 ± 0.06	0.51 ± 0.06	1.41 ± 0.27	2.17 ± 0.56	5.84 ± 0.71	8.84 ± 0.81	11.37 ± 0.67
PBS/PHBV 80/20	0.07 ± 0.03	2.18 ± 0.30	5.45 ± 0.61	8.69 ± 1.84	11.86 ± 0.49	11.37 ± 1.68			
PBS/PHBV 80/20 DCP0.005	0.24 ± 0.03	2.04 ± 0.65	5.38 ± 1.83	7.99 ± 2.62	11.37 ± 0.67	11.09 ± 0.73			
PBS/PHBV 80/20 DCP0.01	0.17 ± 0.07	1.14 ± 0.08	3.76 ± 2.04	6.30 ± 1.99	10.50 ± 3.17	11.36 ± 1.82			
PBS/PHBV 80/20 DCP0.02			2.24 ± 0.70	5.66 ± 1.17	8.55 ± 1.01	12.44 ± 1.46	13.87 ± 1.10		

**ตารางที่ 4.13** แสดงค่า Peel force และพฤติกรรมการลอกออกของฟลักซ์ในช่อง easy-open peel ของ PBSA/PBAT และ PBSA/PHBV blend ที่มีสารเติม peroxide ในปริมาณต่างๆ

Sample / Sealing Temperature (°C)	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140
PBSA/PBAT 80/20	1.21 ± 0.37	2.06 ± 0.87	2.84 ± 0.35	4.93 ± 1.89	7.33 ± 1.68	12.07 ± 1.70	18.15 ± 1.88				
PBSA/PBAT 80/20 DB0.0025	1.48 ± 0.27	2.20 ± 0.54	2.37 ± 1.97	4.63 ± 1.83	6.69 ± 2.56	12.49 ± 1.05	14.47 ± 0.52				
PBSA/PBAT 80/20 DB0.005	0.90 ± 0.63	1.92 ± 0.38	2.17 ± 0.74	3.93 ± 0.64	5.51 ± 1.85	10.77 ± 1.19	12.14 ± 2.04				
PBSA/PBAT 80/20 DB0.02					0.24 ± 0.13	0.56 ± 0.14	2.54 ± 0.86	5.82 ± 1.66	8.13 ± 1.59	9.60 ± 1.38	10.86 ± 1.49
PBSA/PHBV 80/20	0.86 ± 0.12	1.09 ± 0.50	3.61 ± 1.81	9.41 ± 1.46	15.13 ± 1.16	16.89 ± 0.66					
PBSA/PHBV 80/20 DCP0.005	0.52 ± 0.37	1.48 ± 0.64	3.44 ± 1.22	8.61 ± 2.23	14.05 ± 2.70	17.79 ± 2.95					
PBSA/PHBV 80/20 DCP0.01	1.17 ± 0.48	1.29 ± 1.05	3.47 ± 1.85	7.41 ± 2.39	12.69 ± 2.77	17.40 ± 3.05					
PBSA/PHBV 80/20 DCP0.02			2.24 ± 0.70	5.20 ± 0.67	9.95 ± 1.50	16.52 ± 1.19					

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาฟิล์มพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักทำการเบลนด์กับทั้ง PBAT หรือ PHBV ซึ่งเป็นเฟสรองทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend และทำการศึกษสมบัติการต้านทานการซึมผ่านของออกซิเจนและไอน้ำ สมบัติเชิงกล และความแข็งแรงของการลอกออกหลังจากการปิดผนึกด้วยความร้อน (peel strength test) ของฝาปิดกับภาตบรรจุภัณฑ์

ในส่วนแรกเป็นศึกษาพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ทั้งในระบบ non-reactive blend และระบบ reactive blend โดยพบว่าการเบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PBAT เป็นเฟสรองผ่านปฏิกิริยา condensation โดยเติม ECE 0.1 phr เพียงพอที่จะปรับปรุงความเข้ากันได้ โดยลักษณะของกราฟค่าแรงบิดกับอุณหภูมิการเบลนด์ไม่เกิดลักษณะกราฟแรงบิด crosslink คล้ายกับยาง แต่สมบัติการซึมผ่านของออกซิเจนและไอน้ำไม่ได้ถูกปรับปรุง สำหรับสมบัติเชิงกลหลังจากการเบลนด์พบว่า Young's modulus มีค่าลดลงและค่า Elongation at break เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เฟสหลัก และ peel strength test หลังจากการเบลนด์พบว่ามีช่วง easy-open peel ที่กว้างขึ้น และเลื่อนไปที่อุณหภูมิในการซีลสูงขึ้น พฤติกรรมการลอกออกในช่วง easy-open peel เป็นแบบ adhesive peel และ cohesive peel ซึ่งสามารถลอกออกได้ง่าย

สำหรับการเบลนด์กับ PHBV เป็นเฟสรองผ่านปฏิกิริยาทั้ง 3 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยา free radical, ปฏิกิริยา condensation และปฏิกิริยารวมกันของ free radical + condensation ซึ่งการใช้ DB 0.02 phr เป็น peroxide พบว่าแนวโน้มของค่า OTR และ WVTR มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการเบลนด์แบบ non-reactive ซึ่งการเบลนด์แบบ reactive blend จะทำให้มีการปรับปรุง interfacial adhesion ระหว่างผิวสองเฟส และสมบัติเชิงกลหลังจากการเบลนด์กับ PHBV เปลี่ยนแปลงตามสมบัติเชิงกลของ PHBV โดยพอลิเมอร์เบลนด์กับ PHBV พบว่า Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้นและค่า Elongation at break ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์เฟสหลัก สำหรับ peel strength test ช่วง easy-open peel เลื่อนไปที่อุณหภูมิในการซีลสูงขึ้น และทั้ง PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับ PHBV มีพฤติกรรมการลอกออกในช่วง easy-open peel เป็นแบบ adhesive peel และ cohesive peel ซึ่งสามารถลอกออกได้ง่าย และเมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของ peroxide จาก DB เป็น DCP ในปริมาณที่เท่ากันพบว่าการซึมผ่านของออกซิเจนและไอน้ำไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ปริมาณการเติม peroxide ที่มากเกินไปจะเกิดการเชื่อมขวางในสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่ง

ส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลแย่งลง การซีลติดกับภาตได้ยากขึ้น ส่งผลให้ช่วง easy-open peel เลื่อนไป ในทางที่อุณหภูมิการซีลสูงขึ้น และการใช้ DCP เป็น peroxide มีข้อเสียโดยหลังจากการขึ้นรูปเป็นฟิล์มจะมีกลิ่นจากการเติม DCP หลงเหลืออยู่จึงไม่เหมาะกับบรรจุภัณฑ์ด้านอาหาร

ในส่วนที่สองเป็นการศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์เบลนด์โดยมี PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลักเบลนด์กับเฟสรอง PBAT หรือ PHBV ในระบบ reactive blend ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin-screw extruder) และขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มพลาสติก (cast film extruder) ซึ่งเป็นการศึกษาในระดับกึ่งอุตสาหกรรม พบว่าค่าอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนและไอน้ำ สมบัติเชิงกล และ peel strength test ให้ผลเป็นแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการทดลองในตอนแรก และเมื่อพิจารณาการลอกออกในช่วง easy-open peel ทั้ง PBS และ PBSA เป็นองค์ประกอบหลัก และที่เบลนด์กับ PBAT หรือ PHBV มีพฤติกรรมการลอกออกเป็นแบบ adhesive peel และ cohesive peel ซึ่งสามารถลอกออกได้ง่าย





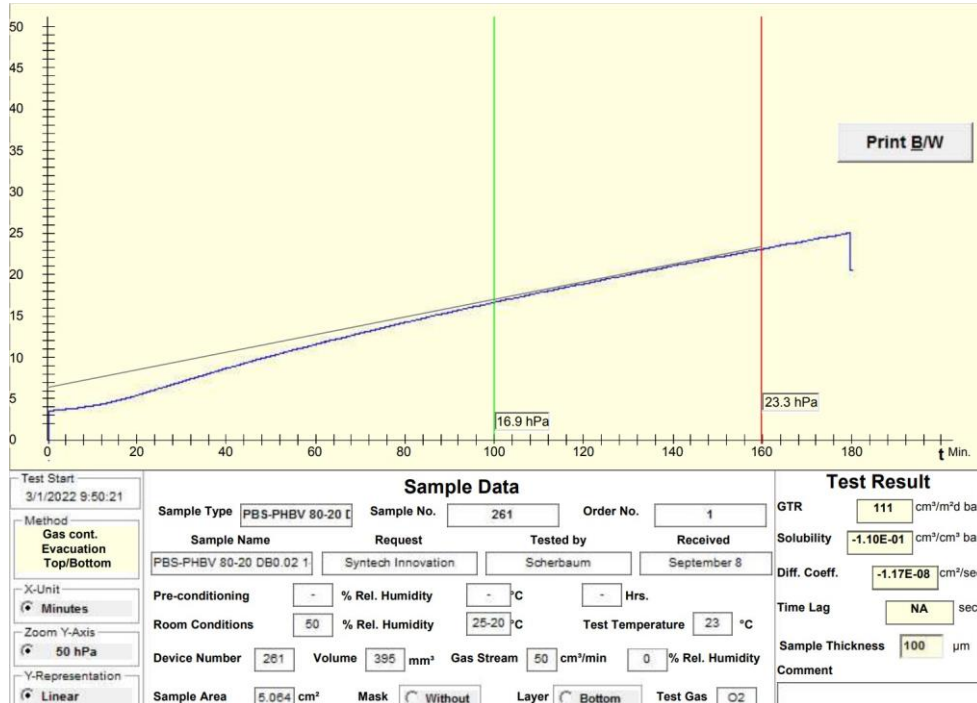
ภาคผนวก



ภาคผนวก ก.

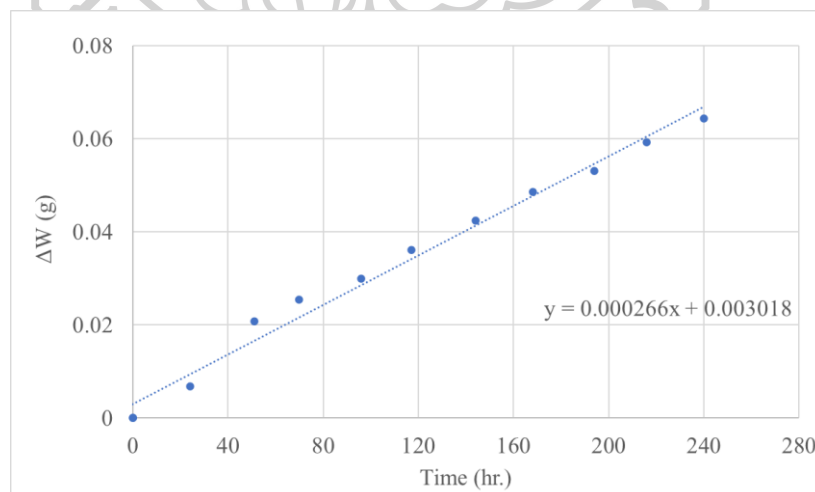
ข้อมูล และตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างผลจากการทดสอบอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen transmission rate ; OTR)



ภาคผนวก ก.1 ผลการทดสอบ Gas permeability tester (GTR) ด้วยก๊าซออกซิเจน ของ PBS/PHBV DB0.02

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor transmission rate ; WVTR)



ภาคผนวก ก.2 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณไอน้ำที่เพิ่มขึ้นกับเวลา ในช่วง 240 ชั่วโมง ของ PBS/PHBV DB0.02

สามารถคำนวณค่า WVTR ได้ตามสมการดังนี้

$$WVTR = \frac{\Delta W}{t A} \times 24$$

โดยที่ WVTR คือ อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ )

$\frac{\Delta W}{t}$  คือ ความชัน (slope) ของปริมาณไอน้ำที่เพิ่มขึ้นในหนึ่งหน่วยเวลา ( $\text{g/hr.}$ )

A คือ พื้นที่ผิวในการทดสอบของแผ่นฟิล์ม ซึ่งมีพื้นที่  $4.59 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

สามารถคำนวณค่า WVTR ของ PBS/PHBV DB0.02 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} WVTR_{\text{PBS/PHBV DB0.02}} &= \frac{0.000266}{4.59 \times 10^{-4}} \times 24 \\ &= 13.9084 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1} \end{aligned}$$







ภาคผนวก ข.  
การนำเสนอผลงานวิจัย

## Barrier and Seal Properties of Reactive Blending of Poly(butylene succinate) Based Blends

Pitakpong Kamrit<sup>1</sup>, Manus Seadan<sup>2</sup>, Supakij Suttiruengwong<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Sanam Chandra Palace Campus, Nakhon Pathom 73000, Thailand

<sup>2</sup>Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University, Sanam Chandra Palace Campus, Nakhon Pathom 73000, Thailand

\*Corresponding author e-mail: [suttiruengwong\\_s@su.ac.th](mailto:suttiruengwong_s@su.ac.th)

Received: 15 February 2022 / Revised: 27 April 2022 / Accepted: 26 May 2022

### Abstract

Poly Butylene Succinate (PBS) is one of the biodegradable polymers with good physical properties but its barrier properties such as the oxygen barrier are poor. The aim of this study was to investigate the barrier and seal properties of PBS by blending with biodegradable poly hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate (PHBV). PBS and PHBV (80/20 and 70/30 %w/w) with and without reactive agents were prepared using an internal mixer. Film specimens of 100 micrometers in thickness were prepared using compression molding. The morphology, barrier properties and peel-seal strength were investigated. Morphological observations using scanning electron microscope (SEM) showed an improved dispersion of PHBV in the blends after adding the reactive agents. The oxygen barrier and water vapor barrier were determined using ASTM D3985 and ASTM E96, respectively. The results showed that the addition of PHBV into the blend films led to lower OTR and WVTR when compared to the neat PBS. The addition of reactive agents can further improve the OTR and WVTR of PBS:PHBV blends due to the compact and dense structure of the films. Peel-seal behavior of the films was examined by the different sealing temperatures, which determined the failure mechanism after peeling. The blend films with reactive agents after sealing temperature between 105 and 115°C were peeled from the substrate with adhesive and cohesive failures showing the easy peel mode.

**Keywords:** Poly(butylene succinate), Poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate), Reactive blending film, Barrier properties, Peelable film

### 1. Introduction

The growing environmental concern on plastic pollution has gained global attention. It was reported that more than 340 million tons of plastic waste were generated around the world, with around 46% of this waste from the packaging sector in 2018 (Wu, Misra, & Mohanty, 2021). For the food packaging applications, it is a single-use packaging alone that generates a large amount of plastic wastes. Amongst these, the plastic top seal for sealing trays is one of the interesting items, which is difficult to be replaced with the sustainable option. Top seal is mostly made from non-biodegradable polyolefins and poly(ethylene terephthalate) (PET) or even multilayer films. They are not easily recycled and

usually sent to landfills after using. With the high material property requirements of these plastics including a light weight (micro-scale thickness), high toughness, complex structures (multi-layer) and contamination due to direct contact with foods (Wu et al., 2021), the collection, separation and recycle are very complicated. Urgent efforts are directed towards finding alternative solutions, including the use of renewable, biobased, and biodegradable plastics (Rodriguez-Urbe et al., 2021). One of the options can be the compostable plastics as they offer the composting option, especially for a food contact packaging, where recycling was complexed by the economics of scale and waste management. For food packaging uses, the poor water vapor and gas barrier properties of most biodegradable plastics are the

Available online at <http://www.ssstj.sci.ssrui.ac.th>

**Suan Sunandha Science and Technology Journal**  
©2022 Faculty of Science and Technology, Suan Sunandha Rajabhat University

major limitations for top seal applications. The main approach to improve this performance of biodegradable plastics includes polymer blending. The method is easily adopted in the industrial processes (Wu et al., 2021).

Poly butylene succinate or PBS is one of the biodegradable aliphatic polyester and is synthesized from 1,4-butanediol and succinic acid monomers by the polycondensation reaction. PBS has mechanical properties comparable to polyolefins like polyethylene (PE) and polypropylene (PP) (Muthuraj, Misra, & Mohanty, 2017). On the other hand, the disadvantage of PBS with packaging application is its poor barrier to moisture and oxygen (Rodriguez-Uribe et al., 2021). A study conducted by V. Siracusa et al. (Siracusa, Lotti, Munari, & Dalla Rosa, 2015) reported the oxygen transmission rate (OTR) of PBS films prepared by compression molding and with a thickness of 144.7  $\mu\text{m}$  was  $\sim 281 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ . J. Xu (Xu, 2015) reported the water vapor transmission rate (WVTR) of PBS films made by using hot-press and with a thickness of 51  $\mu\text{m}$  was  $83.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ . To obtain high oxygen/water vapor barrier blends, one component with a high barrier should be incorporated. Accordingly, the polymer blending by high barrier properties materials can result in products with better barrier properties. Among biopolymers, Polyhydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate (PHBV) as a family of Polyhydroxyalkanoates (PHAs) has relatively high barrier properties and proven biodegradability has attracted the attention of the packaging application. This group of polymer is a polyester derived from microorganism, including bacterial fermentation of starting raw sugars or lipids (Nuchanong, Seadan, Khankrua, & Suttirueangwong, 2021; Rodriguez-Uribe et al., 2021). Since the oxygen barrier of PHBV is much better than most biopolymers such as PBS, Polylactic acid (PLA), Polycaprolactone (PCL), and some commodity polymers such as PP and PE, it is a good candidate for blending. This polymer is however still very expensive. Although the water vapor barrier of PHBV was inferior to that of PP and PE, it is clearly better than that of biodegradable polyesters such as PBS, PLA, PBAT and PCL

(Rodriguez-Uribe et al., 2021). Thus, PHBV can help to enhance the barrier properties of biopolymer blends. The poor barrier of PLA films has been found to improve with the addition of PHBV by I. Zembouai et al. (Zembouai et al., 2013). The OTR of PLA was decreased by about 35.3, 43.2 and 81.5% with the addition of 25, 50 and 75 wt% of PHBV for PHBV/PLA blend, respectively. On the other hand, the value of WVTR of PLA was decreased by about 22.7, 36.6 and 58.9% by addition of 25, 50 and 75 wt% of PHBV, respectively. M. Cunha et al. (Cunha, Fernandes, Covas, Vicente, & Hilliou, 2016) studied the melt blended PHBV/PBAT (70/30). It was reported that WVP of the film was close to PHBV, but the elongation at break of the film showed the low flexibility. The compatibility between PBS and PHBV was poor, resulting in relatively large particle size and a weak interfacial adhesion in their blends by Y.J. Phua et al. (Phua, Pegoretti, Medeiros Araujo, & Mohd Ishak, 2015) and P. Ma. et al. (Ma, Hristova-Bogaerds, Lemstra, Zhang, & Wang, 2012). Certain compatibility needs to be introduced into the blend system in order to acquire better performance. To achieve oxygen/water vapor barrier and mechanical balance in biodegradable polymer blends, effective compatibilizers were normally applied (Wu et al., 2021).

Therefore, the objective of this work was to study the addition of reactive compatibilizer in 80/20 and 70/30 wt% of PBS and PHBV blend. The polymer blend with and without reactive compatibilizer was evaluated by oxygen transmission rate (OTR), water vapor transmission rate (WVTR) and seal strength test for study the possibility to use with top seal application.

## 2. Materials and Methods

A commercial grade polybutylene succinate (PBS) FZ91PM with MFR 5 g/10 min, density 1.26  $\text{g}/\text{cm}^3$ , melting temperature around 115°C was purchased from PTT MCC Biochem Co. Ltd. (Thailand). Polyhydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate (PHBV) Enmat Y1000P with 3 mol% hydroxyvalerate (HV) content was purchased from Tianan Biologic Material Co. (Ningbo, P. R. China). It

Available online at <http://www.ssstj.sci.ssrui.ac.th>

**Suan Sunandha Science and Technology Journal**  
©2022 Faculty of Science and Technology, Suan Sunandha Rajabhat University

has the density of  $1.25 \text{ g/cm}^3$ , melting temperature around  $175\text{-}180^\circ\text{C}$ . Multi-functional epoxy chain extender (ECE) Joncryl ADR 4468 in solid flake form with epoxy equivalent weight  $310 \text{ g/mol}$  was purchased from BASF Co., Ltd.

### 2.1 Blend preparation

PBS and PHBV pellets were dried at  $60^\circ\text{C}$  overnight before further use. The ratios of PBS and PHBV were 80:20 and 70:30 by weight. For reactive blending, PBS/PHBV with various contents of ECE were studied at 0.1, 0.2 and 0.3 phr. PBS/PHBV blends with and without reactive agents were melt-blended using an internal mixer at  $180^\circ\text{C}$  with rotor speed of 100 rpm for 10 min. Films were prepared using compression molding at  $190^\circ\text{C}$  for 3 min to obtain films of about  $100 \mu\text{m}$  thickness.

### 2.2 Characterization

**Scanning electron microscopy (SEM).** To investigate the morphology of PBS/PHBV blends with and without reactive agents, all blended samples were cryo-fractured in liquid nitrogen and sputter coated with Au/Pd. The fracture surface was investigated by Field emission scanning electron microscopy (FESEM) (MIRA3, TESCAN) with a chamber pressure  $<0.009 \text{ Pa}$  under high vacuum mode. A  $2500\times$  magnification was used for all samples.

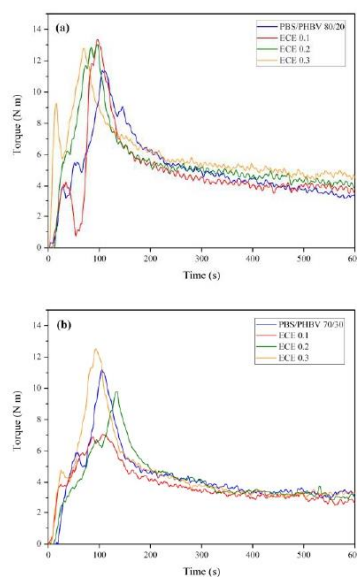
**Oxygen transmission rate (OTR).** The oxygen transmission rate (OTR) was carried out according to ASTM D3985 using Gas Permeability Tester (type GDP-C, Brugger Feinmechanik GmbH). OTR measurements were performed at  $23^\circ\text{C}$  at 50% of RH, and the results were expressed in  $\text{cm}^3\cdot\text{m}^2\cdot\text{day}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$ .

**Water vapor transmission rate (WVTR).** The water vapor transmission rate (WVTR) of the film samples was studied using the "Cup method" referring to ASTM E96. Silica gel was used as a desiccating agent, and the cups had a specific exchange surface of  $S = 4.59 \text{ cm}^2$ . The experimental setting consists of a cylindrical vessel filled with a desiccating agent and sealed with the investigated

film. The mass increase in the cups, due to the water absorption of silica gel, was plotted against time. The WVTR was calculated from the slope of the mass uptake of desiccating agent profile versus time at  $23^\circ\text{C}$  at 75% of RH, and the results were expressed in  $\text{g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{day}^{-1}$ .

**Seal-Peel test.** Heat sealing process involves sealing temperature between  $95$  and  $110^\circ\text{C}$  and sealing time  $8 \text{ s}$  ( $18 \text{ rpm}$ ) were directly set on a continuous sealing machine (BSV-5I, Tupack Co., Ltd.). All of the films were sealed on a PBS blend sheet. The sheet prepared from PBS/PLA/PBAT was about  $800 \mu\text{m}$  thickness to imitate the container rim or the tray's lip. Peel strength of films was measured by a supported  $180^\circ$  test (Technique C) according to ASTM F88. The grip distance and peeling rate was  $25.4 \text{ mm}$  and  $200 \text{ mm}\cdot\text{min}$ , respectively. The testing machine was a universal testing machine (NRTS500-5B, Narin instrument Co., Ltd.) with a load cell of  $5 \text{ kN}$ . Peel strength values were the average values of five repeated measurements.

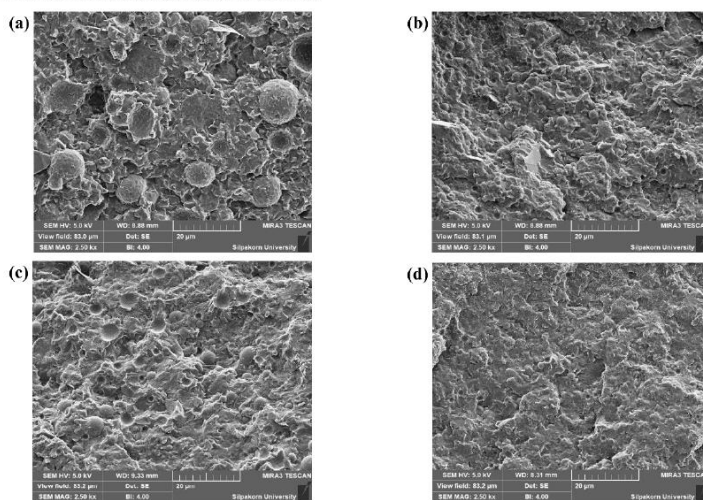
### 3. Results and Discussion



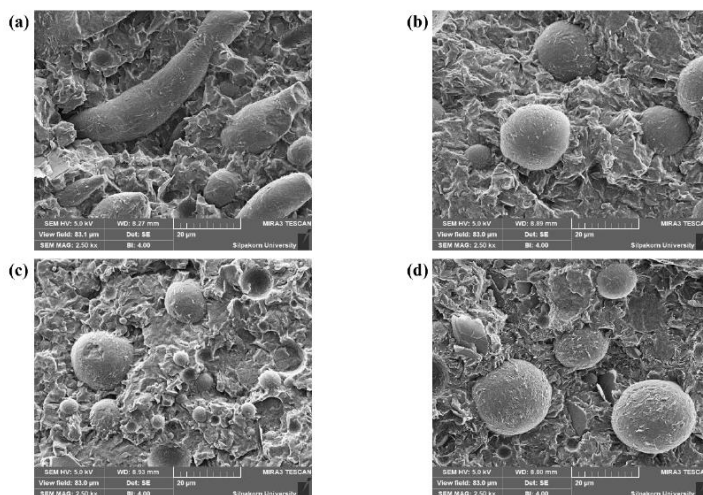
**Figure 1.** Mixing torques of PBS/PHBV (a) 80/20 (b) 70/30 blend with and without reactive agents at 180°C and rate 100 rpm

**Mixing torque values.** The mixing torque of the internal mixer can be related to the molten polymer viscosity. The evolution of PBS/PHBV 80/20, 70/30 blend with and without reactive agents mixing torque curves is shown in Figure 1. The mixing torque curve of the non-reactive PBS/PHBV 80/20 blend is lower than that of the reactive PBS/PHBV 80/20 blend as a result of the reaction between ECE epoxide group and carboxylic end group of polyester through condensation reaction, indicating some degree of chemical reaction. This finding is consistent with other researches that also modified

polyester through condensation reaction (Nanthananon, Seadan, Pivsa-Art, Hiroyuki, & Suttiruengwong, 2017; Nuchanong et al., 2021; Suttiruengwong, 2021; Yang, Xin, Mughal, Li, & He, 2017). The reactive epoxide groups can react with carbonyl groups in both polyesters to form copolymer, leading to better compatibility between two polymers. For PBS/PHBV 70/30 blend (Figure 1 b), the mixing torque was not different when adding and increasing ECE contents. The reason for this might be the expense of two or more competing reactions of PHBV, such as the competition between the degradation reaction and condensation reaction (Nuchanong et al., 2021). Therefore, the change in the viscosity of the melt is not pronounced.



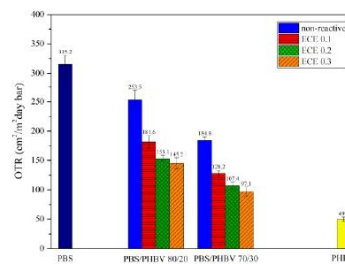
**Figure 2.** SEM micrographs of cryo-fracture surface of (a) non-reactive PBS/PHBV 80/20 and reactive PBS/PHBV 80/20 with ECE (b) 0.1, (c) 0.2 and (d) 0.3 phr



**Figure 3.** SEM micrographs of cryo-fracture surface of (a) non-reactive PBS/PHBV 70/30 and reactive PBS/PHBV 70/30 with ECE (b) 0.1, (c) 0.2 and (d) 0.3 phr

**Morphological observation.** The micrographs of the PBS/PHBV blends are studied by SEM. Figure 2 shows the SEM micrographs of the cryo-fractured surface of the non-reactive and reactive PBS/PHBV (80/20) blends. The physical PBS/PHBV blends (Figure 2 a) shows that PHBV droplets are dispersed in the PBS matrix with an average droplet size of about 10  $\mu\text{m}$ . After addition of ECE to the PBS/PHBV blends (Figure 2 b - d), the sizes of PHBV droplets are smaller than non-reactive one. The particle sizes are about 2  $\mu\text{m}$ . It is evident that there was a reaction through the condensation reaction when adding ECE into the blends. Similar observation was made by I. Zembouai et al. (Zembouai et al., 2013). They reported that PHBV and PLA form mainly a two phase-system. In the 25/75 blend, the phase was formed by PHBV and the inclusions (bead-shaped) were PLA domains. P. Ma and coworker (Ma et al., 2012) also reported after adding of the reactive agent to the PHBV/PBS melts, which acted as compatibilizer between PHBV and PBS and a network consisting of both PHBV and PBS were formed.

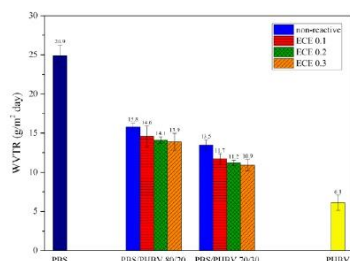
In case of the cryo-fractured surfaces of PBS/PHBV (70/30), PHBV is typically dispersed in a form of the filament in the PBS matrix as shown in Figure 3 a. In Figure 3 b, PBS/PHBV (70/30) blend with the addition of the reactive agent showed the spherical particles instead of the filament shape. The filament changes to spherical droplets with a larger particle size of about 20  $\mu\text{m}$  and the smaller about 4-5  $\mu\text{m}$ . The interfacial adhesion between both polymers for both compositions of the blends as depicted in Figure 3 c and Figure 3 d after adding ECE.



**Figure 4.** Oxygen transmission rate (OTR) of PBS/PHBV blend with and without reactive agents

**Barrier properties.** Gas barrier properties of PBS/PHBV blends were investigated by means of oxygen and water vapor transmission rate tests. Evaluations were performed on compressed films with thickness about 100  $\mu\text{m}$ . Similar trends are observed for both gas permeation evolutions as a function of compositions.

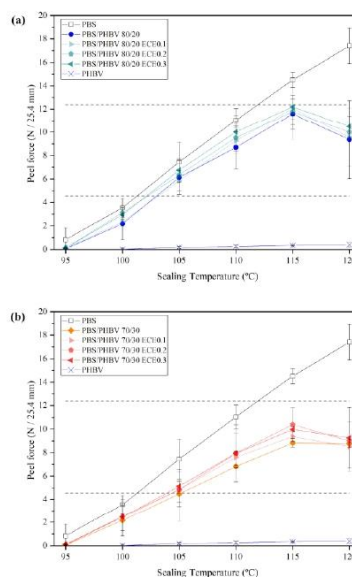
**Oxygen transmission rate (OTR).** The results are depicted in Figure 4 PHBV possesses a good oxygen barrier when compared to PBS. OTR values of PBS/PHBV blend are decreased with increasing PHBV contents in the blends. When adding ECE, the OTR value decreased furthermore when compared to non-reactive PBS/PHBV blends. OTRs of PBS/PHBV 80/20 and 70/30 blend are improved by 54 and 69.2% after the addition of ECE 0.3 phr, respectively compared with that of PBS. The reason for this is still unknown. This shows clearly the role of PHBV as an efficient barrier promoter for PBS, even at the low content. The lower OTR values obtained after adding ECE suggest an improved interfacial adhesion between both polymers helps create the compact and dense structure of the films (Chinga-Carrasco & Syverud, 2012).



**Figure 5.** Water vapor transmission rate (WVTR) of PBS/PHBV blend with and without reactive agents.

**Water vapor transmission rate (WVTR).** WVTR results are presented in Figure 5. It is seen that by increasing PHBV contents the water vapor barrier was better when compared to PBS alone. PBS/PHBV blends show the decrease in WVTR values with increasing PHBV contents. Moreover,

OTR of reactive PBS/PHBV blends exhibit lower than that of non-reactive blends. WVTR values of PBS/PHBV 80/20 and 70/30 blend compared with PBS are improved by 44 and 55.6% after the addition of ECE 0.3 phr, respectively. The incorporation of PHBV can improve the moisture barrier properties of PBS. This was also in good agreement with I. Zembouai (Zembouai et al., 2013), who reported the barrier property of PHBV and PLA blend. After improving the barrier properties of the blends, it was found that barrier properties lied between PLA and PHBV barrier properties. It was reported that the decrease in barrier properties as crystallinity increased was mainly explained by two factors. The first was the inclusion of impermeable crystallites which decreases the amount of amorphous phase through which the gas molecules can permeate. The second was that impermeable crystals increase the tortuosity of the transport path (Zembouai et al., 2013).



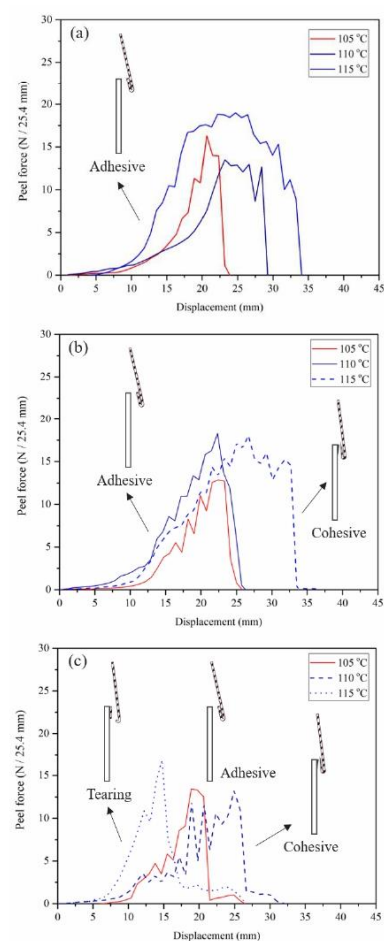
**Figure 6.** Peel force of (a) PBS/PHBV 80/20 blends and (b) PBS/PHBV 70/30 blends with and without

ECE in different sealing temperatures on PBS blends sheet

**Seal/Peel test.** In this research, PBS/PHBV films were fabricated and used to investigate the peel properties as for an easy-peel range application. The peel force of the film sealed on the prepared PBS blend sheet was carried out to evaluate the interaction between PBS/PHBV films and PBS blend sheet. From the seal and Peel test shown in Figure 6, Peel force tends to decrease with increasing PHBV contents. The compact and dense structure of the films could be the reason for this. On the other hand, depending on the preparation of the films in this case the compression molding was used, PHBV minor phases can reside at the surface because of its low interaction with PBS (Liewchirakorn, Aht-ong, & Chinsirikul, 2017). Since the heat seal was studied, optimum heat seal temperatures of some of the blends may fall out of this range. Therefore, the blends could be used in packaging applications with easy-open peelable features (in-dash lines), which have a peel force of 4.45-12.24 N/25.4 mm (1 to 2.75 lb/in as reported by reported by J. Zhang et al., (Diaz, Pao, & Kim, 2016; Zhang et al., 2009). However, all blends film at sealing temperature 105 and 115°C had a tendency to be used as peelable film for easy-peel films.

Peel-seal behaviors in easy-peel range with different sealing temperatures (105-115°C) peeling film from PBS blend sheet substrate (800 µm). Three types of the film's failure (Liewchirakorn et al., 2017) observed in this study are schematically illustrated in Figure 7 a to c. Adhesive failure was found in sealed PBS/PHBV 80/20 blend at 105-110 °C sealing temperatures and in 70/30 blend at 105 °C sealing temperatures on PBS blend substrate. This failure is located at the interface between the film and substrate, resulting in the lowest peel force values. For the cohesive failure, the film tends to peel off from the substrate and peel advances during the test. There is some residue observed on both peeled surfaces of PBS blend substrate and PBS/PHBV blend films. This found in the case of the PBS/PHBV 80/20 and 70/30 blend films were sealed at 115°C,

110°C, respectively. The films demonstrate tearing failures at a high sealing temperature of 115°C. PBS/PHBV 70/30 blend films exhibit the complete tear. This tearing failure means no peel during the peeling process due to a high seal force between film and substrate (or seal strength is higher than the inherent tensile strength of the film).



**Figure 7.** Typical peel failure curve of (a) PBS, PBS/PHBV blends (b) 80/20 and (c) 70/30 in different sealing temperatures on PBS blends sheet



#### 4. Conclusions

Biodegradable PBS and PHBV blends were prepared by melt mixing with and without ECE. Film specimens were prepared using compression molding. The SEM images indicated the decreased PHBV dispersed phase as well as improved interfacial adhesion after adding ECE in PBS/PHBV blends, indicating improved compatibility between these polymers. The addition of PHBV into the blend films without ECE altered the barrier properties, where the decrease in both OTR and WVTR when compared with the neat PBS was observed. Meanwhile, the addition of ECE can further improve the OTR and WVTR of PBS/PHBV blends due to the compact and dense structure of the films. PHBV could act as an efficient barrier promoter for PBS. For the seal-peel strength test, after sealing temperature between 105 and 115°C that exhibited easy-peel characteristics. Peel-seal behaviors in an easy-peel range were peeled from the PBS blend substrate, adhesive and cohesive failures were apparent during the peeling process. It can be concluded that the blend film with PHBV minor phase with ECE can be used for top seal application.

#### 5. Acknowledgement

The authors greatly acknowledge the financial support provided by the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University.

#### 6. References

- Chinga-Carrasco, G., & Syverud, K. (2012). On the structure and oxygen transmission rate of biodegradable cellulose nanobarriers. *Nanoscale Research Letters*, 7(1), 192. doi:10.1186/1556-276X-7-192
- Cunha, M., Fernandes, B., Covas, J. A., Vicente, A. A., & Hilliou, L. (2016). Film blowing of PHBV blends and PHBV-based multilayers for the production of biodegradable packages. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(2). doi:10.1002/app.42165
- Diaz, C., Pao, H. Y., & Kim, S. (2016). Film performance of poly(lactic acid) blends for packaging applications. *Journal of Applied Packaging Research*, 8, 4.
- Liewchirakorn, P., Aht-ong, D., & Chinsirikul, W. (2017). Practical approach in developing desirable peel-seal and clear lidding films based on poly(lactic acid) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends. *Packaging Technology and Science*, 31. doi:10.1002/pts.2321
- Ma, P., Hristova-Bogaerds, D. G., Lemstra, P. J., Zhang, Y., & Wang, S. (2012). Toughening of PHBV/PBS and PHB/PBS blends via in situ compatibilization using dicumyl peroxide as a free-radical grafting initiator. *Macromolecular Materials and Engineering*, 297(5), 402-410. doi:10.1002/mame.201100224
- Muthuraj, R., Misra, M., & Mohanty, A. (2017). Biodegradable compatibilized polymer blends for packaging applications: A literature review. *Journal of Applied Polymer Science*, 135. doi:10.1002/app.45726
- Nanthananon, P., Seadan, M., Pivsa-Art, S., Hiroyuki, H., & Suttiruengwong, S. (2017). Biodegradable polyesters reinforced with eucalyptus fiber: Effect of reactive agents. *AIP Conference Proceedings*, 1914(1), 070012. doi:10.1063/1.5016739
- Nuchanong, P., Seadan, M., Khankrua, R., & Suttiruengwong, S. (2021). Thermal stability enhancement of poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate) through in situ reaction. *Designed Monomers and Polymers*, 24(1), 113-124. doi:10.1080/15685551.2021.1914406
- Phua, Y. J., Pegoretti, A., Medeiros Araujo, T., & Mohd Ishak, Z. A. (2015). Mechanical and thermal properties of poly(butylene succinate)/poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) biodegradable blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(47). doi:10.1002/app.42815
- Phuangmali, I., Seadan, M., Khankrua, R., & Suttiruengwong, S. (2021). Reactive compatibilization of poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate)/poly(vinyl alcohol) blends. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 60(13), 1461-1473. doi:10.1080/25740881.2021.1918162

Available online at <http://www.ssstj.sci.sru.ac.th>

**Suan Sunandha Science and Technology Journal**  
©2022 Faculty of Science and Technology, Suan Sunandha Rajabhat University

- Rodriguez-Uribe, A., Wang, T., Pal, A. K., Wu, F., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2021). Injection moldable hybrid sustainable composites of BioPBS and PHBV reinforced with talc and starch as potential alternatives to single-use plastic packaging. *Composites Part C: Open Access*, 6, 100201. doi:10.1016/j.jcomc.2021.100201
- Siracusa, V., Lotti, N., Munari, A., & Dalla Rosa, M. (2015). Poly(butylene succinate) and poly(butylene succinate-co-adipate) for food packaging applications: Gas barrier properties after stressed treatments. *Polymer Degradation and Stability*, 119, 35-45. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2015.04.026
- Wu, F., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2021). Challenges and new opportunities on barrier performance of biodegradable polymers for sustainable packaging. *Progress in Polymer Science*, 117. doi:10.1016/j.progpolymsci.2021.101395
- Xu, J. (2015). *Biobased nanocomposites for packaging applications - synthesis using melt extrusion of poly (lactic acid), poly (butylene succinate) and/or starch blended with natural nanofillers* (Master's thesis). Kansas State University. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2097/20561>
- Yang, Z., Xin, C., Mughal, W., Li, X., & He, Y. (2017). High-melt-elasticity poly(ethylene terephthalate) produced by reactive extrusion with a multi-functional epoxide for foaming. *Journal of Applied Polymer Science*, 135, 45805. doi:10.1002/app.45805
- Zembouai, I., Kaci, M., Bruzaud, S., Benhamida, A., Corre, Y.-M., & Grohens, Y. (2013). A study of morphological, thermal, rheological and barrier properties of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)/polylactide blends prepared by melt mixing. *Polymer Testing*, 32(5), 842-851. doi:10.1016/j.polymertesting.2013.04.004
- Zhang, J., Manias, E., Polizos, G., Huh, J.-Y., Ophir, A., Songtipya, P., & Jimenez-Gasco, M. d. M. (2009). Tailored polyethylene nanocomposite sealants: Broad-range peelable heat-seals through designed filler-polymer interfaces. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23(5), 709-737. doi:10.1163/156856108X379182

## รายการอ้างอิง

1. Wu, F., M. Misra, and A.K. Mohanty, *Challenges and new opportunities on barrier performance of biodegradable polymers for sustainable packaging*. Progress in Polymer Science, 2021. 117: p. 101395.
2. Muthuraj, R., M. Misra, and A. Mohanty, *Biodegradable compatibilized polymer blends for packaging applications: A literature review*. Journal of Applied Polymer Science, 2017. 2017.
3. ณัฐกานต์ ยังชีพยืนอยู่ดี, การพัฒนาฟิล์มบรรจุภัณฑ์อาหารที่ต้านทานแบคทีเรียจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท. 2560, สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
4. Kijchavengkul, T., et al., *Biodegradation and hydrolysis rate of aliphatic aromatic polyester*. Polymer Degradation and Stability, 2010. 95: p. 2641-2647.
5. พงศกร นุชนงค์, การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการศึกษาความเสถียรทางความร้อนของ PHBV ด้วยวิธีไบโอพอลิเมอร์เบลนด์และพอลิเมอร์คอมโพสิต. 2563, สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
6. Raza, Z.A., S. Abid, and I.M. Banat, *Polyhydroxyalkanoates: Characteristics, production, recent developments and applications*. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018. 126: p. 45-56.
7. สมจิตต์ ตั้งชัยวัฒนา. พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) 2548; Available from: [http://www.dss.go.th/images/st-article/cp\\_5\\_2548\\_polymer\\_blend.pdf](http://www.dss.go.th/images/st-article/cp_5_2548_polymer_blend.pdf).
8. เบลูจมาศ ปั้นหยัด, การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการลามไฟของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตสำหรับใช้ทำกรอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์. 2554, สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
9. Bicerano, J. *A Practical Guide to Polymeric Compatibilizers for Polymer Blends*. 2018; Available from: <https://studylib.net/doc/7576937/a-practical-guide-to-polymeric-compatibilizers-for-polyme...>
10. Wang, J., et al., *Moisture and Oxygen Barrier Properties of Cellulose Nanomaterial-Based Films*. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018. 6(1): p. 49-70.

11. Singha, S. and M.S. Hedenqvist, *A Review on Barrier Properties of Poly(Lactic Acid)/Clay Nanocomposites*. *Polymers*, 2020. 12(5): p. 1095.
12. Huang, Y. and D.R. Paul, *Effect of Film Thickness on the Gas-Permeation Characteristics of Glassy Polymer Membranes*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007. 46(8): p. 2342-2347.
13. Yuniarto, K., et al., *Journal of Applied Packaging Research Effect of Plasticizer on Oxygen Permeability of Cast Polylactic acid (PLA) Films Determined using Dynamic Accumulation Method Recommended Citation*. 2014. 6.
14. Armor Protective Packaging®, *POLYETHYLENE VCI FILM THICKNESS AND CORROSION PREVENTION*. 2013; Available from: <https://www.armorvci.com/newsletters/corrosioncollegejanuary2013.html>.
15. Stolberg, T., *Applicability of bio-based polymer packaging in the meal kit context - A case study with HelloFresh*. 2019, Division of Packaging Logistics Department of Design Sciences Faculty of Engineering LTH, Lund University.
16. Lagaron, J.M., R. Catalá, and R. Gavara, *Structural characteristics defining high barrier properties in polymeric materials*. *Materials Science and Technology*, 2004. 20(1): p. 1-7.
17. Palai, B., S. Mohanty, and S.K. Nayak, *Synergistic effect of polylactic acid(PLA) and Poly(butylene succinate-co-adipate) (PBSA) based sustainable, reactive, super toughened eco-composite blown films for flexible packaging applications*. *Polymer Testing*, 2020. 83: p. 106130.
18. Cunha, M., et al., *Film blowing of PHBV blends and PHBV-based multilayers for the production of biodegradable packages*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016. 133(2).
19. Zembouai, I., et al., *A study of morphological, thermal, rheological and barrier properties of Poly(3-hydroxybutyrate-Co-3-Hydroxyvalerate)/polylactide blends prepared by melt mixing*. *Polymer Testing*, 2013. 32(5): p. 842-851.
20. Sun, Q., et al., *Novel Biodegradable Cast Film from Carbon Dioxide Based Copolymer and Poly(Lactic Acid)*. *Journal of Polymers and the Environment*, 2016. 24(1): p. 23-36.
21. Liewchirakorn, P., D. Aht-Ong, and W. Chinsirikul, *Practical Approach in*

- Developing Desirable Peel–Seal and Clear Lidding Films Based on Poly(Lactic Acid) and Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) Blends*. *Packaging Technology and Science*, 2018. 31(5): p. 296-309.
22. Zhang, J., et al., *Tailored Polyethylene Nanocomposite Sealants: Broad-Range Peelable Heat-Seals Through Designed Filler/Polymer Interfaces*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2009. 23(5): p. 709-737.
23. Almasi, B.G.a.H., *Biodegradation - Life of Science*, ed. R.C.a.F. Rosenkranz. 2013. 380.
24. Liu, Q., et al., *Poly(3-hydroxybutyrate) and Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate): Structure, Property, and Fiber*. *International Journal of Polymer Science*, 2014. 2014: p. 374368.
25. Nouryon. *Perkadox 14-40K-PD-S*. Available from: <https://www.nouryon.com/globalassets/inriver/resources/pds-perkadox-14-40k-pd-s-polymer-crosslinking-glo-en.pdf>.
26. Seadan, M., *Reactivite radicalaire a l'interface de polymeres immiscibles fondus*, in *Sciences appliquées*. 1992, University of Strasbourg.
27. Deanin, R.D., *Plastics additives handbook, second edition*, R. Gächter and H. Müller, eds., Hanser Publishers, Macmillan, 1988, 754 pp. *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Letters*, 1989. 27(5): p. 178-179.
28. Sigma-Aldrich. *Dicumyl peroxide*. Available from: <https://www.sigmaaldrich.com/TH/en/product/aldrich/329541>.
29. Dörr, D., U. Kuhn, and V. Altstädt, *Rheological Study of Gelation and Crosslinking in Chemical Modified Polyamide 12 Using a Multiwave Technique*. *Polymers*, 2020. 12(4): p. 855.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พิทักษ์พงศ์ คำฤทธิ์
วัน เดือน ปี เกิด	3 ตุลาคม 2539
สถานที่เกิด	จังหวัดเชียงใหม่
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2557 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนจักรคำคณาทร จังหวัดลำพูน พ.ศ. 2561 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม พ.ศ. 2562 ศึกษาต่อในระดับศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม
ที่อยู่ปัจจุบัน	10/2 หมู่ที่ 1 ตำบลเวียงยอง อำเภอเมือง จังหวัดลำพูน 51000
ผลงานตีพิมพ์	Kamrit P., Seadan M., Suttiruengwong S. "Barrier and Seal Properties of Reactive Blending of Poly(Butylene Succinate) Based Blends." Suan Sunandha Science and Technology Journal, 26 May 2022, 09, (2), 22-30. DOI:10.14456/ssstj.2022.9
รางวัลที่ได้รับ	พ.ศ. 2562 - 2563 ได้รับทุนนักศึกษาผู้ช่วยสอน ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม พ.ศ. 2564 - 2565 ได้รับทุนนักศึกษาผู้ช่วยวิจัยของ รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. มนัส แชนด์่าน