



การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่ลดการยืดเกาะผิวของเหลวจากพอลิโพรพิลีนอะดิเพทโคเทเรฟทาเลท และพอลิเอทิลีน



โดย  
นายอรรถพล มีจำรัส

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่ลดการยึดเกาะผิวของเหลวจากพอลิเอทิลีนอะดิเพทโคเทเรฟทา  
เลท และพอลิเอทิลีน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

DEVELOPMENT OF WATER REPELLENT FILM PACKAGING BASED ON  
POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) AND POLYETHYLENE



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

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2021

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่ลดการยืดเกาะผิวของเหลวจากพอลิบิวทิลีนอะดิเพทโคเทรฟทาเลท และพอลิเอทิลีน
โดย	นายอรรถพล มีจำรัส
สาขาวิชา	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. มนัส แซ่ด่าน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จูไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร. มนัส แซ่ด่าน)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุตศิริ เหมศรี)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. กัลยาณี สิริสิงห)



620920014 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : บรรจุภัณฑ์อาหาร, ฟิล์มลดการเกาะผิว, พอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรพทาเลท, พอลิเอทิลีน

นาย อรรถพล มีจำรัส: การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่ลดการยึดเกาะผิวของเหลวจากพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรพทาเลท และพอลิเอทิลีน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์

ปัจจุบันจำนวนประชากรมีเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้มีการใช้งานบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ใช้สำหรับบรรจุอาหารเพิ่มขึ้นด้วย แต่บรรจุภัณฑ์พลาสติกที่นำมาบรรจุอาหารเหล่านี้ส่วนมากจะเป็นพลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวทิ้งและกลายเป็นขยะจำนวนมาก เนื่องจากพลาสติกเหล่านี้จะมีคราบของอาหารติดอยู่ซึ่งการจัดการกับขยะพลาสติกเหล่านี้มีไม่มาก เช่น การฝังกลบ การเผา และที่สำคัญคือการรีไซเคิล ซึ่งเป็นวิธีที่สำคัญสำหรับเศรษฐกิจหมุนเวียน แต่กระบวนการรีไซเคิลนี้ทำได้ยากเพราะต้องมีกระบวนการทำความสะอาดเศษอาหารที่ติดอยู่กับบรรจุภัณฑ์ก่อนการนำมาหลอมและนำมาใช้ใหม่ ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่จะทำการพัฒนาบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ลดการยึดติดของเศษอาหารโดยจะทำการปรับผิวของพอลิเมอร์โดยการเติมสารเติมแต่งลงไปในพอลิเมอร์ 2 ชนิดคือ LDPE และ PBAT ซึ่งการปรับผิวด้วยกระบวนการนี้เป็นวิธีที่ง่ายและไม่ต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายมากในกระบวนการผลิต โดยในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกศึกษาผลของสารเติมแต่ง 7 ชนิดที่มีผลต่อการเปียกผิวเบื้องต้นโดยการผสมในเครื่องผสมแบบปิด ปริมาณไม่เกิน 5 wt% พบว่าสามารถผสมเข้ากันได้และไม่มีปัญหาในกระบวนการผสมในเครื่อง internal mixer และมีการศึกษาสมบัติเชิงกลเบื้องต้นของฟิล์มพอลิเมอร์คอมพาวด์จากการทดสอบพบว่าค่า tensile strength และ modulus ของ LDPE และ PBAT มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ส่วนค่า elongation at break พบว่ามีการลดลงมากขึ้นเมื่อชิ้นงานมี defect บนฟิล์มที่เกิดจากการกระจายตัวไม่ดีของสารลดการเกาะผิวจากการศึกษาสมบัติการเปียกผิวพบว่าใน LDPE สารลดการเกาะผิวที่สามารถเพิ่มค่า contact angle ได้สูงที่สุดคือ silicone รองลงมาคือ carnauba wax ส่วนใน PBAT สารลดการเกาะผิวที่สามารถเพิ่มค่า contact angle ได้สูงที่สุดคือ carnauba wax รองลงมาคือ Shellac นอกจากนี้จากการทดสอบทางด้านสัญญาณวิทยาพบว่าสารเติมแต่งมีการขึ้นไปที่ผิวของฟิล์ม ส่วนที่สองได้มีการศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีผลต่อการเปียกผิว ในกระบวนการเป่าถุงพบว่าไม่สามารถผสมสารเติมแต่ง carnauba wax ได้ถึง 3 wt% ในพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด เนื่องจากจะไม่สามารถผสมในเครื่อง extruder ได้จึงได้มีการลดปริมาณของ carnauba wax ลงมาไม่เกิน 2 wt% หลังจากนั้นได้มีการทดสอบสมบัติการไหลก่อนนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าถุงพบว่าสารเติมแต่งทำให้การไหลเพิ่มมากขึ้นแต่ยังคงไม่ส่งผลต่อกระบวนการเป่าถุง สำหรับ LDPE การเติม Silicone สามารถทำให้ LDPE มีค่า contact angle สูงที่สุด ส่วนใน PBAT พบว่า carnauba wax ทำให้มีค่า contact angle สูงที่สุด สมบัติเชิงกลพบว่าการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในทุกสูตรที่เติมสารลดการเกาะผิว และนอกจากนี้การทดสอบ migration test พบว่าบรรจุภัณฑ์นี้สามารถนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์บรรจุอาหารได้เนื่องจากสารที่ตกค้างไม่เกินที่มาตรฐานกำหนด

620920014 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : Food packaging, low retention film, Polybutylene adipate-co-terephthalate, Polyethylene

MR. ATTAPON MEEJAMRUS : DEVELOPMENT OF WATER REPELLENT FILM PACKAGING BASED ON POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) AND POLYETHYLENE THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR SUPAKIJ SUTTIRUENGWONG, Dr.-Ing.

The demand for packaging has increased dramatically due to the increased population, but most of these plastic food containers are single-use plastics and turned into a large amount of wastes because food contact plastic packaging is normally contaminated with food or organic residues. The contamination leaves the plastics waste management with a few choices such as landfill, incineration, and recycling which is important for the circular economy. However, the recycling process is difficult because of food residue on the surface. Therefore, the goal and motivation of the work were to modify the water-repellent property of LDPE and PBAT by adding various types of additives which is a simple and cost-saving method. The study was divided into two parts. The first part studied the effect of additives in an internal mixer quantity below 5 wt%, where the polymer and additives could be processed in the internal mixer. The mechanical properties of polymer compound film such as the tensile strength and modulus of LDPE and PBAT were slightly changed, whereas the elongation at break showed a greater reduction. This deterioration occurred when the specimen had defects caused by poor dispersion of the additives. The wettability study showed that for LDPE, the additive that can provide the highest contact angle was silicone, followed by carnauba wax. For PBAT, the increase in the contact angle was found when adding carnauba wax and shellac respectively. The morphological observations have confirmed the additive bloomed on the film surface. In the second part of the study, the effect of additive wettability in the blown film extrusion process was performed. It was found that carnauba wax with 3 wt% cannot be incorporated into both polymers because it cannot be compounded in a twin-screw extruder. Thus the amount of carnauba wax was reduced to 2 wt%. The melt flow testing was performed before the blown film extrusion. It was shown that the addition of additives increased the melt flow values, but this did not affect the blown-film processing. For LDPE the addition of silicone was able to provide LDPE with the highest contact angle, while for PBAT, the addition of carnauba wax showed the highest contact angle. The mechanical properties showed a slight change for all compounds with low retention additives. In addition, the migration test found that this packaging can be used as food packaging because the residue does not exceed the standard.

## กิตติกรรมประกาศ

การที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้นผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกิจ สุทธิเรืองวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร.มนัส แซ่दान อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยให้ความช่วยเหลือทั้งในด้านของคำปรึกษาระหว่างการดำเนินงานวิจัย แนะนำแนวทางในการวิเคราะห์ผลการทดลองและชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อย่างละเอียดถี่ถ้วน เพื่อให้มีความถูกต้องและมีความสมบูรณ์มากที่สุด

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุศิริ เหมศรี และรองศาสตราจารย์ ดร.กัลยาณี สิริสิงห์ ที่สละเวลามาเป็นประธานและกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งยังทำการตรวจสอบข้อบกพร่องต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้และให้คำแนะนำสำหรับการแก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าวเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้คอยอบรมสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทความรู้ความเข้าใจในด้านต่าง ๆ และขอขอบพระคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับการสนับสนุนงานวิจัยในด้านต่าง ๆ ทั้งห้องปฏิบัติการ เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย รวมถึงทุนสนับสนุนงานวิจัยและทุนการศึกษาตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษาและการดำเนินงานวิจัยที่ผ่านมา

ขอขอบพระคุณ คุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชา คุณไพโรจน์ ตั้งสุขธวัช วิศวกรประจำภาควิชา และบุคลากรประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือในการจัดเตรียมอุปกรณ์และสารเคมี รวมถึงการดำเนินการด้านการจัดซื้อ จัดจ้าง และดำเนินการเอกสารต่าง ๆ ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สามารถดำเนินการมาได้ด้วยความสะดวกสบาย

ขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ นักศึกษาปริญญาโททุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา คอยรับฟัง รวมทั้งคอยเป็นกำลังใจให้กันเสมอมา ขอขอบคุณสำหรับมิตรภาพที่ดีที่มีให้กันมาโดยตลอด และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณพ่อแม่และครอบครัวที่คอยสั่งสอน ให้กำลังใจ และสนับสนุนมาโดยตลอด ทั้งด้านการศึกษา การดำเนินชีวิต รวมถึงเป็นกำลังใจสำคัญที่ทำให้สามารถก้าวผ่านอุปสรรคต่าง ๆ มาได้จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นาย อรรถพล มีจำรัส

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 เหตุผลและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 พอลิเอทิลีน.....	4
2.2 Polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT).....	5
2.3 การเปียกผิว .....	6
2.4 ปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว (lotus effect).....	8
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	19
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย .....	19

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	22
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	22
3.3.1 ศึกษาผลของสารเติมแต่ง 7 ชนิดที่มีผลต่อการเป็ยกผิวเบื้องต้นโดยการผสมในเครื่องผสมแบบปิด.....	22
3.3.1.1 ศึกษาการผสม LDPE และ PBAT กับสารเติมแต่งลดการเกาะผิว.....	22
3.3.1.2 ศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม LDPE และ PBAT ที่เติมสารลดการเกาะผิว.....	26
3.3.2 ศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีผลต่อการเป็ยกผิวในกระบวนการเป่าถุงโดยผสมใน twin screw extrusion และขึ้นรูปด้วยกระบวนการ blown film extrusion.....	29
3.3.2.1 การเตรียมพอลิเมอร์ LDPE และ PBAT ที่เติมสารเติมแต่งลดการยึดเกาะผิ และขึ้นรูปเป็นถุงด้วยกระบวนการ blown film extrusion.....	29
3.3.2.2 ทดสอบสมบัติต่างๆของฟิล์มพลาสติก.....	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	35
4.1 ศึกษาการผสมพอลิเมอร์กับสารเติมแต่งลดการยึดเกาะผิว 7 ชนิด โดยการผสมในเครื่องผสมแบบปิด.....	35
4.1.1 ศึกษากระบวนการผสมพลาสติกกับเติมสารเติมแต่งลดการเกาะผิวชนิดต่างๆ และปริมาณของสารเติมแต่งที่เติม.....	35
4.1.2 ศึกษาสมบัติต่างๆ ของพลาสติกที่ผ่านกระบวนการการผสมกับสารลดการเกาะผิว ....	38
4.1.2.1 ทดสอบสมบัติการเป็ยกผิวของพลาสติกที่ผ่านการผสมกับสารลดการเกาะผิว.....	38
4.1.2.2 ทดสอบสมบัติเชิงกลของพลาสติกที่ผ่านการผสมกับสารลดการเกาะผิว.....	41
4.1.2.3 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาบนผิวฟิล์มด้วยเทคนิค SEM (Scanning electron microscopy).....	46
4.2 ศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีผลต่อการเป็ยกผิวในกระบวนการเป่าถุงโดยผสมใน twin screw extrusion และขึ้นรูปด้วยกระบวนการ blown film extrusion.....	49
4.2.1 ทำการผสมพลาสติกกับสารลดการเกาะผิว.....	49

4.2.1.1 ทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ที่เติมสารลดการเกาะผิวก่อนนำไปขึ้นรูป ด้วยกระบวนการ blown film extrusion.....	51
4.2.1.2 ทดสอบน้ำหนักโมเลกุล .....	52
4.2.2 ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ blown film extrusion .....	53
4.2.3 ทดสอบสมบัติต่างๆของฟิล์มพลาสติก.....	54
4.2.3.1 ลักษณะทางกายภาพ.....	54
4.2.3.2 ทดสอบสมบัติการเปื่อยผิวยของฟิล์มพลาสติก.....	55
4.2.3.3 ทดสอบสมบัติเชิงกล.....	58
4.2.3.4 ทดสอบการแพร่ของสารในบรรจุภัณฑ์สู่อาหาร (migration test) .....	64
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	66
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	67
ภาคผนวก.....	69
ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่างๆ.....	70
ภาคผนวก ข การคำนวณ.....	81
ภาคผนวก ค การนำเสนอผลงานวิจัย.....	84
รายการอ้างอิง.....	92
ประวัติผู้เขียน.....	95



## สารบัญตาราง

### หน้า

ตารางที่ 2.1 ค่าเฉลี่ยของพิกัดสี ( $a^*$ , $b^*$ , $c^*$ , $L^*$ ), $O_p$ และ $\Delta E$ ของฟิล์มที่มีปริมาณ carnauba ที่แตกต่างกัน [17].....	17
ตารางที่ 2.2 ค่าเฉลี่ยของการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP) และความหนา ของฟิล์มที่มีปริมาณ carnauba wax แตกต่างกัน [17] .....	17
ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนการผสม LDPE กับสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ในอัตราส่วน 3 และ 5 %wt .....	23
ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนการผสม LDPE กับสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ในอัตราส่วน 3 และ 5 %wt (ต่อ).....	24
ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนการผสม PBAT กับสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ในอัตราส่วน 3 และ 5 %wt .....	25
ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนการผสมและอุณหภูมิการผสม LDPE กับสารลดการเกาะผิว .....	30
ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนการผสมและอุณหภูมิการผสม PBAT กับสารลดการเกาะผิว .....	30
ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการ blown film extrusion .	32
ตารางที่ 3.6 เกณฑ์ที่กำหนดสูงสุดของสารที่สามารถละลายออกมาได้ [26] .....	34
ตารางที่ 4.1 แสดงค่า melt flow index ของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ที่มีการผสมสารเติมแต่ง.....	52
ตารางที่ 4.2 แสดงน้ำหนักโมเลกุลของ PBAT และ PBAT ผสม shellac .....	53
ตารางที่ 4.3 แสดงลักษณะของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากกระบวนการ blown film extrusion .....	54
ตารางที่ 4.4 แสดงลักษณะของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากกระบวนการ blown film extrusion (ต่อ).....	55
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าปริมาณสารที่ตกค้างของ LDPE หลังจากสกัดด้วยสารละลายเทียบกับเกณฑ์สารตกค้างที่รับได้ตามมาตรฐาน .....	64
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าปริมาณสารที่ตกค้างของ LDPE ที่ผสมกับ Siliconeหลังจากสกัดด้วยสารละลายเทียบกับเกณฑ์สารตกค้างที่รับได้ตามมาตรฐาน .....	64

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าปริมาณสารที่ตกค้างของ PBAT หลังจากสกัดด้วยสารละลายเทียบกับเกณฑ์สารตกค้างที่รับได้ตามมาตรฐาน ..... 65

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าปริมาณสารที่ตกค้างของ PBAT ที่ผสมกับ Carnuba wax หลังจากสกัดด้วยสารละลายเทียบกับเกณฑ์สารตกค้างที่รับได้ตามมาตรฐาน ..... 65





## สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน [2].....	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ Polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT) [4].....	5
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการเปียกผิวของของเหลวที่สัมผัสบนพื้นผิวของแข็ง [8].....	7
รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะต่างๆ ของใบบัวโดย (ก) ใบบัว (ข) ภาพจาก SEM แสดงพื้นผิวของใบบัวที่มีความขรุขระ (ค) แสดงขนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ขรุขระของใบบัว (ง) ภาพจาก SEM ที่แสดงขนบนพื้นผิวขรุขระ [11] .....	8
รูปที่ 2.5 ภาพ SEM แสดงพื้นผิวคอมโพสิตที่มาจากส่วนผสมของ PP และ PCP, PVA และ PS ตามลำดับจากบนลงล่าง ด้านซ้ายแสดงพื้นผิวแบบ superhydrophobic ส่วนด้านขวาแสดงพื้นผิวแบบ non-superhydrophobic (กำลังขยาย: 700 เท่า) [13].....	10
รูปที่ 2.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวในระหว่างกระบวนการบีบอัดและการคืนตัวกลับโดย (a) SMP superhydrophobic ดั้งเดิม (b) SMP ที่ยุบตัว และ (c) SMP ที่คืนตัวกลับ ส่วน a1, b1, c1 เป็นภาพการกระจายตัวของอนุภาคนาโนบนผิวของ SMP [14].....	11
รูปที่ 2.7 แสดงพฤติกรรมของหยดน้ำที่กระทบต่อพื้นผิวแนวนอนที่เวลาต่างๆ ของ (a) SMP superhydrophobic ดั้งเดิม (b) SMP ที่ยุบลง และ (c) SMP superhydrophobic ที่คืนตัวกลับ [14].....	12
รูปที่ 2.8 แสดง Contact angle (CA) และ sliding angle (SA) ของหยดน้ำบนพื้นผิวกระจกที่เคลือบด้วย PP ที่อัตราส่วน tactic ต่างๆ [15].....	13
รูปที่ 2.9 แสดงภาพ SEM ของกระจกที่เคลือบด้วย i-PP (a), a-PP (b), A2/1 (c), A4/1 (d), A6/1 (e) ภาพระหว่าง a และ b เป็นภาพที่สร้างขึ้นมาเพื่ออธิบายการรวมตัวของ PP ที่เคลือบบนพื้นผิว [15].....	13
รูปที่ 2.10 แสดงกระบวนการขึ้นรูป PE รูปแบบต่างๆ [16].....	15
รูปที่ 2.11 แสดงภาพ SEM ของ micro-mold ที่ทำจาก PDMS ที่ทำมาจากใบบัว (a) คือมุมมองด้านบนและ (b) คือมุมมองด้านข้าง [16].....	15

รูปที่ 2.12 แสดงภาพ SEM ของ LDPE ที่ขึ้นรูปด้วย micro-mold (a), LDPE/TiO <sub>2</sub> ที่ขึ้นรูปใน micro-mold (b), LDPE ที่มีอนุภาคนาโนเคลือบที่ micro-mold อยู่แล้วก่อนใส่ LDPE (c) และพื้นผิว LDPE ที่มีอนุภาคนาโนที่ขึ้นรูปด้วยการกดอัดธรรมดาไม่ได้ใช้ micro-mold (d) และภาพแทรกมุมขวาคือ contact angle ของแต่ละตัว [16].....	16
รูปที่ 2.13 แสดงค่าเฉลี่ยสำหรับมุมสัมผัสที่เป็นฟังก์ชันของปริมาณ carnauba wax ในพอลิเมอร์ [17].....	18
รูปที่ 3.1 แสดงสูตรโครงสร้างของ Triethoxy(propyl)silane [18] .....	19
รูปที่ 3.2 แสดงสูตรโครงสร้างของ Decyltriethoxysilane [19].....	19
รูปที่ 3.3 แสดงสูตรโครงสร้างของ Carnauba wax [20] .....	20
รูปที่ 3.4 แสดงสูตรโครงสร้างของ Shellac [21].....	20
รูปที่ 3.5 แสดงสูตรโครงสร้างของ PE wax [22].....	21
รูปที่ 3.6 แสดงสูตรโครงสร้างของ Oxidized polyethylene homopolymer [23].....	21
รูปที่ 3.7 แสดงสูตรโครงสร้างของ silicone [24] .....	21
รูปที่ 3.8 เครื่อง internal mixer รุ่น MX 105-D40L50 จากบริษัทเจริญท์สัน.....	23
รูปที่ 3.9 เครื่อง Compression molding) รุ่น PR10-W300L350 จากบริษัทเจริญท์สัน.....	26
รูปที่ 3.10 เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น 5659 จากบริษัท Instron Engineering Corporation.....	27
รูปที่ 3.11 เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM รุ่น MIRA3 จากบริษัท TESCAN .....	28
รูปที่ 3.12 เครื่องอัดรีบแบบสกรูคู่ twin-screw extrusion รุ่น HRJ-25 จากบริษัท Enmach Co., Ltd.....	29
รูปที่ 3.13 เครื่อง Melt Flow Indexer รุ่น Plastometer: MFR1 จากบริษัทเจริญท์สัน.....	31
รูปที่ 3.14 เครื่อง blown film extrusion รุ่น TB El 20/Bi จากบริษัท Thai plastic bag industries Co., LTD.....	32
รูปที่ 4.1 แสดงค่าแรงบิดของ LDPE และ LDPE ที่มีการเติมสารเติมแต่ง 5 wt%.....	36
รูปที่ 4.2 แสดงค่าแรงบิดของ PBAT และ PBAT ที่มีการเติมสารเติมแต่ง 5 wt%.....	37

รูปที่ 4.3 แสดงค่า Contact angle ของ PBAT และ PBAT ที่มีการเติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ในอัตราส่วน 3 และ 5 wt%.....	39
รูปที่ 4.4 แสดงค่า Contact angle ของ LDPE และ LDPE ที่มีการเติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ในอัตราส่วน 3 และ 5 wt%.....	40
รูปที่ 4.5 แสดงค่า modulus ของ LDPE และ PBAT ที่เติมและไม่เติมสารลดการเกาะผิวชนิดต่างๆ.....	41
รูปที่ 4.6 แสดงค่า tensile strength ของ LDPE และ PBAT ที่เติมและไม่เติมสารลดการเกาะผิวชนิดต่างๆ.....	42
รูปที่ 4.7 แสดงค่า Elongation at break ของ LDPE และ PBAT ที่เติมและไม่เติมสารลดการเกาะผิวชนิดต่างๆ.....	43
รูปที่ 4.8 พิล์ม LDPE ที่ผสม Shellac.....	44
รูปที่ 4.9 พิล์ม LDPE ที่ผสม Silicone.....	45
รูปที่ 4.10 พิล์ม PBAT ที่ผสม Silicone.....	45
รูปที่ 4.11 แสดงภาพพื้นผิวของ a) LDPE, b) LDPE/CB, c) LDPE/Silicone ที่กำลังขยาย 1000 เท่า และ a1) LDPE, b1) LDPE/CB, c1) LDPE/Silicone ที่กำลังขยาย 10000 เท่า.....	47
รูปที่ 4.12 แสดงภาพพื้นผิวของ a) PBAT, b) PBAT /CB, c) PBAT/Shellac ที่กำลังขยาย 1000 เท่าและ a1) PBAT, b1) PBAT /CB, c1) PBAT/Shellac ที่กำลังขยาย 10000 เท่า.....	48
รูปที่ 4.13 แสดงค่า Contact angle ของ PBAT และ PBAT ที่มีการเติม carnauba wax ในอัตราส่วน 1, 2, 3 และ 5 wt%.....	50
รูปที่ 4.14 แสดงค่า Contact angle ของ LDPE และ LDPE ที่มีการเติม carnauba wax ในอัตราส่วน 1, 2, 3 และ 5 wt%.....	50
รูปที่ 4.15 แสดงปฏิกิริยา hydrolysis ที่มีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	53
รูปที่ 4.16 แสดงค่า Contact angle ของ PBAT และ PBAT ที่มีการเติมสารเติมแต่ง Carnauba wax 1, 2 wt% และ Shellac 3, 5 wt%.....	56
รูปที่ 4.17 แสดงค่า Contact angle ของ LDPE และ LDPE ที่มีการเติมสารเติมแต่ง carnauba wax 1, 2 wt% และ Silicone 3, 5 wt%.....	57

รูปที่ 4.18 แสดงค่า modulus ของ LDPE และ LDPE ที่เติมสารลดการเกาะผิว ทั้งในแนว machine direction (MD) และแนว transverse direction (TD)..... 58

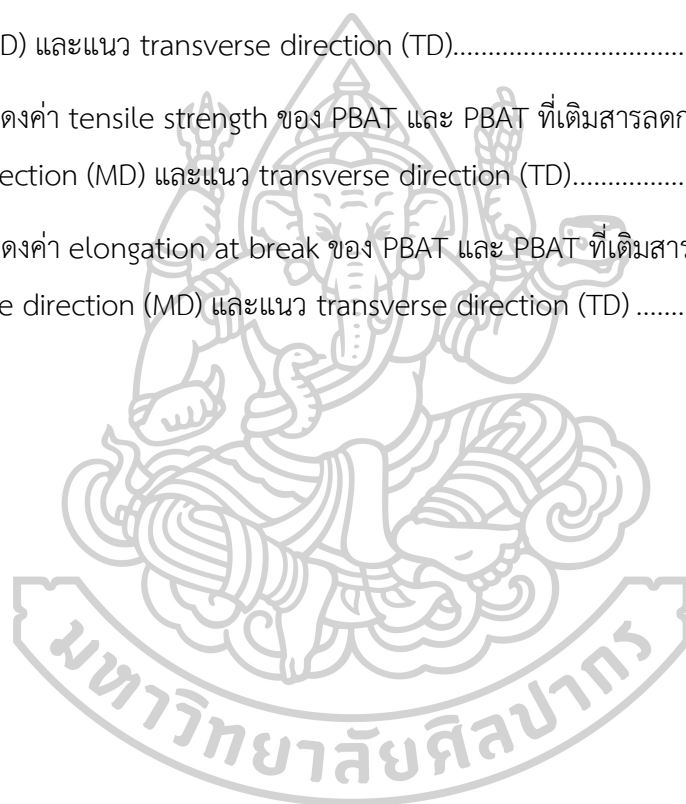
รูปที่ 4.19 แสดงค่า tensile strength ของ LDPE และ LDPE ที่เติมสารลดการเกาะผิว ทั้งในแนว machine direction (MD) และแนว transverse direction (TD)..... 59

รูปที่ 4.20 แสดงค่า Elongation at break ของ LDPE และ LDPE ที่เติมสารลดการเกาะผิว ทั้งในแนว machine direction (MD) และแนว transverse direction (TD) ..... 60

รูปที่ 4.21 แสดงค่า modulus ของ PBAT และ PBAT ที่เติมสารลดการเกาะผิว ทั้งในแนว machine direction (MD) และแนว transverse direction (TD)..... 61

รูปที่ 4.22 แสดงค่า tensile strength ของ PBAT และ PBAT ที่เติมสารลดการเกาะผิว ทั้งในแนว machine direction (MD) และแนว transverse direction (TD)..... 62

รูปที่ 4.23 แสดงค่า elongation at break ของ PBAT และ PBAT ที่เติมสารลดการเกาะผิว ทั้งในแนว machine direction (MD) และแนว transverse direction (TD) ..... 63



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 เหตุผลและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งส่งผลให้มีการใช้งานบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่ใช้สำหรับบรรจุอาหารเพิ่มขึ้นด้วย จึงส่งผลให้มีขยะพลาสติกที่มากขึ้นด้วย นอกจากนี้พลาสติกหรือบรรจุภัณฑ์ที่สัมผัสกับอาหารส่วนมากจะเป็นพลาสติกที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง การจะนำขยะเหล่านี้มาผ่านกระบวนการรีไซเคิลก็มีค่าใช้จ่ายที่สูงทำให้ไม่เป็นที่นิยม ส่งผลให้เกิดปัญหาขยะพลาสติกจำนวนมากเพราะมีการผลิตพลาสติกเพิ่มมากขึ้นเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการ จึงส่งผลให้มีทั้งขยะเก่าและขยะใหม่ที่เพิ่มขึ้นมา ดังนั้นจึงควรมีกระบวนการรีไซเคิลซึ่งสามารถทำให้พลาสติกเกิดการหมุนเวียนและไม่เพิ่มปริมาณขยะพลาสติก

พลาสติกที่ใช้กันอย่างมากและเป็นที่ยอมรับกันแพร่หลายคือ low density polyethylene (LDPE) ซึ่งใช้มากในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทฟิล์มและถุง อาทิเช่น ถุงซิป ถุงลามิเนต ถุงพลาสติกหูหิ้ว เป็นต้น แต่พลาสติกชนิดนี้มีแหล่งที่มาจากแหล่งปิโตรเลียมต้องใช้เวลายาวนานมากกว่าจะเกิดการย่อยสลาย ดังนั้นการจัดการหลังการใช้โดยการรีไซเคิลจึงเป็นทางเลือกที่จะทำให้วัสดุเกิดการหมุนเวียนในระบบเศรษฐกิจอย่างยั่งยืนมากขึ้น โดยการหมุนเวียนพลาสติกที่ใช้แล้วมาใช้ใหม่โดยกระบวนการรีไซเคิลนั้นจะต้องมีการนำพลาสติกที่ผ่านการใช้แล้วมาแยกประเภท ทำความสะอาดและบดก่อนนำไปหลอมหรือคอมพาวด์ใหม่ ซึ่งในการจัดการจะมีต้นทุนที่สูงเนื่องจากพลาสติกที่สัมผัสกับอาหาร เช่น ถุงพลาสติกใสอาหารจะมีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ต่าง ๆ เกาะอยู่บนพื้นผิวของพลาสติกอยู่มากทำให้กระบวนการทำความสะอาดทำได้ยาก ดังนั้นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาคือการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ลดการปนเปื้อนเมื่อใช้งานแล้ว โดยที่ผู้บริโภคสามารถบรรจุอาหารและเทอาหารออกมาโดยไม่มีการติดในบรรจุภัณฑ์หรือมีอาหารที่ติดกับบรรจุภัณฑ์น้อยที่สุด และยังสามารถล้างทำความสะอาดเบื้องต้นได้ง่ายทำให้ไม่ค่อยมีเศษอาหารหรือสารอินทรีย์ติดอยู่ที่ผิวของบรรจุภัณฑ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการขึ้นรูป LDPE และ PBAT ซึ่งเป็นไบโอพอลิเมอร์ที่มีสมบัติต่างๆใกล้เคียงกับ LDPE เพื่อทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการเปียกผิวเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งประเภทลดการเกาะของสารอินทรีย์บนผิวฟิล์ม ศึกษาการขึ้นรูปเป็นฟิล์มพลาสติกโดยการบวนการ blown film extrusion และสมบัติการไหลบนผิวฟิล์มเพื่อเป็นต้นแบบในการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการคอมพาวด์ LDPE และ PBAT โดยมีการเติมสารเติมแต่งลดการเกาะผิวของน้ำ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการเติมสารเติมแต่งที่ปริมาณต่างๆ ที่มีต่อสมบัติการเปียกผิวของฟิล์ม

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

การขึ้นรูป Polyethylene และ Polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT) ด้วยกระบวนการ blown film extrusion เพื่อให้ได้ถุงพลาสติกเป็นกระบวนการทั่วไปในอุตสาหกรรม แต่ในงานวิจัยนี้จะมีการเติมสารเติมแต่งบางตัวเพิ่มเข้าไปเพื่อให้ผิวมีความไม่ชอบน้ำหรือเรียกว่า hydrophobic โดยสารที่เติมเข้าไปจะเข้าไปกระจายตัวที่ผิวของพอลิเมอร์หรืออาจจะเข้าไปเปลี่ยนโครงสร้างหลังจากผสมเพื่อให้มีความไม่ชอบน้ำเพิ่มมากขึ้นเมื่อนำไปบรรจุของเหลวหรืออาหารที่มีไขมัน เช่น น้ำเต้าหู้ นม นอกจากนี้จะทำให้ของเหลวหรืออาหารเหล่านี้ไม่ยึดติดกับผิวส่งผลให้บรรจุภัณฑ์ที่ใช้บรรจุนั้นมีความสกปรกจากสิ่งปนเปื้อนหลังจากใช้งานแล้วน้อยมากเมื่อผ่านการใช้งาน และสามารถนำไปรีไซเคิลได้ง่ายมากขึ้น เนื่องจากจะไปลดขั้นตอนในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนก่อนการรีไซเคิลได้จึงทำให้การรีไซเคิลเกิดได้ง่ายมากขึ้นและเมื่อเกิดการรีไซเคิลได้ง่ายมากขึ้นก็จะทำให้เกิดกระบวนการหมุนเวียนพลาสติกในระบบเศรษฐกิจที่ยั่งยืน

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย

- 1.4.1 งานวิจัยนี้จะเน้นไปที่การทำการศึกษาสมบัติการเปียกผิวของวัสดุ
- 1.4.2 พอลิเมอร์ที่จะนำมาขึ้นรูปเพื่อทำการปรับผิวคือ Low-density polyethylene (LDPE) และ Polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT)
- 1.4.3 ทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มพลาสติกด้วยกระบวนการ blown film extrusion

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 ออกแบบวิธีการและวางแผนงานวิจัย
- 1.5.3 ดำเนินงานวิจัย



**ตอนที่ 1** ศึกษาการผสมพอลิเมอร์กับสารเติมแต่งลดการยึดเกาะผิว 7 ชนิด โดยการผสมในเครื่องผสมแบบปิด

ศึกษากระบวนการผสมสารเติมแต่งกับเม็ดพลาสติก LDPE หรือ PBAT กับสารเติมแต่งทั้ง 7 ชนิดในปริมาณที่กำหนดแล้วทำการผสมในเครื่อง internal mixer และมีการศึกษาสมบัติต่างๆ ของ LDPE และ PBAT ที่มีการเติมสารเติมแต่งลดการยึดเกาะผิว (low retention additive) และศึกษาสมบัติต่างๆ เบื้องต้นของพอลิเมอร์ที่ผสมสารเติมแต่งลดการยึดเกาะผิว

**ตอนที่ 2** ศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีผลต่อการเปียกผิวในกระบวนการเป่าถุงโดยผสมใน twin screw extrusion และขึ้นรูปด้วยกระบวนการ blown film extrusion

ขึ้นรูปฟิล์มโดยจะนำเม็ดพลาสติก LDPE และ PBAT ที่มีการเติมสารเติมแต่งแล้วให้ค่าที่ตีมาผสมด้วยเครื่อง twin screw extrusion และขึ้นรูปด้วยกระบวนการ blown film extrusion หลังจากนั้นจะนำฟิล์มที่ได้มาทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง universal testing machine, ทดสอบการเปียกผิวด้วยเทคนิค contact angle, ทดสอบ migration test

1.5.4 วิเคราะห์ผลการวิจัย

1.5.5 สรุปผลการวิจัย

1.5.6 รายงานผลการวิจัย

## 1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 การผสม LDPE และ PBAT กับสารเติมแต่งลดการยึดเกาะผิวสามารถผสมกันได้ ในเครื่อง twin screw extrusion

1.6.2 สามารถเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้

1.6.3 ทราบปริมาณที่เหมาะสมในการเติมสารเติมแต่ง

1.6.4 ได้ฟิล์มพอลิเมอร์ที่มี contact angle ที่สูงกว่า 105 องศา

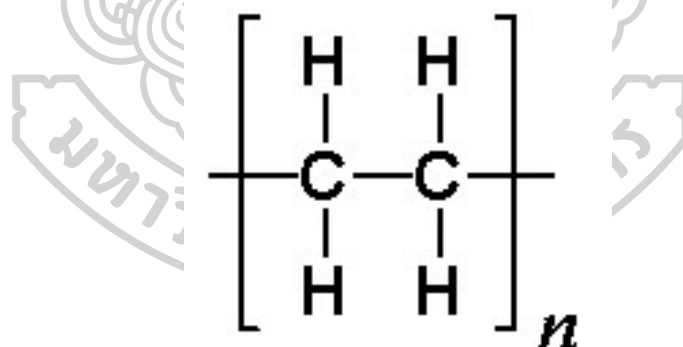
1.6.5 ได้ฟิล์มพอลิเมอร์ที่ยังคงมีสมบัติเชิงกลที่ดีเหมือนเดิม

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีน เป็นผลิตภัณฑ์ที่มาจากเอทิลีนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียมส่วนมากเราจะนำมาใช้ผลิตเป็นพวกพลาสติกต่างๆพอลิเอทิลีนที่พบมากในท้องตลาดจะมีอยู่ 2 ประเภทคือพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) และพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นน้อย (low density polyethylene, LDPE) โดยโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนจะแสดงดังรูปที่ 2.1 นอกจากนี้ความแตกต่างของพอลิเอทิลีนทั้งสองประเภทนี้คือโครงสร้างทางเคมีคือพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูง สายโซ่จะมีความเป็นเส้นตรงมากทำให้เกิดการจัดเรียงตัวชิดติดกันได้มากจึงมีความหนาแน่นที่สูง ส่วนพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำนั้นเกิดจากการมีกิ่งที่มากของโครงสร้างทำให้เมื่อจัดเรียงตัวกันแล้วจะมีส่วนที่เป็นกิ่งขัดขวางไม่ให้จัดเรียงตัวชิดติดกันจึงมีช่องว่างอยู่มากความหนาแน่นจึงต่ำและด้วยความหนาแน่นที่ต่างกันทำให้สมบัติบางอย่างของพอลิเอทิลีนมีความแตกต่างกัน [1]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน [2]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) [3] จากโครงสร้างทางเคมีที่มีกิ่งน้อยจึงทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่สูงส่งผลให้มีความแข็งแรงที่สูง มีความทนทานต่อสารเคมีที่มีขี้และสามารถหลอมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เหมาะที่จะนำไปผลิตเป็น



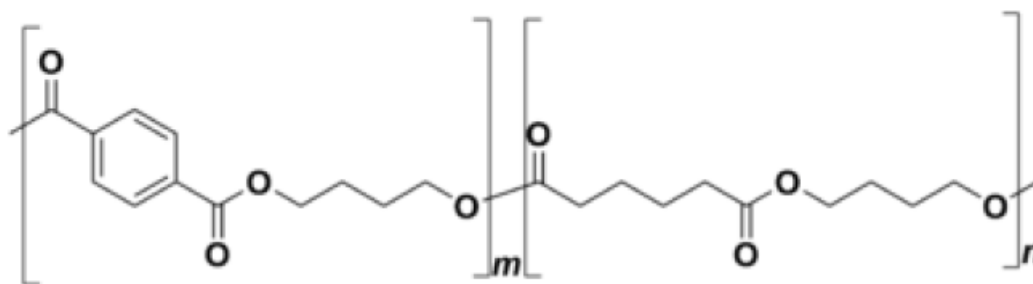
บรรจุภัณฑ์ต่างๆ เช่น ถุงหิ้ว, ถุงขยะ, ขวดน้ำ เป็นต้นและนอกจากนี้ยังไปทำเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆได้ เช่น ท่อ, ชิ้นส่วนรถยนต์, ชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น

พอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นน้อย (Low density polyethylene, LDPE) จากโครงสร้างทางเคมีที่มีกิ่งมากทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำกว่า HDPE สมบัติเด่นของ LDPE คือมีความเหนียวและยืดหยุ่นมาก และสามารถหลอมและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เหมาะกับการผลิตพวก ถุงเย็น ถุงพลาสติกหิ้วทั่วไป ขวดพลาสติก และอื่นๆ

## 2.2 Polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT)

Poly(butylene adipate-co-terephthalate, PBAT) เป็นพลาสติกชีวภาพที่ได้จากผลิตภัณฑ์จากแหล่งปิโตรเคมี แต่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เนื่องจาก PBAT เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์และวงอะโรมาติกเป็นองค์ประกอบบนสายสายโซ่หลัก (Synthetic aliphatic-aromatic polyester) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งทำให้มีความแข็งแรง เหนียว ขึ้นรูปได้ง่าย และมีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งมีสมบัติคล้ายคลึงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene: LDPE) [4] ดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมนำ PBAT มาประยุกต์ใช้งานในด้านการผลิตฟิล์มประเภทต่างๆ ทั้งฟิล์มห่ออาหาร ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ ฟิล์มทางการแพทย์ เป็นต้น [5, 6]

PBAT ถูกจำแนกเป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม มีลักษณะโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึกที่แน่นอนเนื่องจากขาดความเป็นระเบียบของโครงสร้าง จึงนำไปสู่คุณสมบัติทางกายภาพที่หลากหลาย เช่น จุดหลอมเหลวมีช่วงกว้าง ค่า Modulus และค่าความแข็งต่ำ แต่มีความเหนียวและความยืดหยุ่นสูง ซึ่งทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้ถูกนำมาผสมกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีความแข็งแรงและไม่ยืดหยุ่นในกระบวนการผลิตขวด ข้อเสียของพอลิเมอร์ชนิดนี้จะเหมือนกับพอลิเมอร์อื่นๆ คือเมื่อมีความเหนียว และความยืดหยุ่นสูงทำให้ไม่มีความแข็งแรง จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับภาชนะที่ต้องการความแข็งแรง



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ Polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT) [4]





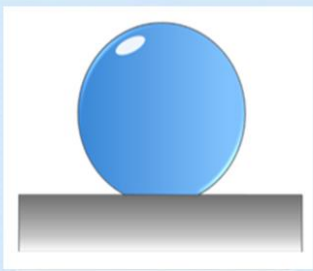
## 2.3 การเปียกผิว

การเปียกผิวคือลักษณะที่บ่งบอกถึงความสามารถในการยึดเกาะของของเหลวบนของแข็งซึ่งการเปียกผิวจะมีความเกี่ยวข้องกับแรง 2 ชนิดคือ [7]

1. แรงเชื่อมแน่น (cohesive force) คือแรงยึดเหนี่ยวโมเลกุลในสารเดียวกันทำให้สารนั้นรวมตัวกันเป็นกลุ่ม
2. แรงยึดติด (adhesive force) คือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารต่างชนิดกัน เช่นแรงยึดติดระหว่างของแข็งกับของเหลวถ้ามีมากการยึดเกาะบนผิวก็จะมาก

ดังนั้นจะพบว่าการที่มีแรง cohesive force สูงกว่า adhesive force จะทำให้โมเลกุลของสารนั้นชอบจับตัวกันเองมากกว่าไม่ชอบเกาะกับสารต่างชนิด แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงอนุภาคของแข็งกับของเหลวก็คือของเหลวจะไม่เกาะบนพื้นผิวของของแข็งและของเหลวจะไปรวมตัวกันเป็นกลุ่ม ดังนั้นด้วยเหตุนี้จึงนำไปสู่เทคนิคที่ใช้วัดการเปียกผิวโดยใช้เทคนิคมุมสัมผัสของของเหลวกับพื้นผิวของแข็ง (contact angle) คือการวัดมุมที่สัมผัสกันระหว่างของเหลวเทียบกับผิวที่เป็นของแข็งดังรูปที่ 2.3 และมีเกณฑ์ในการแบ่งดังนี้

1. มุมสัมผัสเท่ากับ 0 องศา คือมีการเปียกผิวอย่างสมบูรณ์อนุภาคของของเหลวชอบยึดเกาะกับพื้นผิวที่เป็นของแข็งเป็นอย่างมากทำให้เกิดเหมือนเป็นชั้นของเหลวเคลือบบนผิวของพื้นผิวของแข็งทั้งหมด (แรง adhesive force สูงกว่า cohesive force มาก)
2. มุมสัมผัสอยู่ในช่วง 0 – 90 องศา คือการเปียกผิวดีอนุภาคของเหลวจะยึดเกาะบนพื้นผิวของแข็งได้ดีและมีการกระจายตัวดี แต่ยังไม่เห็นเป็นหยดไม่ได้เคลือบไปบนผิวของแข็ง
3. มุมสัมผัสอยู่ในช่วง 90 – 180 องศา คือการเปียกผิวค่อนข้างยากอนุภาคของเหลวที่หยดลงบนพื้นผิวของแข็งจะค่อนข้างกลม
4. มุมสัมผัสเท่ากับ 180 องศา คือ ไม่มีการเปียกผิวลักษณะแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ cohesive force มีค่ามากกว่า adhesive force มากๆ ส่งผลให้ของเหลวมารวมตัวกันเป็นทรงกลมและสามารถกลิ้งบนพื้นผิวของแข็งได้

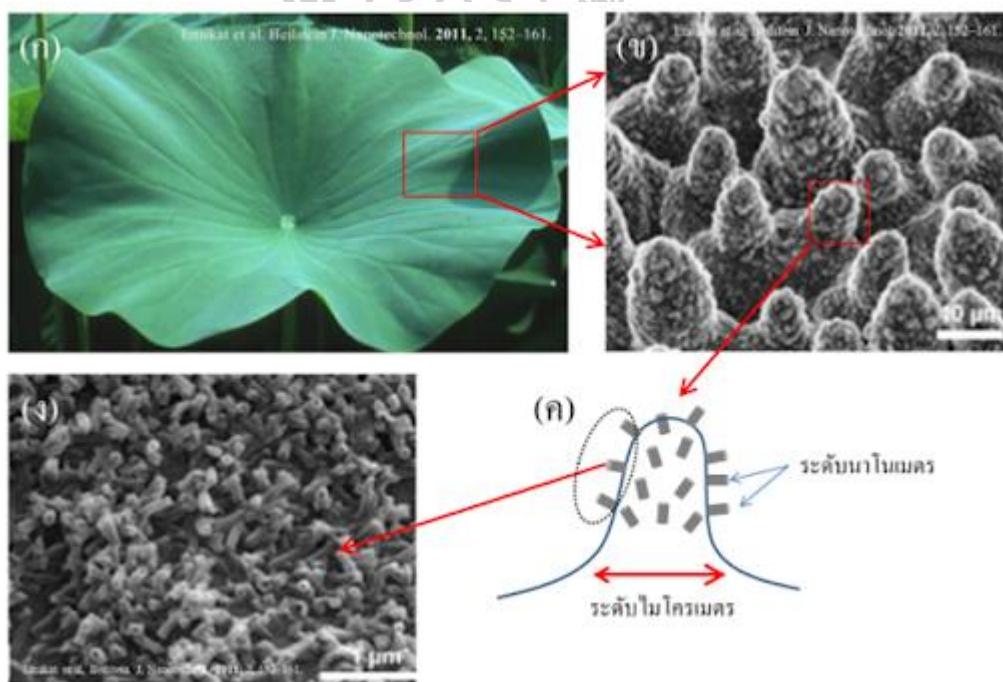
$\alpha = 0^\circ$		<b>Spreading</b>
$\alpha < 90^\circ$		<b>Good Wetting</b>
$\alpha = 90^\circ$		<b>Incomplete wetting</b>
$\alpha > 90^\circ$		<b>Incomplete wetting</b>
$\alpha > 180^\circ$		<b>Nonwetting</b>

รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการเปียกผิวของของเหลวที่สัมผัสบนพื้นผิวของแข็ง [8]

สำหรับในกรณีที่ของเหลวเป็นน้ำเมื่อค่ามุมสัมผัสที่มีค่ามากกว่า 90 องศาจะเรียกว่า hydrophobic และถ้ามีมุมสัมผัสที่สูงกว่า 150 องศาจะเรียกว่า superhydrophobic หรือเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า lotus effect [9]

## 2.4 ปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว (lotus effect)

ปรากฏการณ์ lotus effect [10] นี้เกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างขนาดเล็ก (nanostructure) บนพื้นผิวของใบบัวที่มีลักษณะเป็นชั้นๆ บนผิวจะมีความขรุขระและมีขนจำนวนมากดังรูปที่ 2.4 และนอกจากนี้บนพื้นผิวยังถูกเคลือบด้วยสารที่มีความมัน ทำให้ใบบัวแสดงสมบัติความไม่ชอบน้ำเมื่อหยดน้ำลงบนผิวใบบัวจะทำให้เราเห็นเป็นหยดน้ำกลิ้งไปมาบนใบบัวด้วย นอกจากนั้นแล้วโครงสร้างนี้ยังทำให้ฝุ่นละออง แบคทีเรียหรือสิ่งสกปรกอื่นๆ ไม่สามารถยึดติดกับใบบัวได้ เนื่องจากมีพื้นที่ที่สัมผัสกับใบบัวน้อยมากเมื่อเจอกับหยดน้ำสิ่งสกปรกเหล่านี้ก็จะหลุดออกไปหมด ดังนั้นด้วยสมบัตินี้เองทำให้มีการพัฒนาวัสดุที่มีการเลียนแบบสมบัตินี้เพื่อทำเป็นวัสดุที่ป้องกันการเปื้อกผิวหรือวัสดุที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้และอื่นๆ



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะต่างๆ ของใบบัวโดย (ก) ใบบัว (ข) ภาพจาก SEM แสดงพื้นผิวของใบบัวที่มีความขรุขระ (ค) แสดงขนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ขรุขระของใบบัว (ง) ภาพจาก SEM ที่แสดงขนบนพื้นผิวขรุขระ [11]

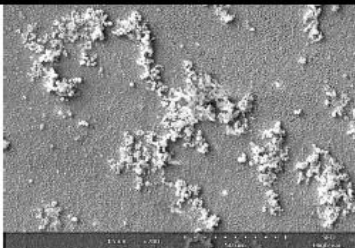
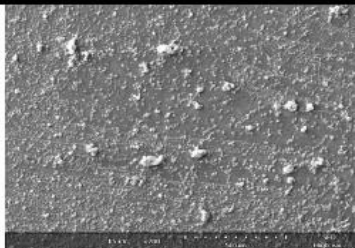
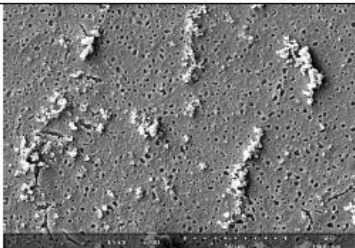
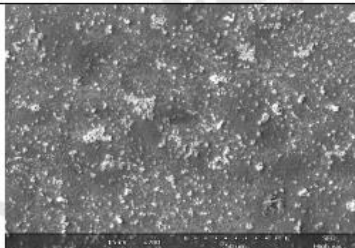
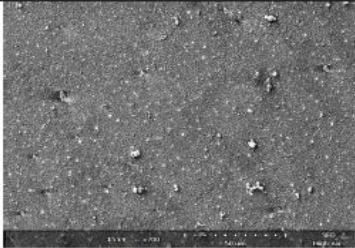

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ Samuel Martin และคณะ ในหัวข้อ Fabrication techniques for bioinspired, mechanically-durable, superliquiphobic surfaces for water, oil, and surfactant repellency [12] ได้อธิบายเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของของเหลวที่ไม่เกาะพื้นผิวเหมือนกับน้ำที่อยู่บนใบบัวซึ่งเป็นผลมาจากการมีพลังงานบนพื้นผิวหรือ surface energy ที่ต่ำและอธิบายถึงสมบัติการเปียกผิวด้วยโดยพูดถึงผิวที่มีความเป็น superhydrophobic จะวัดค่าของ contact angle ได้มากกว่า  $150^\circ$  ซึ่งพื้นผิวที่เป็น superhydrophobic จะมีลักษณะที่คล้ายกับน้ำที่ไหลบนใบบัว โดยการมีวัสดุ Fluorinated เป็นตัวเลือกที่ดีที่จะนำมาทำเป็นวัสดุที่มีค่า surface energy ที่ต่ำ นอกจากนี้ยังได้อธิบายเกี่ยวกับเทคนิคทำให้ของเหลวไม่เกาะบนพื้นผิวว่ามี 4 เทคนิคคือ 1. การผสมอนุภาคขนาดเล็กกับพอลิเมอร์และทำการเคลือบผิวของพอลิเมอร์ส่วนสำคัญของเทคนิคนี้คือ อัตราส่วนของอนุภาคนาโนกับพอลิเมอร์ต้องเหมาะสมถึงจะทำให้ค่าที่ได้จาก contact angle มีค่าสูง ถ้าอัตราส่วนน้อยไปจะทำให้พื้นผิวขรุขระไม่พอ เมื่อทดสอบ contact angle จะได้ค่าน้อย 2. layer by layer เป็นการเคลือบหลายๆชั้นโดยในแต่ละชั้นอาจจะเป็นสารคนละชนิดกันทำให้การเคลือบมีความหลากหลายไม่ว่าจะเคลือบเพื่อจุดประสงค์ใด 3. เทคนิค nanoparticle encapsulation เป็นการใส่อนุภาคขนาดเล็กบนพื้นผิวเพื่อจุดประสงค์บางอย่างเช่น กันแบคทีเรีย, เพิ่มความแข็งแรง, ปรับพื้นผิวเพื่อไม่ให้น้ำเกาะ 4. เป็นการใส่ของเหลวที่ไม่ระเหยในรูพรุนเพื่อที่จะไปลด surface energy โดยของเหลวที่เติมเข้าไปต้องเป็นของเหลวที่มีแรงดึงผิวต่ำๆ

จากงานวิจัยของ Romain Rioboo และคณะ [13] ในหัวข้อ Superhydrophobicity of composite surfaces created from polymer blends เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการนำพอลิเมอร์ผสมและไม่ได้ผสมเพื่อใช้เคลือบบนผิววัสดุให้มีคุณสมบัติเป็น superhydrophobic โดยในงานวิจัยก่อนหน้าเขาพบว่าเมื่อผสมอนุภาค silica ลงไปในพอลิเมอร์เมทริกซ์แล้วมันทำให้ผิวมีความเป็น superhydrophobic แต่ว่ามันยังมีข้อด้อยอยู่คือมันจะเกิดการ cure เมื่อเจอแสง UV และนอกจากนี้การกระจายตัวของอนุภาค silica เกิดได้ไม่ดี ในงานวิจัยนี้จึงคิดวิธีที่ง่ายกว่าโดยจะทำการเคลือบโดยใช้พอลิเมอร์ผสมซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้พอลิเมอร์ดังนี้ polypropylene (PP), polystyrene (PS), polyvinyl acetate (PVA), polychloroprene (PCP), polycarbonated (PC), low density polyethylene (LDPE) โดยนำพอลิเมอร์มาละลายในตัวทำละลายและผสมกับพอลิเมอร์อื่น ๆ ส่วนตัวที่ไม่ได้ผสมก็ใส่ตัวเดียวในสารละลายแล้วทำการเคลือบด้วยวิธี casting และ spin-coating พบว่าพอลิเมอร์บางชนิดสามารถทำให้เกิดพื้นผิวที่เป็น



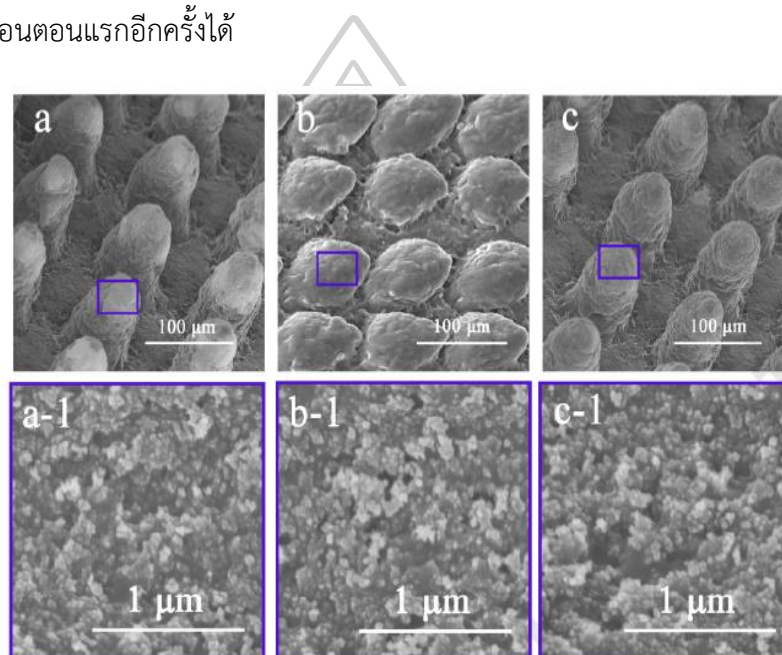
superhydrophobic ได้โดยไม่ต้องผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น PP และ PC ส่วน PS, PVA, PCP ต้องมีการผสมกับพอลิเมอร์ที่ทำให้เกิดพื้นผิวแบบ superhydrophobic ด้วยถึงจะทำให้พื้นผิวเป็นแบบ superhydrophobic ได้และจากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าพื้นผิวของ superhydrophobic จะมีความขรุขระที่มากกว่าพื้นผิวแบบ non-superhydrophobic

Composite	Superhydrophobic	Non-superhydrophobic
PCP/PP	 70% PP ; 30% PCP	 40% PP ; 60% PCP
PVA/PP	 75% PP ; 25% PVA	 25% PP ; 75% PVA
PS/PP	 50% PP ; 50% PS	 10% PP ; 90% PS

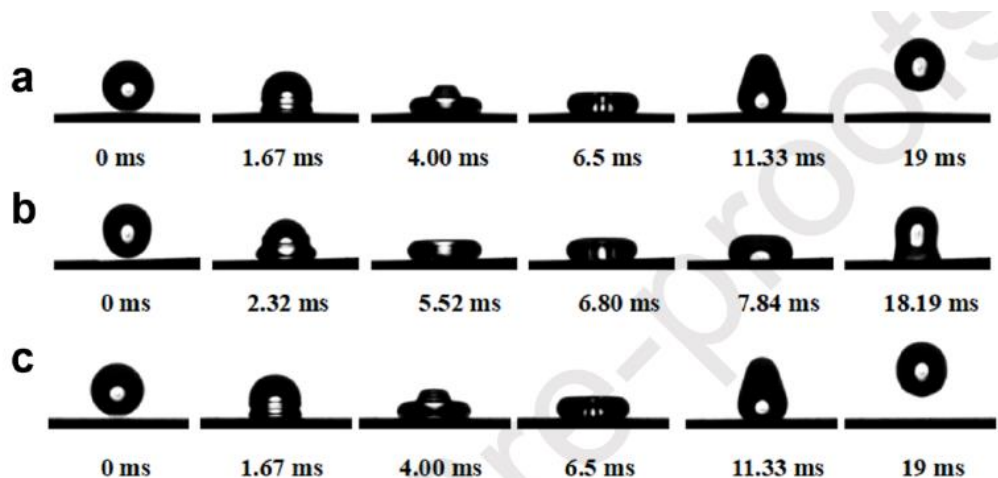
**รูปที่ 2.5** ภาพ SEM แสดงพื้นผิวคอมโพสิตที่มาจากการผสมของ PP และ PCP, PVA และ PS ตามลำดับจากบนลงล่าง ด้านซ้ายแสดงพื้นผิวแบบ superhydrophobic ส่วนด้านขวาแสดงพื้นผิวแบบ non-superhydrophobic (กำลังขยาย: 700 เท่า) [13]

จากงานวิจัยของ Yanlong Shao และคณะ [14] ได้วิจัยในหัวข้อ Shape Memory Superhydrophobic Surface with Switchable Transition between “Lotus Effect” to “Rose Petal Effect” ซึ่งจากงานวิจัยเป็นการนำ shape memory polymer polyurethane มาขึ้นรูปในแม่พิมพ์แบบพิเศษที่ออกแบบขึ้นมาหลังจากนั้นก็ทำการเคลือบด้วยสารละลายที่มีอนุภาค

ขนาดนาโนชื่อ H-260 บนผิว จากนั้นจะได้ผิวที่เป็น superhydrophobic ที่น้ำสามารถกลิ้งและไหลผ่านออกไปได้อย่างง่ายดายเนื่องจากมี adhesion ที่น้อยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Lotus Effect หลังจากนั้นในงานวิจัยนี้ได้มีความสนใจที่จะปรับพื้นผิวให้มีความสามารถเป็น superhydrophobic เหมือนเดิมแต่น้ำไม่สามารถกลิ้งไปมาได้เนื่องจากมีแรง adhesion ที่สูงโดยการทำการกดอัดด้วยความดันทำให้โครงสร้างสัณฐานวิทยาเปลี่ยนแปลงไปเรียกปรากฏการณ์ที่น้ำไม่กลิ้งบนผิวที่เป็น superhydrophobic นี้ว่า Rose Petal Effect และเราสามารถเปลี่ยนพื้นผิวให้มีปรากฏการณ์ทั้งสองแบบได้โดยการปล่อยให้ shape memory polymer (SMP) เกิดการคืนตัวจะกลับมามีความสามารถเหมือนตอนแรกอีกครั้งได้



รูปที่ 2.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวในระหว่างกระบวนการบีบอัดและการคืนตัวกลับโดย (a) SMP superhydrophobic ดั้งเดิม (b) SMP ที่ยุบตัว และ (c) SMP ที่คืนตัวกลับ ส่วน a1, b1, c1 เป็นภาพการกระจายตัวของอนุภาคนาโนบนผิวของ SMP [14]



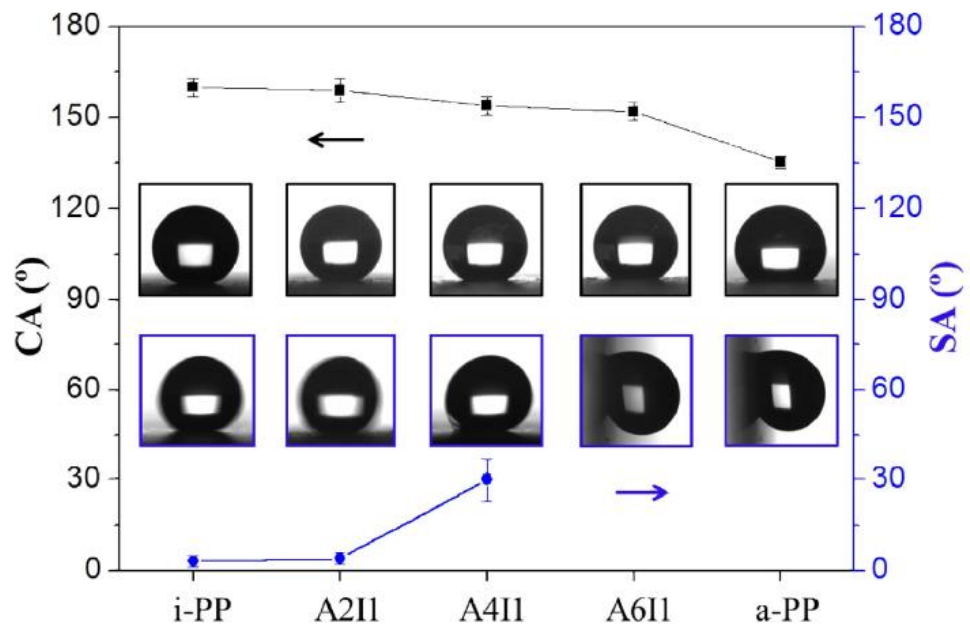
รูปที่ 2.7 แสดงพฤติกรรมของหยดน้ำที่กระทบต่อพื้นผิวแวนอนที่เวลาต่างๆ ของ (a) SMP superhydrophobic ดั้งเดิม (b) SMP ที่ยุบลง และ (c) SMP superhydrophobic ที่คืนตัวกลับ

[14]

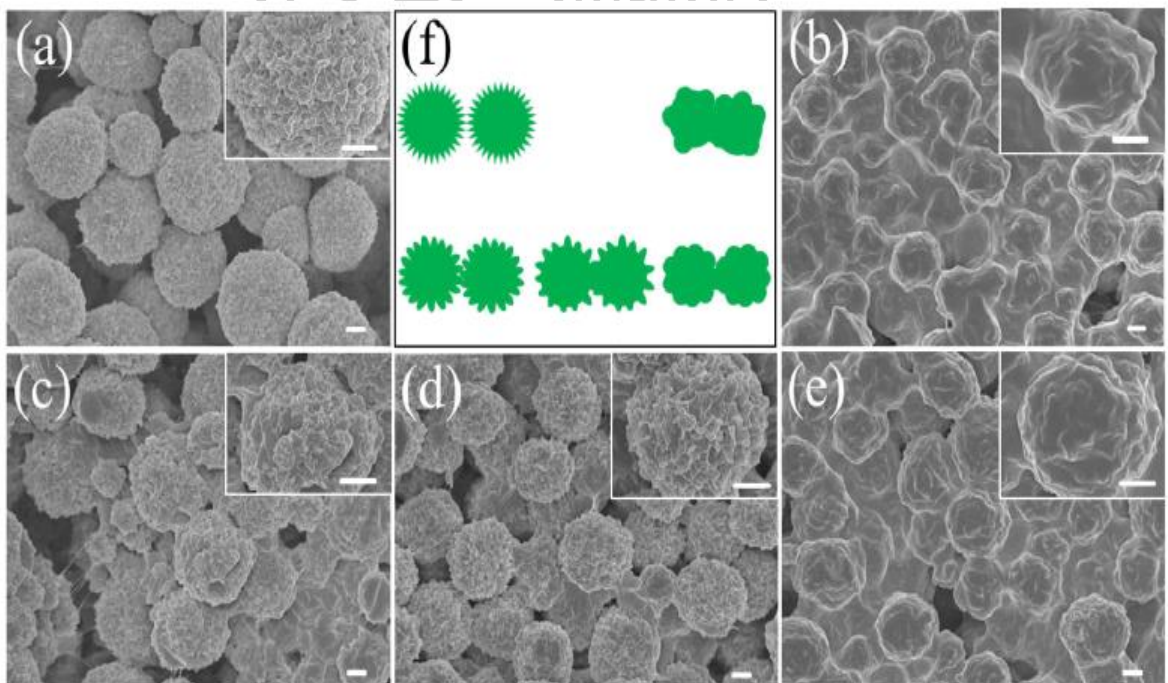
จากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าพื้นผิว a และ c เมื่อหยดน้ำลงบนพื้นผิวแล้วจะเห็นว่าไม่มีการยึดเกาะกับที่ผิวเนื่องจากมี adhesion ที่ต่ำน้ำจึงกระเด็นออกจากพื้นผิวทั้งหมดส่วนน้ำที่หยดลงบนพื้นผิว b จะเห็นว่าเมื่อมากระทบกับพื้นผิวแล้วจะเกิดแรง adhesion ขึ้นระหว่างผิวของพอลิเมอร์กับน้ำขึ้นทั้งนี้เป็นผลมาจากรูปที่ 2.6 ที่จะเห็นว่าพื้นผิวมีความต่างกัน

จากงานวิจัยของ Tang Zhu และคณะ [15] ได้วิจัยในหัวข้อ Ultra Water Repellent Polypropylene Surfaces with Tunable Water Adhesion ซึ่งจากงานวิจัยเป็นการศึกษาการเคลือบ PP ที่มี tacticity ต่างกันคือ PP isotactic และ PP atactic บนกระจก พบว่าเมื่อนำ PP มาละลายกับสารละลายและเคลือบบนกระจกจะทำให้ผิวของกระจกมีความเป็น superhydrophobic โดยความเป็น superhydrophobic จะมีมากเมื่อเคลือบด้วย PP isotactic แต่ถ้าเคลือบด้วย PP atactic ผิวของสารที่เคลือบจะไม่ใช่ superhydrophobic หลังจากนั้นจึงมีการทำการผสมระหว่าง PP ที่เป็น atactic กับ isotactic ที่อัตราส่วนต่างๆคือ 2/1, 4/1, 6/1 แล้วนำมาทดสอบดูความเป็น superhydrophobic ของพื้นผิวดังรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ PP ที่เป็น atactic จะทำให้ค่า contact angle ต่ำลงความเป็น superhydrophobic ก็จะลดต่ำลงด้วยดังนั้นโครงสร้างของ PP จึงเป็นส่วนสำคัญ





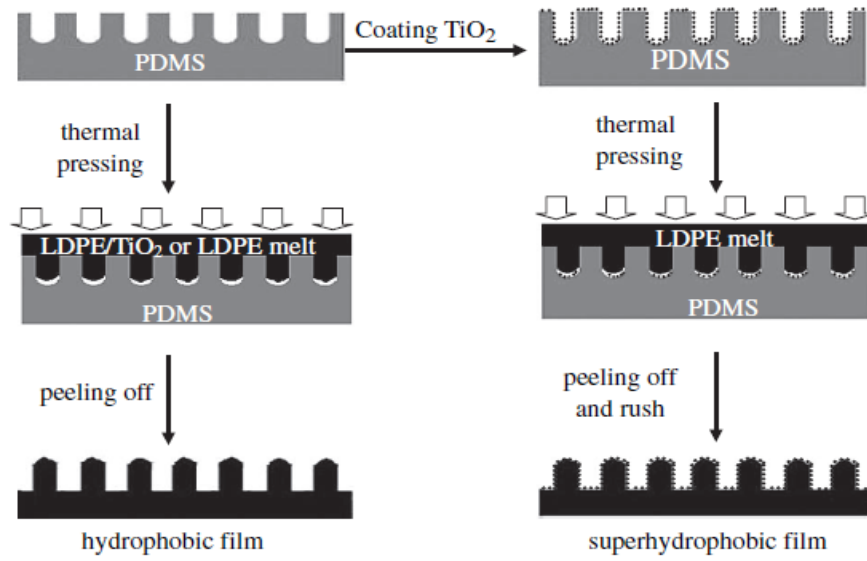
รูปที่ 2.8 แสดง Contact angle (CA) และ sliding angle (SA) ของหยดน้ำบนพื้นผิวกระจกที่เคลือบด้วย PP ที่อัตราส่วน tactic ต่างๆ [15]



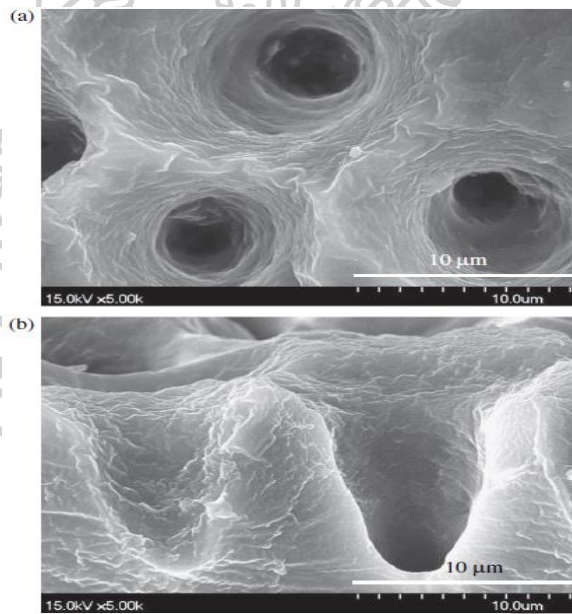
รูปที่ 2.9 แสดงภาพ SEM ของกระจกที่เคลือบด้วย i-PP (a), a-PP (b), A2/1 (c), A4/1 (d), A6/1 (e) ภาพระหว่าง a และ b เป็นภาพที่สร้างขึ้นมาเพื่ออธิบายการรวมตัวของ PP ที่เคลือบบนพื้นผิว (f)

จากรูปที่ 2.9 แสดงภาพจาก SEM ของพื้นผิว PP ที่มี tactic แบบต่างๆ จากรูป a จะเห็นว่าอนุภาคทรงกลมของ PP ที่เป็น isotactic จะมีความขรุขระมากกว่าอนุภาคทรงกลมของ PP ที่เป็น atactic และเมื่อผสมกันจะพบว่าเมื่อปริมาณของ PP ที่เป็น atactic สูงขึ้นจะทำให้อนุภาคนั้นเรียบมากขึ้นเรื่อยๆ เขาจึงคิดว่ามาจากรูปร่างที่แตกต่างกันของผลึกจึงได้ทำการทดสอบ XRD พบว่าผลึกที่เกิดใกล้เคียงกันเขาจึงคิดว่าน่าจะเป็นผลจากปริมาณผลึกมากกว่าและเมื่อตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC พบว่าปริมาณผลึกต่างกันและเมื่อปริมาณของ PP atactic มากขึ้นจะทำให้ผลึกมีปริมาณลดลงและความสามารถในการเปียกผิวก็จะมากขึ้น (contact angle ลดลง) นอกจากนี้การที่สารที่เคลือบมีปริมาณ PP isotactic มากจะทำให้ผิวที่เคลือบมีความขรุขระมาก นอกจากนี้ในการทดลองนี้พบว่าการผสม PP ที่เป็น atactic กับ isotactic ที่ยังทำให้ผิวมีความสามารถเป็น superhydrophobic อยู่คืออัตราส่วน 2/1

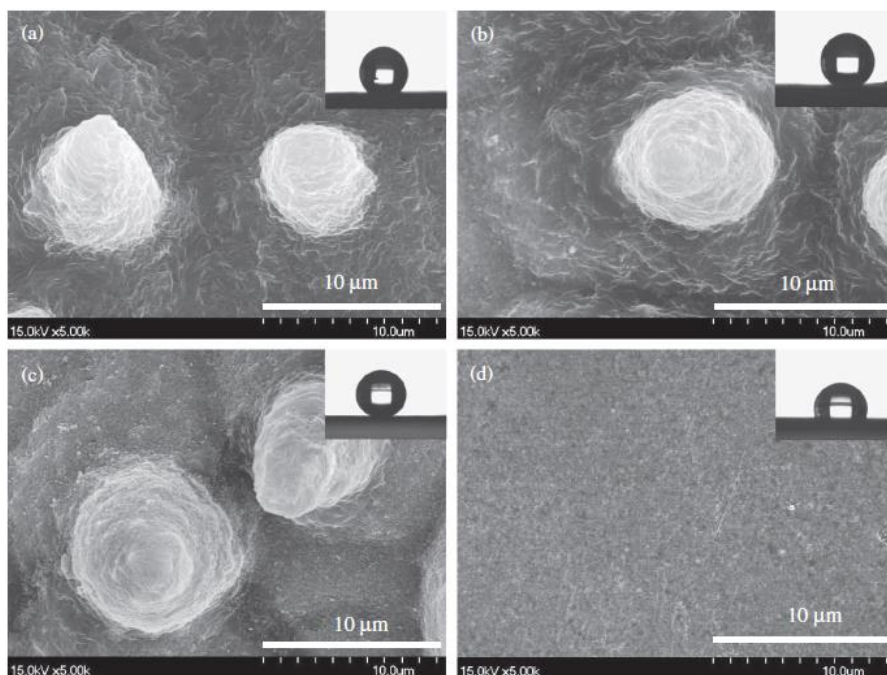
จากงานวิจัยของ Jie Feng และคณะ [16] ในหัวข้อ Fabrication of Polyethylene Surface with Stable Superhydrophobicity by Nanoparticle Assisted Thermal Micro-molding Process ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยจะนำ PE มาใช้งานร่วมกับ  $\text{TiO}_2$  และอนุภาคขนาดนาโนด้วยกระบวนการ micro molding ซึ่งได้มาจากการเทสารละลาย poly(dimethylsiloxane) (PDMS) ลงไปผิวของใบบัว แล้วรอให้สารละลายระเหยและ PDMS เช็ดตัวจากนั้นก็ให้นำ PDMS ที่เช็ดตัวแล้วมาเป็นแม่พิมพ์ (micro mold) โดยกระบวนการทดลองจะแบ่งการเตรียมเป็น 2 วิธีดังรูปที่ 2.10 วิธีที่ 1 นำ micro-molding ที่ทำมาจาก poly(dimethylsiloxane) (PDMS) มาและนำ PE ที่ผสมกับ  $\text{TiO}_2$  และอนุภาคขนาดนาโนที่เตรียมเป็นสารละลายใส่ลงไปโมลแล้วกดอัดด้วยความร้อน อีกวิธีหนึ่งคือการเคลือบผิว micro-mold ก่อนด้วยสารละลายที่มี  $\text{TiO}_2$  และอนุภาคขนาดนาโนให้เกิดเป็นชั้นก่อนแล้วค่อยเทสารละลาย PE ลงไปแล้วกดอัด ซึ่งทั้งสองกระบวนการจะทำให้ได้พื้นผิวของ PE ที่มีสมบัติต่างกัน และรูปที่ 2.11 คือภาพ SEM ของ micro-mold ที่มาจาก poly(dimethylsiloxane) (PDMS) พบว่ามีลักษณะพื้นผิวที่คล้ายกับใบบัว



รูปที่ 2.10 แสดงกระบวนการขึ้นรูป PE รูปแบบต่างๆ [16]



รูปที่ 2.11 แสดงภาพ SEM ของ micro-mold ที่ทำจาก PDMS ที่ทำมาจากใบบัว (a) คือมุมมองด้านบนและ (b) คือมุมมองด้านข้าง [16]



รูปที่ 2.12 แสดงภาพ SEM ของ LDPE ที่ขึ้นรูปด้วย micro-mold (a), LDPE/TiO<sub>2</sub> ที่ขึ้นรูปใน micro-mold (b), LDPE ที่มีอนุภาคนาโนเคลือบที่ micro-mold อยู่แล้วก่อนใส่ LDPE (c) และพื้นผิว LDPE ที่มีอนุภาคนาโนที่ขึ้นรูปด้วยการกดอัดธรรมดาไม่ได้ใช้ micro-mold (d) และภาพแทรกมุมขวบนคือ contact angle ของแต่ละตัว [16]

จากรูปที่ 2.12 จะเห็นว่ารูป (a), (b), (c) ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ micro-molding พื้นผิวจะมีเส้นขนขึ้นมากคล้ายกับไนไบบั่วและเมื่อทดสอบ contact angle พบว่ามีค่าที่สูงแสดงถึงพื้นผิวที่มีความเป็น hydrophobic แต่รูป (d) พื้นผิวเรียบเมื่อทดสอบ contact angle พบว่ามีความชอบน้ำมากกว่ารูป (a), (b), (c) และเมื่อเทียบรูป (a), (b), (c) จะพบว่ารูป (c) มีค่า contact angle ที่สูงที่สุดซึ่งรูป (c) เป็นการขึ้นรูปโดยการนำ TiO<sub>2</sub> ไปเคลือบบนผิว mold ก่อนแล้วค่อยนำ PE มาเทขึ้นรูปทำให้อนุภาคนาโนเกาะอยู่ที่บริเวณผิวมากขึ้นส่งผลให้พื้นผิวมีสมบัติเป็น superhydrophobic

จากงานวิจัยของ Francisco Klebson Gomes dos Santos และคณะ [17] ในหัวข้อ Effect of the Addition of Carnauba Wax on Physicochemical Properties of Chitosan Films ได้ทำการทดลองโดยผสม chitosan กับ carnauba wax แล้วทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยวิธี solution cast หลังจากนั้นก็นำมาทดสอบความโปร่งใสพบว่าฟิล์มที่ได้มีความทึบมากขึ้นเมื่อมีการเติม carnauba wax ดังตารางที่ 2.1 และในงานวิจัยนี้ยังมีการทดสอบความหนาและการซึมผ่านของไอน้ำได้ผลดังตารางที่ 2.2 พบว่าเมื่อมีการเติม carnauba wax เพิ่มมากขึ้นความหนาก็จะเพิ่มมากขึ้น

เนื่องจากเมื่อปริมาณซีตัสเพิ่มทำให้การโมเลกุลของ chitosan ที่สัมผัสกับโมเลกุลขององค์ประกอบใน wax อาจทำให้แรงรวมของสายโซ่พอลิเมอร์อ่อนลง ส่งผลให้เมทริกซ์เปิดกว้างขึ้นทำให้ความหนาเพิ่มขึ้น ส่วนเรื่องการซึมผ่านของไอน้ำพบว่าเมื่อมีการเติม carnauba wax จะทำให้ได้ค่า WVP เพิ่มขึ้นจนถึง 40% carnauba wax ถ้ามากกว่านี้ค่า WVP ก็จะเริ่มลดลง

**ตารางที่ 2.1** ค่าเฉลี่ยของพิกัดสี ( $a^*$ ,  $b^*$ ,  $c^*$ ,  $L^*$ ), Op และ  $\Delta E$  ของฟิล์มที่มีปริมาณ carnauba ที่แตกต่างกัน [17]

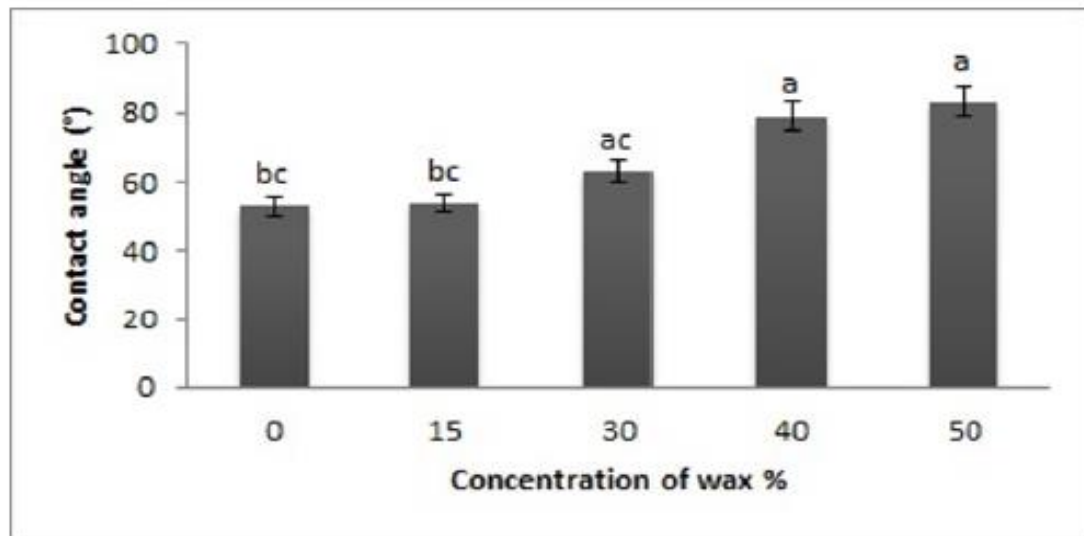
Wax (%)	Op (%)	$a^*$	$b^*$	$L^*$	$\Delta E$
0	13.56 <sup>bc</sup> ± 0.060	-8.36 <sup>b</sup> ± 0.25	10.73 <sup>bc</sup> ± 0.15	87.10 <sup>a</sup> ± 0.00	17.18 <sup>bc</sup> ± 0.17
15	17.12 <sup>bc</sup> ± 0.005	-4.16 <sup>a</sup> ± 0.15	15.90 <sup>ac</sup> ± 1.04	83.90 <sup>ac</sup> ± 0.62	21.24 <sup>ac</sup> ± 1.12
30	19.42 <sup>ac</sup> ± 0.004	-4.4 <sup>a</sup> ± 0.48	17.80 <sup>ac</sup> ± 1.05	83.90 <sup>ac</sup> ± 0.40	22.97 <sup>a</sup> ± 1.27
40	19.91 <sup>ac</sup> ± 0.010	-3.76 <sup>a</sup> ± 0.06	18.20 <sup>ac</sup> ± 1.02	83.26 <sup>bc</sup> ± 0.65	23.29 <sup>a</sup> ± 1.18
50	24.11 <sup>a</sup> ± 0.006	-3.63 <sup>a</sup> ± 0.81	22.63 <sup>a</sup> ± 0.67	81.43 <sup>bc</sup> ± 0.42	25.72 <sup>a</sup> ± 2.39

**ตารางที่ 2.2** ค่าเฉลี่ยของการซึมผ่านของไอน้ำ (WVP) และความหนา ของฟิล์มที่มีปริมาณ carnauba wax แตกต่างกัน [17]

Carnauba wax (%)	Thickness (mm)	WVP
0	0.0364 <sup>bc</sup> ± 0.002	2.18 <sup>a</sup> ± 0.16
15	0.0542 <sup>ac</sup> ± 0.001	2.05 <sup>a</sup> ± 0.02
30	0.0678 <sup>ac</sup> ± 0.002	0.85 <sup>bc</sup> ± 0.20
40	0.0724 <sup>a</sup> ± 0.003	0.77 <sup>bc</sup> ± 0.07
50	0.0858 <sup>a</sup> ± 0.003	1.12 <sup>ac</sup> ± 0.20

จากรูปที่ 2.13 จะพบว่าเมื่อเติม carnauba wax ปริมาณมากขึ้นในพอลิเมอร์จะทำให้ได้ค่า contact angle ที่สูงมากขึ้นเนื่องจากมันจะไปลดความเป็น hydrophilic ของฟิล์ม chitosan [17]





รูปที่ 2.13 แสดงค่าเฉลี่ยสำหรับมุมสัมผัสที่เป็นฟังก์ชันของปริมาณ carnauba wax ในพอลิเมอร์

[17]



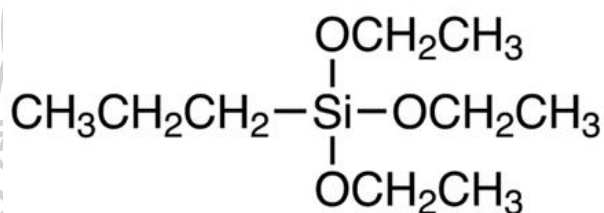
### บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 Polyethylene (PE) เกรด LD2026K InnoPlus, film grade จากบริษัท PTT global chemical ประเทศไทย

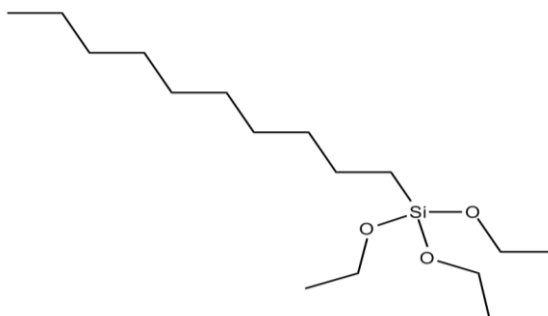
3.1.2 Polybutylene adipate terephthalate (PBAT) เกรด Ecoflex F Blend C1200, film grade จากบริษัท BASF chemical ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.3 Triethoxy(propyl)silane จากบริษัท Tokyo chemical จำกัด ประเทศญี่ปุ่น มีลักษณะเป็นเหลวใส ไม่มีสี น้ำหนักโมเลกุล 206.36 g/mol และมีจุดเดือดที่ 180 องศาเซลเซียส สูตรโครงสร้างจะแสดงดังรูปที่ 3.1



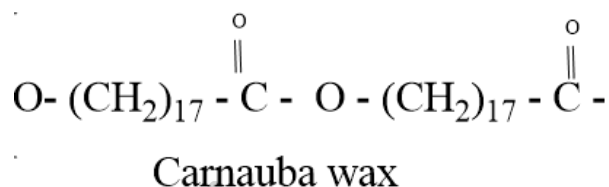
รูปที่ 3.1 แสดงสูตรโครงสร้างของ Triethoxy(propyl)silane [18]

3.1.4 Decyltriethoxysilane จากบริษัท Tokyo chemical จำกัด ประเทศญี่ปุ่น มีลักษณะเป็นเหลวใส ไม่มีสี น้ำหนักโมเลกุล 304.55 g/mol และมีจุดเดือดที่ 150 องศาเซลเซียส สูตรโครงสร้างจะแสดงดังรูปที่ 3.2



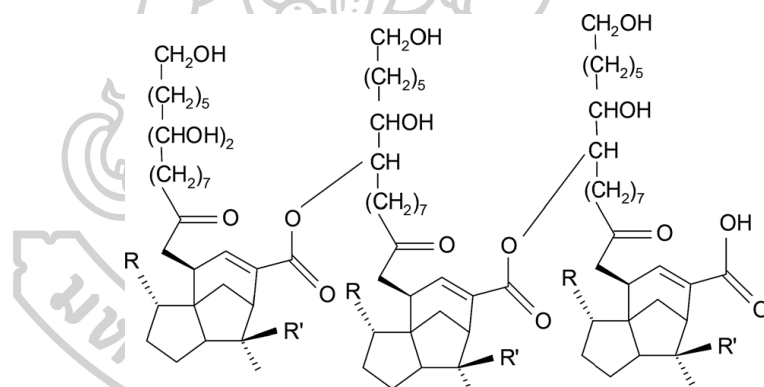
รูปที่ 3.2 แสดงสูตรโครงสร้างของ Decyltriethoxysilane [19]

3.1.5 Carnauba wax flake เกรด T1 จากบริษัท ดีซีเอ็มซี คอร์ปอเรชั่น จำกัด ประเทศไทย มีลักษณะเกล็ดสีเหลืองอ่อน จุดหลอมเหลว 82 - 90 องศาเซลเซียส สูตรโครงสร้างจะแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงสูตรโครงสร้างของ Carnauba wax [20]

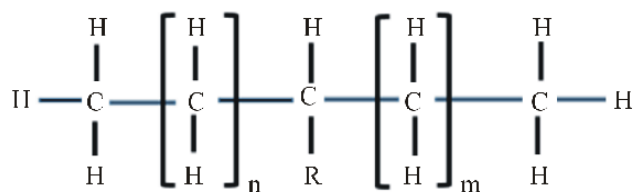
3.1.6 เซลแล็กเกร็ด จากบริษัท นอร์ทเทอรัน สยามซีดแลค จำกัด ประเทศไทย มีลักษณะเป็นเกล็ดแข็ง สีเหลืองเข้ม สูตรโครงสร้างจะแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงสูตรโครงสร้างของ Shellac [21]

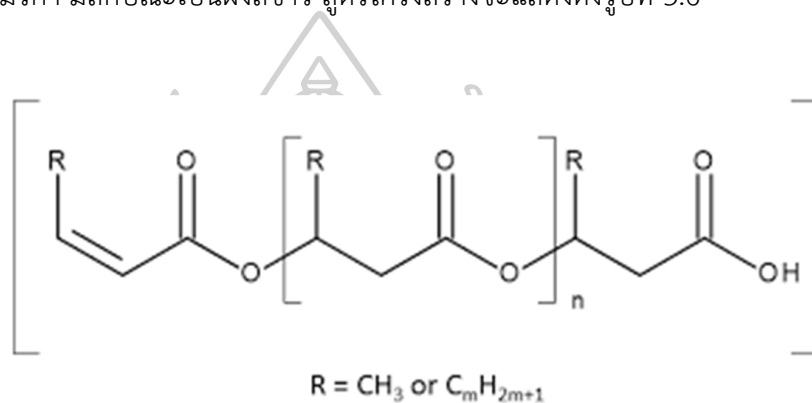
3.1.7 พอลิเอทิลีนแวกซ์ (food grade) จากบริษัท ดีซีเอ็มซี คอร์ปอเรชั่น จำกัด ประเทศไทย มีลักษณะเป็นผงสีขาว จุดหลอมเหลว 90 - 110 องศาเซลเซียส สูตรโครงสร้างจะแสดงดังรูปที่ 3.5





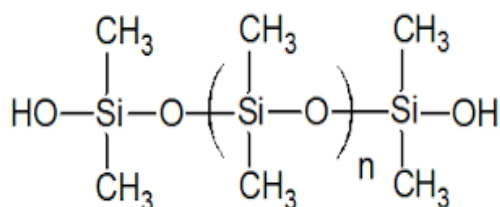
รูปที่ 3.5 แสดงสูตรโครงสร้างของ PE wax [22]

3.1.8 Oxidized polyethylene homopolymer จากบริษัท Honeywell ประเทศสหรัฐอเมริกา มีลักษณะเป็นผงสีขาว สูตรโครงสร้างจะแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงสูตรโครงสร้างของ Oxidized polyethylene homopolymer [23]

3.1.9 Genioplast silicone gum เกรด PA 445200 จากบริษัท wacker ประเทศเยอรมัน มีลักษณะเป็นเม็ดคล้ายพอลิเมอร์แต่มีความนิ่มมากกว่า และมีองค์ประกอบหลักเป็น Siloxane polymer และ fumed silica สูตรโครงสร้างจะแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงสูตรโครงสร้างของ silicone [24]

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.2.1 เครื่องผสมภายในแบบปิด (Internal mixer) รุ่น MX 105-D40L50 จากบริษัทเจริญทัศน์ ประเทศไทย
- 3.2.2 เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) รุ่น PR10-W300L350 จากบริษัทเจริญทัศน์ ประเทศไทย
- 3.2.3 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin-screw extrusion) รุ่น HRJ-25 มีค่า L/D เท่ากับ 40 จากบริษัท Enmach Co., Ltd. ประเทศจีน
- 3.2.4 เครื่องเป่าขึ้นรูปฟิล์ม (blown film extrusion) รุ่น TB El 20/Bi จากบริษัท Thai plastic bag industries Co.,LTD ประเทศไทย
- 3.2.5 เครื่องทดสอบสมบัติการดึงยึด (Universal Testing Machine) รุ่น 5659 จากบริษัท Instron Engineering Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 3.2.6. Contact angle measurement
- 3.2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM) รุ่น MIRA3 จากบริษัท TESCAN ประเทศสาธารณรัฐเช็ก
- 3.2.8 เครื่องทดสอบดัชนีการไหล (Melt Flow Indexer) รุ่น Plastometer: MFR1 จากบริษัทเจริญทัศน์ ประเทศไทย

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

#### 3.3.1 ศึกษาผลของสารเติมแต่ง 7 ชนิดที่มีผลต่อการเปียกผิวเบื้องต้นโดยการผสมในเครื่องผสมแบบปิด

##### 3.3.1.1 ศึกษาการผสม LDPE และ PBAT กับสารเติมแต่งลดการเกาะผิว

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษากระบวนการผสมพอลิเมอร์กับสารเติมแต่งลดการยึดเกาะผิว โดยจะทำการอบเม็ดพลาสติก low-density polyethylene (LDPE) และ Polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น หลังจากนั้นทำการผสม LDPE หรือ PBAT กับสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ทั้ง 7 ชนิดดังนี้คือ polyethylene wax (PE wax), Oxidized polyethylene homopolymer (OPE), Carnuba wax (CB wax), Shellac, Triethoxy(propyl)silane (silane1), Decyltriethoxysilane (silane2), Silicone ในอัตราส่วน 3 และ 5 %wt (โดย

เลือกจากความเป็นพิษต่อร่างกายโดยไม่ให้มีความเป็นพิษ หลังจากนั้นจะพิจารณาถึงความมี  
 ควันโดยจะเลือกสารที่ไม่มีควันหรือมีควันที่ต่ำก่อนเพื่อให้สามารถนำมาปรับสมบัติความชอบน้ำ)  
 ในขั้นตอนนี้จะใช้เครื่อง internal mixer ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ในการผสมจะใช้อุณหภูมิการ  
 ผสมอยู่ที่ 140 – 150 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบของเบลต 60 รอบต่อนาที ทำการผสม  
 เป็นเวลา 10 นาที โดยสูตรที่ผสมและปริมาณสารต่าง ๆ ที่ใช้ของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดจะ  
 แสดงดังตารางที่ 3.1 และ ตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.8 เครื่อง internal mixer รุ่น MX 105-D40L50 จากบริษัทเจริญทัศน์

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนการผสม LDPE กับสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ในอัตราส่วน 3 และ 5 %wt

Compounding	LDPE (wt%)	Additives (wt%)						
		CB wax	Shellac	PE wax	OPE	Silicone	Silane1	silane2
LDPE(2026K)	100	-	-	-	-	-	-	-
3CB	97	3	-	-	-	-	-	-
5CB	95	5	-	-	-	-	-	-
3Shellac	97	-	3	-	-	-	-	-

ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนการผสม LDPE กับสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ในอัตราส่วน 3 และ 5 %wt (ต่อ)

Compounding	LDPE (wt%)	Additives (wt%)						
		CB wax	Shellac	PE wax	OPE	Silicone	Silane1	silane2
5Shellac	95	-	5	-	-	-	-	-
3PE wax	97	-	-	3	-	-	-	-
5PE wax	95	-	-	5	-	-	-	-
3OPE	97	-	-	-	3	-	-	-
5OPE	95	-	-	-	5	-	-	-
3Silicone	97	-	-	-	-	3	-	-
5Silicone	95	-	-	-	-	5	-	-
3Silane1	97	-	-	-	-	-	3	-
5Silane1	95	-	-	-	-	-	5	-
3Silane2	97	-	-	-	-	-	-	3
5Silane2	95	-	-	-	-	-	-	5

ตารางที่ 3.3 แสดงอัตราส่วนการผสม PBAT กับสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ในอัตราส่วน 3 และ 5 %wt

Compounding	PBAT (wt%)	Additives (wt%)						
		CB wax	Shellac	PE wax	OPE	Silicone	Silane1	silane2
PBAT(c1200)	100	-	-	-	-	-	-	-
3CB	97	3	-	-	-	-	-	-
5CB	95	5	-	-	-	-	-	-
3Shellac	97	-	3	-	-	-	-	-
5Shellac	95	-	5	-	-	-	-	-
3PE wax	97	-	-	3	-	-	-	-
5PE wax	95	-	-	5	-	-	-	-
3OPE	97	-	-	-	3	-	-	-
5OPE	95	-	-	-	5	-	-	-
3Silicone	97	-	-	-	-	3	-	-
5Silicone	95	-	-	-	-	5	-	-
3Silane1	97	-	-	-	-	-	3	-
5Silane1	95	-	-	-	-	-	5	-
3Silane2	97	-	-	-	-	-	-	3
5Silane2	95	-	-	-	-	-	-	5

### 3.3.1.2 ศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม LDPE และ PBAT ที่เติมสารลดการเกาะผิว

- เตรียมชิ้นงานฟิล์ม

การเตรียมชิ้นงานให้เป็นฟิล์มจะทำโดยการนำเม็ดพลาสติกที่ผสมกับสารเติมแต่งลดการเกาะผิวมาทำการบดด้วยเครื่องบดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ก่อนแล้วนำไปขึ้นรูปกระบวนการกดอัดเพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มหนา  $200 \pm 50 \mu\text{m}$  โดยใช้เครื่อง Compression molding) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ด้วยอุณหภูมิ 140-150 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา preheat 4-5 นาที และกดอัด 1 นาทีหลังจากนั้นก็เตรียมชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบการเปียกผิวโดยการตัดฟิล์มให้มีขนาดชิ้นงานกว้าง x ยาว เท่ากับ  $1 \times 5 \text{ cm}$  โดยห้ามให้ฟิล์มที่ใช้ทดสอบสัมผัสกับมือหรือผิวหนัง หลังจากนั้นก็จะทำการเตรียมชิ้นงานที่จะใช้ทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง tensile testing โดยมีขนาดชิ้นงานขนาด  $1 \times 4 \text{ นิ้ว}$  และเก็บชิ้นงานทั้งหมดในกล่องลีดที่มีซิลิกาเจลเพื่อป้องกันความชื้น



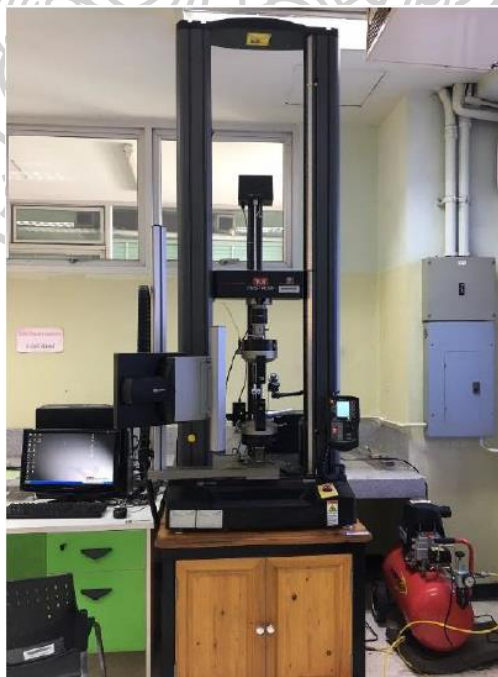
รูปที่ 3.9 เครื่อง Compression molding) รุ่น PR10-W300L350 จากบริษัทเจริญทัศน์

- **ศึกษาการเปียกผิวของพลาสติกด้วยเทคนิคการวัด contact angle**

ในการศึกษาสมบัติการเปียกผิวจะทำการทดสอบโดยการนำชิ้นงานที่เตรียมมาขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 1 x 5 cm มาทดสอบการเปียกผิวด้วยเทคนิค contact angle โดยจะมีการหยดน้ำ DI ลงบนชิ้นฟิล์มโดยใช้ micropipette และใช้กล้องถ่ายภาพมุมที่สัมผัสกันระหว่างน้ำกับฟิล์มจำนวน 4 จุดต่อตัวอย่างแล้วนำไปวัดมุมโดยใช้โปรแกรม image j แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- **ศึกษาสมบัติการดึงยึดด้วยเครื่อง (tensile testing)**

ในการศึกษาสมบัติการดึงยึดสามารถทำได้โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น 5659 จากบริษัท Instron Engineering Corporation ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยในการทดสอบจะนำชิ้นงานฟิล์มที่เตรียมเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 1 x 4 นิ้ว ไปทดสอบสมบัติการดึงยึด (tensile) ด้วยเครื่อง universal testing machine ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 882 โดยใช้ load cell ขนาด 5 กิโลนิวตัน และใช้ความเร็วในการดึงชิ้นงานเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อวินาที



รูปที่ 3.10 เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น 5659 จากบริษัท Instron Engineering Corporation



- **ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM)**

ในการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเมอร์สามารถทำได้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ที่กำลังขยายต่างๆทำให้สามารถศึกษาพื้นผิวของวัสดุ ขนาด และรูปร่างต่างๆ โดยในการทดสอบนี้เราจะเตรียมตัวอย่างทดสอบโดยการนำฟิล์มที่ได้ศึกษาสมบัติการเปียกผิวมาแล้ว พบว่าได้ค่า contact angle ที่สูงที่สุดมาศึกษาโดยจะนำฟิล์มตัดเป็นชิ้นเล็กๆ โดยห้ามให้สัมผัสกับมือหรือผิวหนังมาติดลงบน carbon conductive tape แล้วนำไปติดบน stub จากนั้นนำชิ้นงานไปทำการเคลือบด้วยทอง ผ่านกระบวนการ sputtering เพื่อป้องกันการสะสมประจุขณะทำการทดสอบและนำชิ้นงานที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์พื้นผิวของแผ่นฟิล์ม LDPE, LDPE ที่เติมสารลดการยึดเกาะผิว, PBAT และ PBAT ที่เติมสารลดการเกาะผิวด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM รุ่น MIRA3 จากบริษัท TESCAN ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM รุ่น MIRA3 จากบริษัท TESCAN

### 3.3.2 ศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีผลต่อการเป็ยกผิวในกระบวนการเป่าถุงโดยผสมใน twin screw extrusion และขึ้นรูปด้วยกระบวนการ blown film extrusion

#### 3.3.2.1 การเตรียมพอลิเมอร์ LDPE และ PBAT ที่เติมสารเติมแต่งลดการยึดเกาะผิตและขึ้นรูปเป็นถุงด้วยกระบวนการ blown film extrusion

- การเตรียมพอลิเมอร์คอมพาวด์

ในการเตรียมพอลิเมอร์ที่ผสมสารลดการยึดเกาะกับสารลดการเกาะผิว เพื่อนำไปใช้ขึ้นรูปในกระบวนการ blown film extrusion จะทำโดยการอบเม็ดพลาสติก LDPE และ PBAT และสารเติมแต่งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงในระหว่างกระบวนการผสม ก่อนทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีบแบบสกรูคู่ twin-screw extrusion รุ่น HRJ-25 จากบริษัท Enmach Co., Ltd ดังแสดงในรูปที่ 3.12 และสภาวะที่ใช้ในการผสมจะแสดงดังตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.5 ความเร็วรอบสกรูที่ใช้ในการผสมเท่ากับ 250 รอบต่อนาทีและหล่อเย็นด้วยน้ำอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นนำพอลิเมอร์ที่เติมสารลดการเกาะผิว ที่ได้จากกระบวนการอัดรีบมาตัดด้วยเครื่องตัดเม็ด



รูปที่ 3.12 เครื่องอัดรีบแบบสกรูคู่ twin-screw extrusion รุ่น HRJ-25 จากบริษัท Enmach Co.,

Ltd

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนการผสมและอุณหภูมิการผสม LDPE กับสารลดการเกาะผิว

Sample	Component (wt%)			Temp profile (° C)
	LDPE	CB	Silicone	
LDPE2026	100.0	-	-	85, 100, 110, 130, 135, 140, 145, 150, 155, 145
LDPE/1%CB wax	99.0	1.0	-	
LDPE/2%CB wax	98.0	2.0	-	
LDPE/3%Silicone	97.0	-	3.0	
LDPE/5%Silicone	95.0	-	5.0	

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนการผสมและอุณหภูมิการผสม PBAT กับสารลดการเกาะผิว

Sample	Component (wt%)			Temp profile (° C)
	PBAT	CB	Shellac	
PBAT	100.0	-	-	85, 100, 110, 130, 135, 140, 145, 150, 155, 145
PBAT/1%CB wax	99.0	1.0	-	
PBAT/2%CB wax	98.0	2.0	-	
PBAT/3%Shellac	97.0	-	3.0	
PBAT/5%Shellac	95.0	-	5.0	

- ทดสอบ melt viscosity ของพอลิเมอร์คอมพาวด์ด้วยการวัดค่า melt flow index

ในการศึกษา melt viscosity ของพอลิเมอร์จะทำโดยการนำเม็ดพลาสติกที่ผสมสารลดการเกาะผิวที่ได้จากกระบวนการอัดรีดแบบสกรูคู่มาทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อกำจัดความชื้นก่อนนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Melt Flow Indexer รุ่น Plastometer: MFR1 จากบริษัทเจริญท์สัน ดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยสภาวะที่ใช้ในการทดสอบคืออุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และมีน้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม ตามมาตรฐาน ASTM D1238



รูปที่ 3.13 เครื่อง Melt Flow Indexer รุ่น Plastometer: MFR1 จากบริษัทเจริญทัศน์

- ทดสอบน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค GPC (Gel permeation chromatography)

ในการทดสอบน้ำหนักโมเลกุลทำเพื่อหาน้ำหนักโมเลกุลที่เปลี่ยนแปลงไปของ PBAT และ PBAT ที่มีการเติม Shellac เป็นสารเติมแต่งเนื่องจากจากการทดสอบหาค่า MFI พบว่ามีการเพิ่มขึ้นมากจึงได้ทดสอบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักโมเลกุลของ PBAT ที่เติม Shellac ว่าน้ำหนักโมเลกุลลดลงจริงเพื่อเป็นการยืนยันผลของค่า MFI ที่เปลี่ยนแปลงมาก

- ขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการ blown film extrusion

ในการขึ้นรูปเป็นฟิล์มจะทำโดยการนำเม็ดพอลิเมอร์ที่ผสมสารเติมแต่งลดการเกาะผิวไปอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการ blown film extrusion ด้วยเครื่อง blown film extrusion รุ่น TB El 20/Bi จากบริษัท Thai plastic bag industries Co., LTD ดังแสดงในรูปที่ 3.14 เพื่อให้ได้เป็นแผ่นฟิล์มบาง โดยใช้ความเร็วรอบ screw ประมาณ 30-40 รอบต่อนาที โดยค่าของตัวแปรต่างๆ ทั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป ความหนาของฟิล์ม เส้นผ่านศูนย์กลางของฟิล์ม ค่า Blow

up ratio (BUR) และค่า Drawdown ratio (DDR) ของกระบวนการขึ้นรูปจะแสดง  
ดังตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.14 เครื่อง blown film extrusion รุ่น TB El 20/Bi จากบริษัท Thai plastic bag industries Co., LTD

ตารางที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการขึ้นรูปพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการ blown film extrusion

Sample	Parameter				Temp profile (° C)
	thickness of film (µm)	Diameter of film (mm)	BUR	DDR	
LDPE, LDPE compounded	100 ± 50	145	3.45	2.90	90, 120, 135, 165, 170
PBAT, PBAT compounded	100 ± 50	135	3.21	3.11	



### 3.3.2.2 ทดสอบสมบัติต่างๆของฟิล์มพลาสติก

- **ศึกษาสมบัติการเปียกผิวด้วยเทคนิค contact angle**

เตรียมชิ้นงานฟิล์มพลาสติกที่ขึ้นรูปจากกระบวนการ blown film extrusion โดยให้มีขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 1 x 5 cm มาทดสอบการเปียกผิวด้วยเทคนิค contact angle โดยจะมีการหยดน้ำ DI ลงบนชิ้นฟิล์มโดยใช้ micropipette และใช้กล้องถ่ายภาพมุมที่สัมผัสกันระหว่างน้ำกับฟิล์มจำนวน 4 จุดต่อตัวอย่างแล้วนำไปวัดมุมโดยใช้โปรแกรม image j แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

- **ศึกษาสมบัติการดึงยึดของฟิล์ม (tensile testing)**

เตรียมชิ้นงานฟิล์มพลาสติกที่ขึ้นรูปจากกระบวนการ blown film extrusion โดยให้มีขนาดกว้าง x ยาว เท่ากับ 1 x 4 นิ้ว มาทำการทดสอบสมบัติการดึงยึด (tensile) ด้วยเครื่อง universal testing machine ตามมาตรฐาน ASTM D 882 โดยใช้ load cell ขนาด 5 กิโลนิวตัน และใช้ความเร็วในการดึงชิ้นงานเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อวินาที

- **ศึกษาการแพร่ของสารในบรรจุภัณฑ์สู่อาหาร (migration test)**

การศึกษากการแพร่ของสารในบรรจุภัณฑ์ทดสอบเนื่องจากมีระเบียบเกี่ยวกับวัสดุและบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่สัมผัสอาหารโดยกำหนดให้วัสดุบรรจุภัณฑ์และสารที่สัมผัสกับอาหารต้องไม่มีการถ่ายเทสารในบรรจุภัณฑ์เข้าสู่อาหารในระดับที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค หรือก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในองค์ประกอบของอาหาร หรือไม่ทำให้ลักษณะทางกายภาพ เช่น รูป รส กลิ่น สี เกิดการเปลี่ยนแปลง พลาสติกที่สัมผัสอาหาร ในที่นี้ครอบคลุมถึง พลาสติกชั้นเดียว, พลาสติกชนิดหลายชั้น (plastic multi-layer material and articles) และพลาสติกที่มีลักษณะเป็นชั้นหรือพลาสติกที่เคลือบ (coating) ซึ่งในกระบวนการผลิตพลาสติกมีการใช้สารตั้งต้น (starting substance, monomer) และมีการเติมสารเติมแต่งเพื่อให้พลาสติกมีคุณสมบัติตามต้องการ เช่น สาร phthalate, plasticizer สารเหล่านี้มีมวลโมเลกุลน้อยซึ่งสารเหล่านี้สามารถเคลื่อนย้ายจาก

บรรจุภัณฑ์พลาสติกไปสู่อาหารได้และอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภค [25] จึงได้ทำการทดสอบการแพร่กระจายของสารสู่อาหารตาม มอก.1024 หรือ มอก.656 โดยการฟิล์มไปแช่ลงในสารละลาย 4 ชนิดที่เป็นตัวแทนของอาหารแต่ละประเภทคือ น้ำกลั่นเป็นตัวแทนของอาหารที่มีค่า pH เกิน 5, กรดแอสซิติคความเข้มข้นร้อยละ 4 เป็นตัวแทนของอาหารที่มีค่า pH ไม่เกิน 5, เอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 20 เป็นตัวแทนของอาหารที่มีแอลกอฮอล์ และนอร์มัลเฮปเทนเป็นตัวแทนของอาหารประเภทไขมันและน้ำมัน หลังจากนั้นทำการระเหยสารละลายเพื่อดูสารที่ตกค้างจากบรรจุภัณฑ์พลาสติก โดยจากมาตรฐานการทดสอบได้กำหนดปริมาณการแพร่กระจายโดยรวม หรือค่า Overall Migration Limited (OML) ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 เกณฑ์ที่กำหนดสูงสุดของสารที่สามารถละลายออกมาได้ [26]

รายการ	รายการทดสอบ	ตัวทำละลายที่ใช้สกัด	เกณฑ์ที่กำหนดสูงสุดมิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร
1	โพแทสเซียมเพอร์แมงกาเนตที่ใช้ทำปฏิกิริยา	น้ำกลั่น	10
2	สิ่งที่เหลือจากการระเหย	สารละลายกรดแอสซิติกร้อยละ 4 โดยปริมาตร	30
		น้ำกลั่น	30
		เอทานอล ร้อยละ 20 โดยปริมาตร	30
		นอร์มอลเฮปเทน	150
			30*
3	โลหะหนัก (เทียบเป็นตะกั่ว)	สารละลายกรดแอสซิติกร้อยละ 4 โดยปริมาตร	1

หมายเหตุ \* กรณีที่ใช้บรรจุภัณฑ์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีความมุ่งเน้นที่จะทำการปรับปรุงสมบัติการเปื่อยกผิวของของเหลวที่มีขี้้ว สำหรับพอลิเอทิลีนและพอลิบิวทิลีนอะดิเพทโคทาเรพทาเลท เพื่อลดการยึดเกาะของเศษอาหารที่มีขี้้วบนพลาสติกและทำให้สามารถนำมาผ่านกระบวนการรีไซเคิลได้สะดวกมากขึ้น เพื่อไปช่วยลดต้นทุนในกระบวนการล้างทำความสะอาดก่อนการรีไซเคิล นอกจากนี้วิธีการปรับผิวก็ใช้วิธีการเติมสารเติมแต่งเข้าไปเพื่อช่วยในการปรับสมบัติการยึดเกาะผิว นอกจากนี้ก็มีการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติการยึดเกาะผิวของของเหลว สมบัติการไหล และลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

**ส่วนที่ 1** ศึกษาการผสมพอลิเมอร์กับสารเติมแต่งลดการยึดเกาะผิว 7 ชนิด โดยการผสมในเครื่องผสมแบบปิด

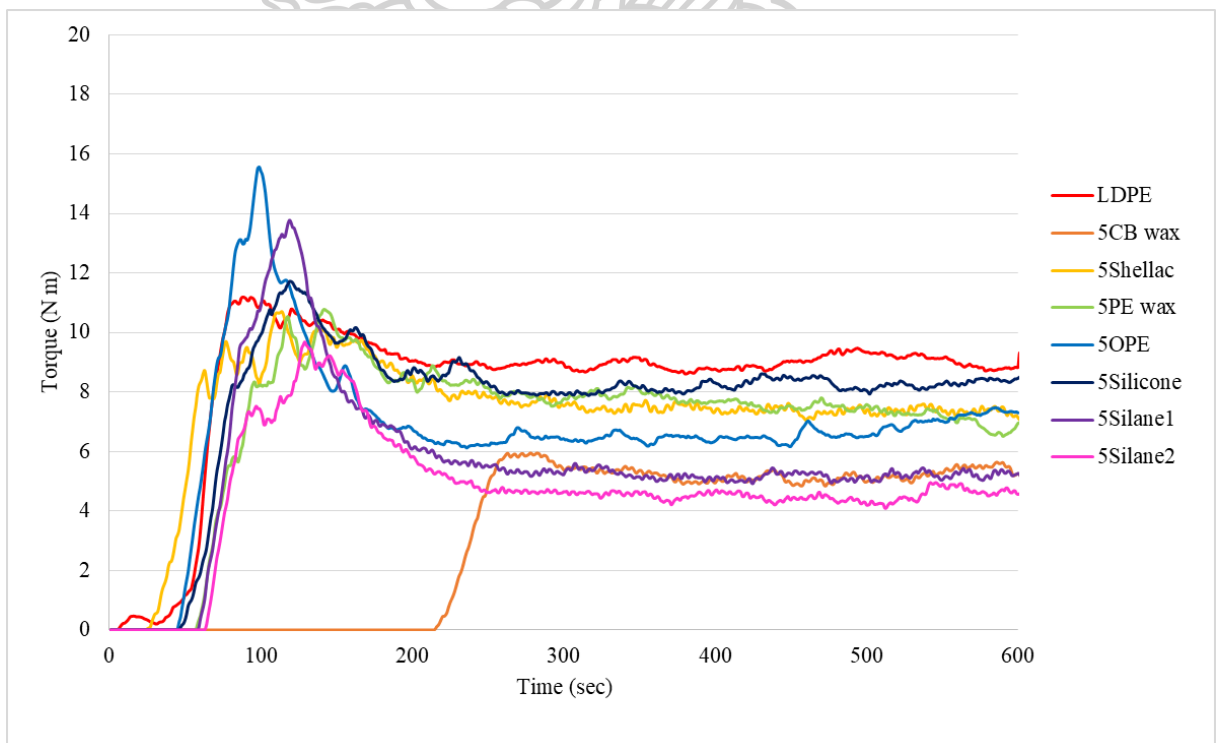
**ส่วนที่ 2** ศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีผลต่อการเปื่อยกผิวในกระบวนการเป่าถุงโดยผสมใน twin screw extrusion และขึ้นรูปด้วยกระบวนการ blown film extrusion

#### 4.1 ศึกษาการผสมพอลิเมอร์กับสารเติมแต่งลดการยึดเกาะผิว 7 ชนิด โดยการผสมในเครื่องผสมแบบปิด

##### 4.1.1 ศึกษากระบวนการผสมพลาสติกกับเติมสารเติมแต่งลดการเกาะผิวชนิดต่างๆ และปริมาณของสารเติมแต่งที่เติม

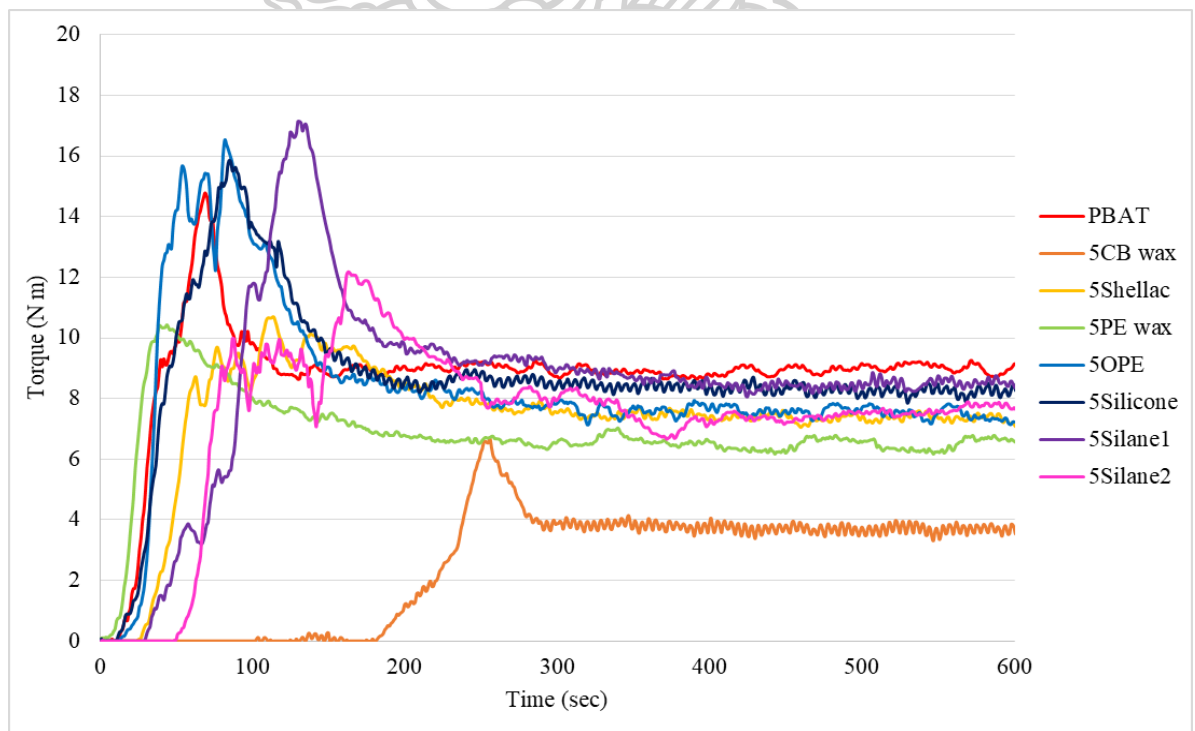
การศึกษาระบวนการผสมเม็ดพลาสติก LDPE และ PBAT กับ low retention additive ทั้ง 7 ชนิดดังนี้ คือ polyethylene wax (PE wax), Oxidized polyethylene homopolymer (OPE), Carnuba wax (CB wax), Shellac, Triethoxy(propyl)silane (silane1), Decyltriethoxysilane (silane2), Silicone ในอัตราส่วน 3 และ 5 wt% โดยในขั้นตอนนี้จะใช้เครื่อง internal mixer ที่อุณหภูมิการผสม 140 - 150 องศาเซลเซียส โดยค่าแรงบิดในการผสมของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดคือ LDPE และ PBAT จะแสดงดังรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 เพื่อใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเบื้องต้นว่ามีการเปลี่ยนแปลงของ LDPE และ PBAT ที่มีการเติมสารเติมแต่งและไม่เติมสารเติมแต่งอย่างไร

จากการผสม LDPE กับสารเติมแต่งทั้ง 7 ชนิดด้วยเครื่อง internal mixer ที่อุณหภูมิ 140-150 °C ความเร็วรอบของเบลต 60 รอบต่อนาที และนำค่าแรงบิดที่ได้มาเปรียบเทียบกันดังแสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งลงใน LDPE จะทำให้ค่าแรงบิดลดลงเนื่องมาจากสารเติมแต่งที่เติมลงไปส่วนมากเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าพอลิเมอร์ ดังนั้นสารโมเลกุลเล็กเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นให้กับพอลิเมอร์จึงส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายทำให้พอลิเมอร์สามารถไหลได้ง่ายมากขึ้น ค่าแรงบิดจึงมีค่าที่ลดลงและตัวที่ทำให้ค่าแรงบิดแตกต่างจากตัวอื่นมากคือ LDPE ที่มีการเติม carnauba wax เนื่องจาก carnauba wax เมื่อหลอมจะมีลักษณะคล้ายน้ำมันมีความหนืดต่ำทำให้ไม่เข้าไปผสมกับพอลิเมอร์จึงไปเคลือบที่ chamber และพอลิเมอร์ทำให้มีความมันและลื่นส่งผลให้ในช่วงแรกที่ยังใส่พอลิเมอร์ไม่เต็ม chamber ไม่ค่อยมีพอลิเมอร์เกาะที่ผิวของเบลตผสมหรือที่ผิวของ chamber จึงวัดค่าแรงบิดไม่ได้ หลังจากการผสมเมื่อนำพอลิเมอร์ LDPE ที่ผสมกับ carnauba wax ออกจาก chamber พบว่าสามารถหลุดออกมาได้ง่ายแทบจะไม่มีติดที่เบลตซึ่งแตกต่างจาก LDPE ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งหรือมีการเติมสารเติมแต่งชนิดอื่น ๆ ที่จะมีการติดของพอลิเมอร์คอมพาวด์ที่เบลตอยู่



รูปที่ 4.1 แสดงค่าแรงบิดของ LDPE และ LDPE ที่มีการเติมสารเติมแต่ง 5 wt%

จากการผสม PBAT กับสารเติมแต่งทั้ง 7 ชนิดด้วยเครื่อง internal mixer ที่อุณหภูมิ 140-150 °C ความเร็วเบลต 60 รอบต่อนาที และนำค่าแรงบิดที่ได้มาเปรียบเทียบกับดังแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งลงใน PBAT จะทำให้ค่าแรงบิดลดลงจากเดิมเล็กน้อยเนื่องมาจากสารเติมแต่งที่เติมลงไปส่วนมากเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าพอลิเมอร์ ดังนั้นสารโมเลกุลเล็กเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นให้กับพอลิเมอร์จึงส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายทำให้พอลิเมอร์สามารถไหลได้ง่ายมากขึ้น ค่าแรงบิดจึงมีค่าที่ลดลงและตัวที่ทำให้ค่าแรงบิดลดลงอย่างมากคือ PBAT ที่มีการเติม carnauba wax เนื่องจาก carnauba wax เมื่อหลอมจะมีลักษณะคล้ายน้ำมันมีความหนืดต่ำทำให้ไม่เข้าไปผสมกับพอลิเมอร์จึงไปเคลือบที่ chamber และพอลิเมอร์ ส่งผลให้ในช่วงแรกที่ยังใส่พอลิเมอร์ไม่เต็ม chamber ไม่ค่อยมีพอลิเมอร์เกาะที่ผิวเบลตผสมหรือที่ผิวของ chamber เลยจึงวัดค่าแรงบิดไม่ได้ หลังจากการผสมเมื่อนำพอลิเมอร์คอมพาวด์ PBAT ที่ผสมกับ carnauba wax ออกจาก chamber สามารถหลุดออกมาได้ง่ายแทบจะไม่มีการติดที่เบลตซึ่งแตกต่างจาก PBAT ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งหรือมีการเติมสารเติมแต่งชนิดอื่น ๆ ที่จะมีการติดของพอลิเมอร์คอมพาวด์ที่เบลตอยู่ ซึ่งเหมือนกับใน LDPE



รูปที่ 4.2 แสดงค่าแรงบิดของ PBAT และ PBAT ที่มีการเติมสารเติมแต่ง 5 wt%

#### 4.1.2 ศึกษาสมบัติต่างๆ ของพลาสติกที่ผ่านกระบวนการผสมกับสารลดการเกาะผิว

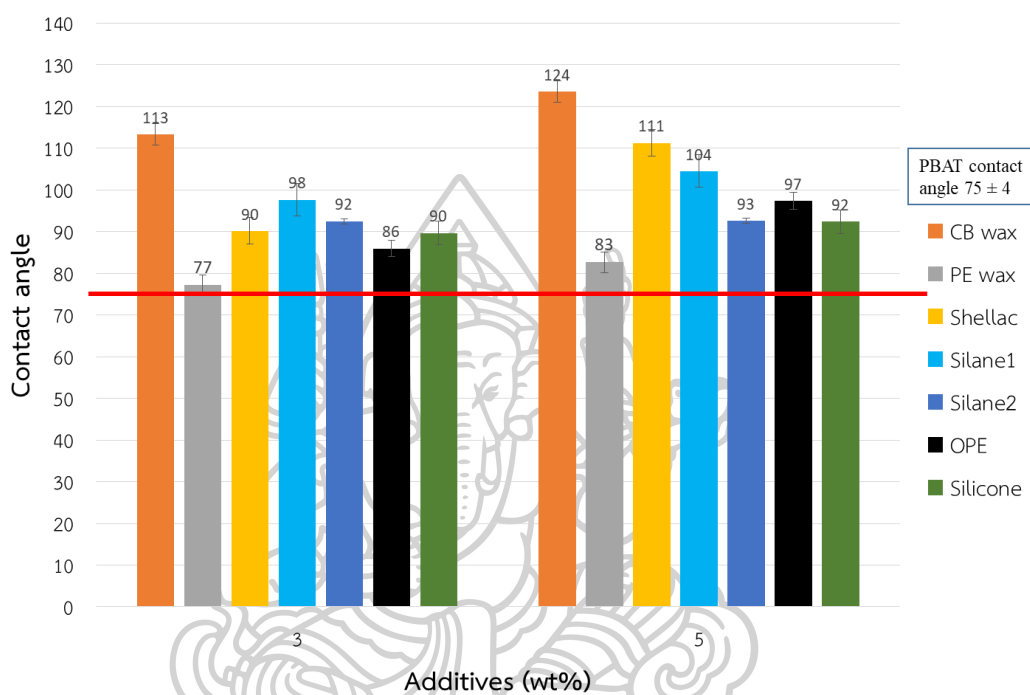
ในขั้นตอนการศึกษาสมบัติต่างๆ ของพลาสติกที่ผ่านการผสมกับสารลดการเกาะผิว จะทำโดยการนำพอลิเมอร์ที่ผ่านการผสมกับสารลดการเกาะผิวจากตอนที่ 4.1.1 มาทำการบดด้วยเครื่องบดเพื่อให้มีขนาดที่เล็กลงเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานต่อได้สะดวกมากขึ้น หลังจากนั้นนำมาพอลิเมอร์ที่ผ่านการบดแล้วมาขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มโดยกระบวนการ compression molding ที่อุณหภูมิ 140 – 150 องศาเซลเซียส จากนั้นจะได้ฟิล์มที่เป็นแผ่นใหญ่หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาตัดเป็นขนาดชิ้นงานตามการทดสอบต่างๆ

##### 4.1.2.1 ทดสอบสมบัติการเปียกผิวของพลาสติกที่ผ่านการผสมกับสารลดการเกาะผิว

การทดสอบสมบัติการเปียกผิวของ LDPE, LDPE ที่ผสมสารลดการเกาะผิว, PBAT และ PBAT ที่ผสมสารลดการยึดเกาะ เป็นส่วนสำคัญที่สุดของงานวิจัยนี้เนื่องจากเราสามารถดูความสามารถในการเปียกผิวของสารที่มีขั้ว บนผิวฟิล์มว่าสามารถเปียกผิวกับฟิล์มได้มากหรือน้อยอย่างไร โดยในขั้นตอนนี้เราจะทำการวัดมุมสัมผัสของฟิล์มกับน้ำ (water contact angle) เพื่อใช้ในการบ่งบอกว่าฟิล์มพอลิเมอร์กับน้ำมีแรงดึงดูด (adhesion) มากหรือน้อย เพื่อแสดงความเป็นขั้วของฟิล์มที่ได้และจะนำค่าที่ได้ต่างๆ มาเปรียบเทียบกับกันเพื่อดูว่าสารเติมแต่งตัวไหนสามารถทำให้ contact angle สามารถเพิ่มได้มากที่สุดแสดงว่าฟิล์มนั้นมีความเป็น hydrophobic ที่สูงมากที่สุด และการเปียกผิวของฟิล์มพอลิเมอร์กับน้ำเกิดขึ้นได้น้อยที่สุด ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำการวัดค่า contact angle ของตัวอย่าง 4 จุดต่อตัวอย่างแล้วนำมาเฉลี่ยและทำการเปรียบเทียบกัน

การศึกษาศักยภาพการเปียกผิวของ PBAT โดยการวัดค่า water contact angle เบื้องต้นของฟิล์มที่ผ่านการผสมในเครื่อง internal mixer และขึ้นรูปด้วยกระบวนการ compression molding พบว่าเมื่อมีการเติมสารลดการเกาะผิวใน PBAT ค่า contact angle มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสารที่เติมไปส่วนใหญ่เป็นพวกที่ไม่มีขั้ว (hydrophobic) เมื่อเติมลงไปแล้วจะเข้าไปลดความเป็นขั้วของพอลิเมอร์ลง หรือเกิดมาจากเกิดการ bloom ของสารเติมแต่งออกมาที่พื้นผิวของฟิล์มทำให้ที่ผิวฟิล์มมีความเป็นขั้วต่ำจึงทำให้มีการเกาะของสารที่มีขั้วบนผิวน้อยลง ดังนั้นการเติมสารเติมแต่งเหล่านี้จึงทำให้ PBAT มีค่า contact angle ที่สูงมากขึ้นและจากรูปที่ 4.3 พบว่าสารเติมแต่งที่สามารถปรับค่า contact angle ของ PBAT ที่มีค่า contact angle  $75 \pm 4$  องศา ได้สูงที่สุดคือ carnauba wax (CB wax)

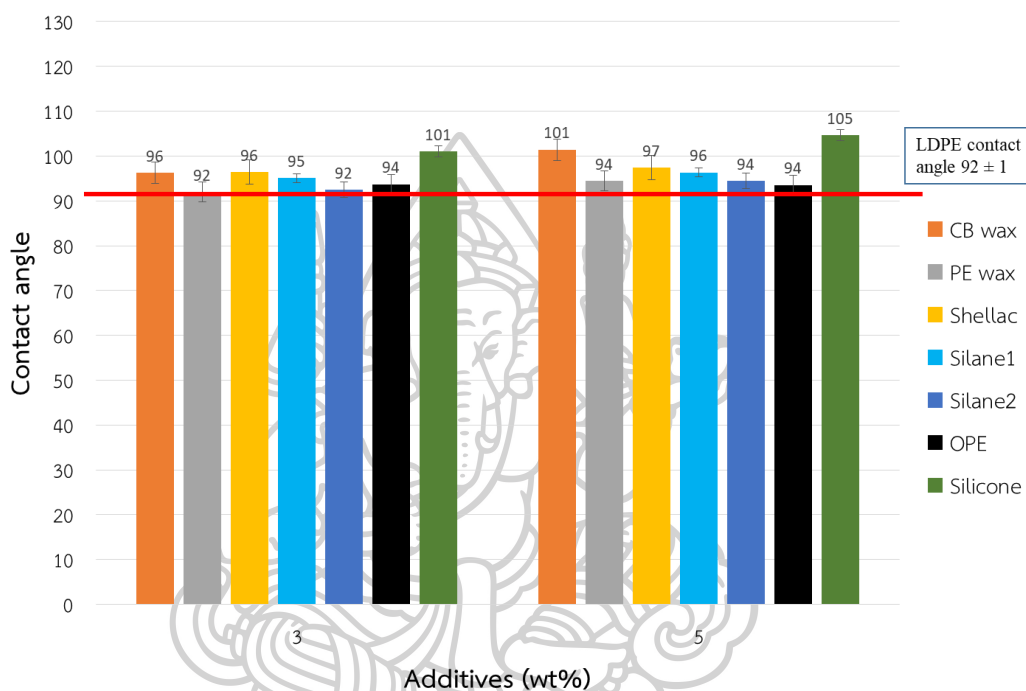
ที่มีค่า contact angle  $116 \pm 3$  องศาเมื่อเติมสารเติมแต่ง 3 wt% และเมื่อเติมสารเติมแต่ง 5 wt% สามารถเพิ่มค่า contact angle ได้ถึง  $122 \pm 2$  องศา ส่วนตัวรองลงมาที่สามารถเพิ่มค่า contact angle ได้สูงคือ Shellac ได้ค่า contact angle  $90 \pm 1$  องศาเมื่อเติม 3 wt% และเมื่อเติม 5 wt% สามารถเพิ่มค่า contact angle ได้ถึง  $111 \pm 3$  องศา



รูปที่ 4.3 แสดงค่า Contact angle ของ PBAT และ PBAT ที่มีการเติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ในอัตราส่วน 3 และ 5 wt%

การศึกษาสมบัติการเปียกผิวของ LDPE โดยการวัดค่า water contact angle เบื้องต้นของฟิล์มที่ผ่านการผสมในเครื่อง internal mixer และขึ้นรูปด้วยกระบวนการ compression molding พบว่าเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งใน LDPE ค่า contact angle มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากสารที่เติมไปส่วนใหญ่เป็นพวกที่ไม่มีขั้วและ LDPE ก็เป็นตัวที่ไม่มีขั้วอยู่แล้วจึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของ contact angle ไม่มากเมื่อเทียบกับ PBAT ที่มีการเปลี่ยนแปลงของ contact angle ได้สูงมากกว่าและจากรูปที่ 4.4 พบว่าสารเติมแต่งที่สามารถปรับค่า contact angle ของ LDPE ที่มีค่า contact angle  $92 \pm 1$  องศา ได้สูงที่สุดคือ Silicone ที่มีค่า contact angle  $101 \pm 1$  องศาเมื่อเติมสารเติมแต่ง 3-wt% และเมื่อเติมสารเติมแต่ง 5 wt% ค่า contact angle มีค่า  $105 \pm 1$  องศา แต่ฟิล์มที่

ได้จะมีความชุ่มที่มากขึ้นเนื่องจากการเติม silicone ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้สารเติมแต่งเกิดการ bloom ออกมาที่ผิวมากขึ้นและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผิวโดยทำให้เห็นว่ามี ความชุ่มที่มากขึ้น ส่วนสารเติมแต่งรองลงมาที่สามารถเพิ่มค่า contact angle ได้สูงคือ carnauba wax (CB wax) ได้ค่า contact angle  $96 \pm 1$  องศาเมื่อเติม 3 wt% และเมื่อเติม 5 wt% สามารถเพิ่มค่า contact angle ได้  $101 \pm 2$  องศา



รูปที่ 4.4 แสดงค่า Contact angle ของ LDPE และ LDPE ที่มีการเติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ในอัตราส่วน 3 และ 5 wt%

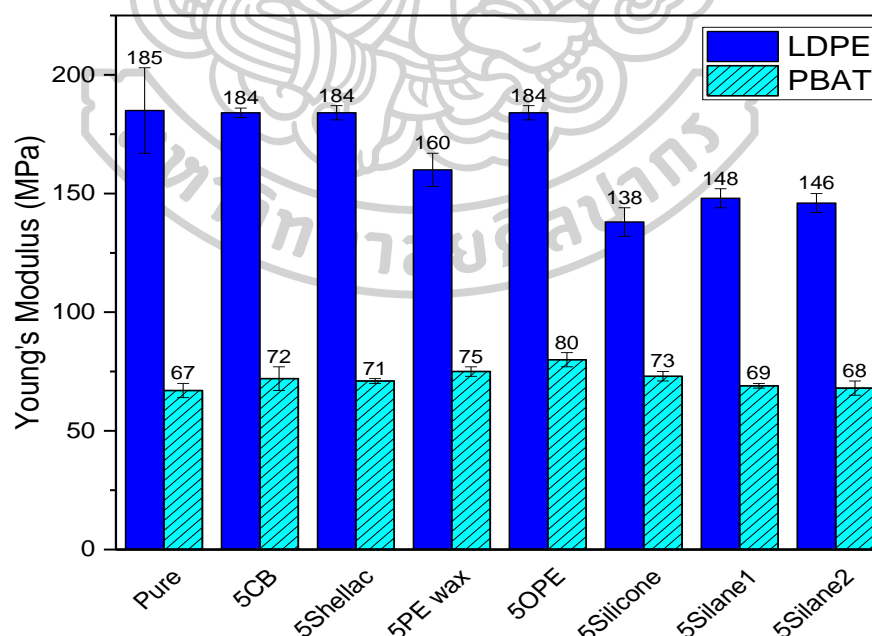
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่า contact angle ของ PBAT และ LDPE ดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 พบว่าสารลดการเกาะผิวที่ทำให้ PBAT มีค่า contact angle ที่สูงที่สุดคือ carnauba wax เนื่องจากโครงสร้างของ carnauba wax เป็นโซ่ตรงและไม่มีขั้วเมื่อเติมลงใน PBAT แล้วอาจจะไม่เข้ากันและด้วยการที่ carnauba wax สามารถตกผลึกได้จึงทำให้เกิดการตกผลึกมาอยู่ที่ผิวของ PBAT ส่งผลให้ผิวของฟิล์ม PBAT มีความเป็นขั้วที่ต่ำเมื่อหยดน้ำลงบนผิวจึงทำให้ได้ค่า contact angle ที่สูงต่างจากการเติม carnauba wax ใน LDPE เพราะ LDPE ไม่มีขั้วทำให้เมื่อเติมตัว carnauba wax ที่มีขั้วต่ำเหมือนกันอาจเกิดการกระจายตัวใน matrix ของ LDPE ได้ดีจึงเกิดการตกผลึกและ bloom ออกมาที่ผิวได้



น้อย และสารลดการเกาะผิวที่ทำให้ค่า contact angle ของ LDPE สูงที่สุดคือ silicone เนื่องจาก silicone ไม่หลอมและเข้ากับ LDPE แต่สามารถกระจายตัวได้ทั่วเพราะจะเห็นฟิล์มที่ได้มีความขุ่นที่มากขึ้นและจะเห็นชั้นของ silicone ปกคลุมบนผิวของฟิล์ม LDPE ที่มีการเติม silicone

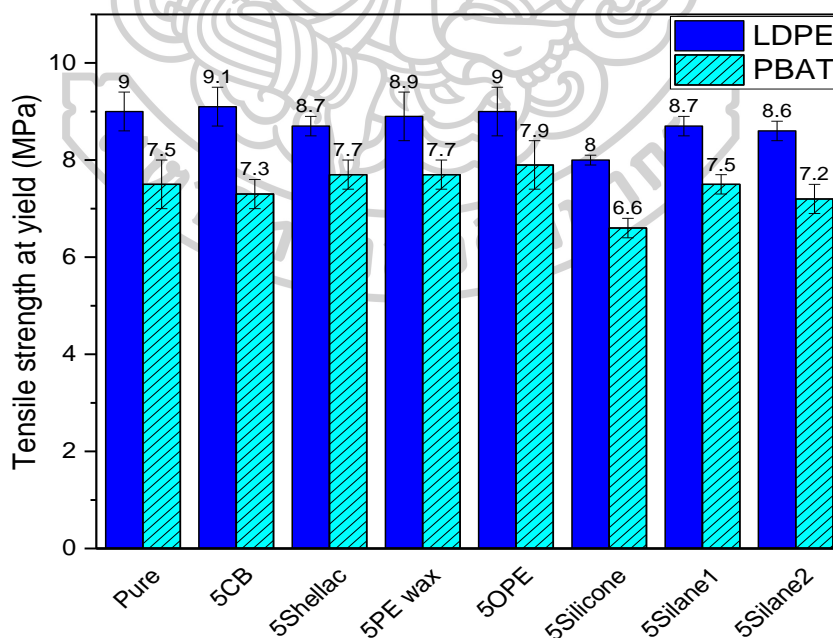
#### 4.1.2.2 ทดสอบสมบัติเชิงกลของพลาสติกที่ผ่านการผสมกับสารลดการเกาะผิว

ทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดคือ LDPE และ PBAT ทั้งตัวที่ผสมสารเติมแต่งและไม่ผสมสารเติมแต่งโดยการทดสอบจะทดสอบตาม ASTM D 882 ใช้อัตราการดึงที่ 500 มิลลิเมตรต่อวินาที ใช้โหลดขนาด 5 กิโลนิวตัน เพราะเป็นการทดสอบมาตรฐานเดียวกันกับในอุตสาหกรรมที่ทำถุงพลาสติกบรรจุอาหาร โดยชิ้นงานที่นำมาทดสอบจะได้อาจจากการนำคอมพาวด์ที่ได้จากกระบวนการ internal mixer ไปทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยกระบวนการ compression molding แล้วนำฟิล์มที่ได้ไปตัดให้มีขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D 882 เพื่อดูค่าการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลเบื้องต้นว่าการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเพียงใดเพื่อศึกษาว่าเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งแต่ละชนิดไปแล้วจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์อย่างไร



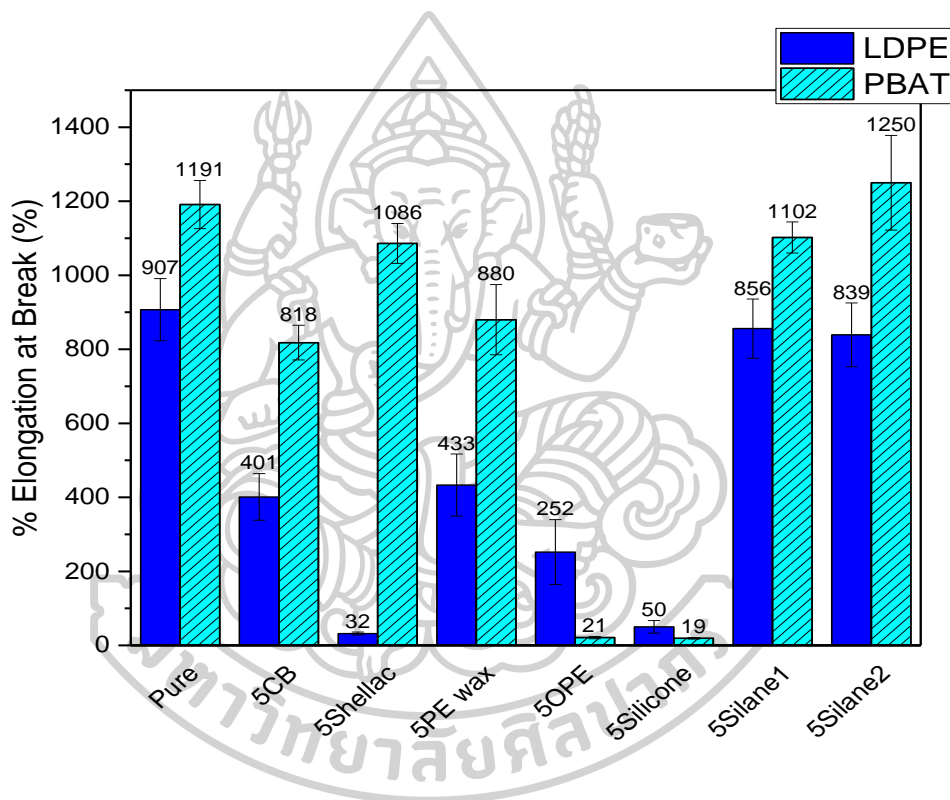
รูปที่ 4.5 แสดงค่า modulus ของ LDPE และ PBAT ที่เติมและไม่เติมสารลดการเกาะผิวชนิดต่างๆ

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของ LDPE และ PBAT ที่มีการเติมสารลดการเกาะผิวและไม่เติมดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าสำหรับ LDPE และ LDPE ที่มีการเติม carnauba wax (CB), Shellac, OPE ค่า modulus ไม่เปลี่ยนแปลงแต่ LDPE ที่มีการเติม PE wax, Silicone, silane1, silane2 พบว่ามีการลดลงของ modulus เนื่องจาก PE wax เป็น polyethylene ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า LDPE จึงทำให้เข้าไปทำการแทรกในสายโซ่ของ LDPE ได้และทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นส่งผลให้สายโซ่เคลื่อนไหวได้ง่ายค่า modulus จึงลดลง [27] การเติม silicone จะเข้าไปทำให้สารหรือวัสดุมีความเป็นยางที่มากขึ้นเนื่องจาก silicone gum ที่เติมมีความนิ่มกว่าเม็ด LDPE จึงทำให้เมื่อเติมไปแล้วค่า modulus จึงมีค่าที่ลดลง ส่วนการเติม silane ทั้ง 2 ชนิดจะทำให้ค่า modulus ลดลงเนื่องจาก silane สามารถเข้าไปแทรกตามสายโซ่ของ LDPE ได้และทำหน้าที่คล้ายๆกับเป็น plasticizer [28] ส่งผลให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้ง่ายค่า modulus จึงลดลง แต่จากการทดสอบ tensile testing ส่วนใน PBAT พบว่าเมื่อมีการเติมสารลดการเกาะผิวแล้วค่า modulus มีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากสารเติมแต่งที่เติมไปส่วนมากจะเป็น wax ที่เป็นของแข็ง เมื่อเติมแล้วจะส่งผลให้ค่า modulus เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.6 แสดงค่า tensile strength ของ LDPE และ PBAT ที่เติมและไม่เติมสารลดการเกาะผิวชนิดต่างๆ

จากการทดสอบพบว่าค่า tensile strength ของ LDPE และ PBAT จะลดลงเล็กน้อยหรือแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมสารเติมแต่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 การลดลงเพียงเล็กน้อยอาจเกิดเนื่องจากสารเติมแต่งจะเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ การกระจายแรงจึงเกิดได้ยากมากขึ้นเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งเมื่อได้รับแรงดึงเข้าไปจะทำให้เกิดการขาดได้ง่ายมากขึ้น ซึ่งแนวโน้มของค่า tensile strength ของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด คล้ายคลึงกันหรือบอกได้ว่าการเติมสารลดการเกาะผิวแทบไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของพอลิเมอร์เมื่อถูกแรงดึง



รูปที่ 4.7 แสดงค่า Elongation at break ของ LDPE และ PBAT ที่เติมและไม่เติมสารลดการเกาะผิวชนิดต่างๆ

จากการทดสอบ tensile testing พบว่าค่า elongation at break จะมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมสารแต่งทั้งใน LDPE และ PBAT ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เนื่องจากการเติมสารเติมแต่งส่วนมากเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ LDPE แต่สำหรับพวก wax เมื่อเติมปริมาณที่มากจะทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดการลดลงของค่า elongation at break ที่มากกว่า ส่วนสารเติมแต่ง shellac เมื่อเติมลงไป LDPE

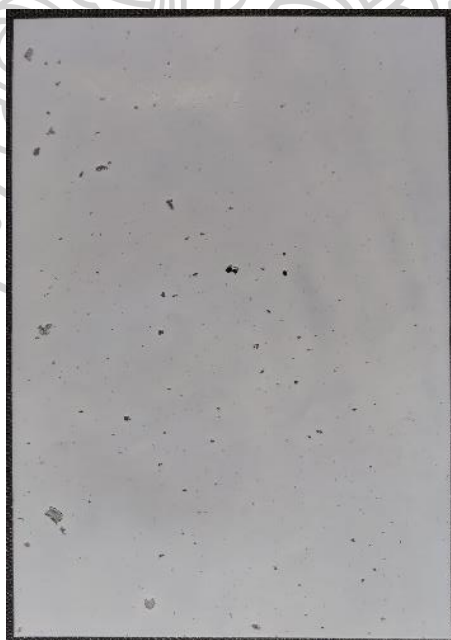
แล้วมีการกระจายตัวยังไม่ค่อยดี นอกจากนี้ที่ผิวฟิล์มที่ผสม shellac จะเห็นเป็นเหมือนเกล็ดของ shellac กระจายอยู่ที่ผิวฟิล์ม ดังรูปที่ 4.8 จึงทำให้บนผิวฟิล์มเกิดเห็น defect และเมื่อทดสอบบริเวณเหล่านี้จะเป็นจุดรวมแรงเค้นทำให้เกิดการขาดได้ง่ายและนอกจาก shellac ส่วนสารเติมแต่ง silicone เมื่อเติมเข้าไปใน LDPE แล้วพบว่าค่า elongation at break มีค่าที่ต่ำลงมากเนื่องจากโครงสร้างและความเป็นขั้วที่ต่างกันจึงทำให้สารเติมแต่งเข้ากับ LDPE ยังไม่ดียังเห็นเป็นเศษของ silicone กระจายอยู่ที่ผิวฟิล์ม ดังรูปที่ 4.9 และไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่จึงทำให้ค่า elongation at break ลดลง สำหรับ PBAT เมื่อมีการเติมสารลดการเกาะผิวพวก silane จะทำให้ค่า elongation at break เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ส่วนการเติม wax จะทำให้ค่า elongation at break ที่แนวโน้มลดลงเหมือนกับ LDPE เนื่องจากเกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดการลดลงของค่า elongation at break ที่มากกว่า แต่สารลดการเกาะผิวที่ทำให้ค่า elongation at break ของ PBAT ลดลงอย่างมากคือสารเติมแต่ง OPE และ silicone เมื่อเติมลงไป PBAT แล้วมีการกระจายตัวยังไม่ค่อยดีเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกันทำให้ผสมกันไม่ค่อยดี นอกจากนี้ที่ผิวฟิล์ม PBAT ที่ผสม silicone จะเห็นเป็นเหมือนกลุ่มของ silicone กระจายอยู่ที่ผิวฟิล์มจึงทำให้บนผิวฟิล์มเกิดเห็น defect ดังรูปที่ 4.10 และเมื่อทดสอบจะทำให้บริเวณเหล่านี้เป็นจุดรวมแรงเค้นทำให้เกิดการขาดได้ง่ายทำให้ค่า elongation at break ต่ำลงอย่างมาก



รูปที่ 4.8 ฟิล์ม LDPE ที่ผสม Shellac



รูปที่ 4.9 फिल्म LDPE ที่ผสม Silicone



รูปที่ 4.10 फिल्म PBAT ที่ผสม Silicone

#### 4.1.2.3 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาบนผิวฟิล์มด้วยเทคนิค SEM

##### (Scanning electron microscopy)

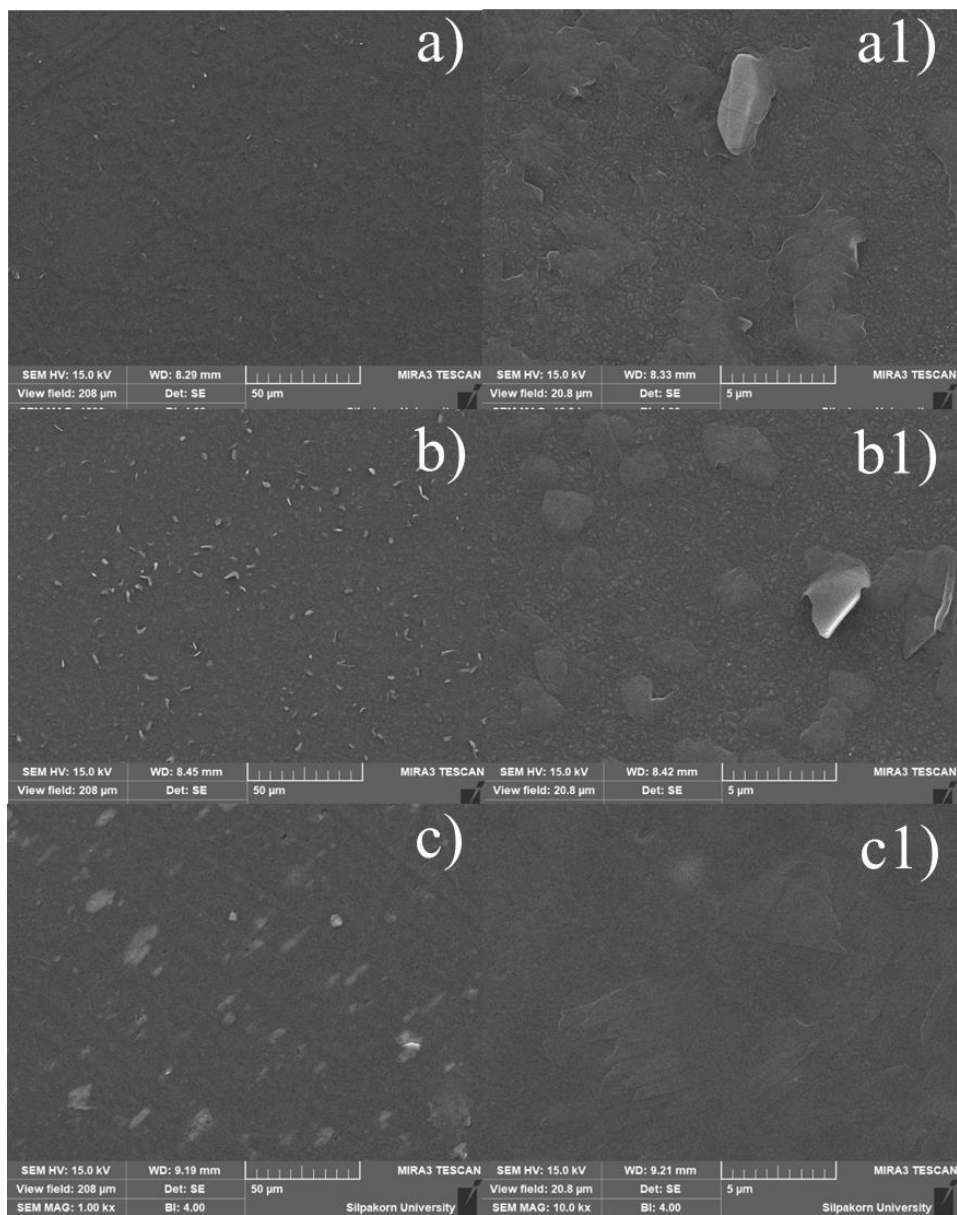
การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์ม LDPE, LDPE ที่มีการเติมสารเติมแต่ง, PBAT และ PBAT ที่มีการเติมสารเติมแต่งโดยตัวที่เลือกมาทดสอบคือฟิล์ม LDPE และ PBAT ที่มีการเติมสารเติมแต่งและสามารถเพิ่มค่า contact angle ได้สูงที่สุดเพื่อจะได้ว่าผิวของฟิล์มพอลิเมอร์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร โดยจะทำการศึกษาดูด้วยเครื่อง Scanning electron microscope ที่กำลังขยาย 1000 เท่าและ 10000 เท่า

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ผิวของ LDPE และ LDPE ที่เติมสารลดการเกาะผิว แสดงดังรูปที่ 4.11 ภาพ SEM บนผิวของฟิล์ม LDPE, LDPE ที่ผสม carnauba wax และ silicone พบว่าผิวฟิล์ม LDPE มีความเรียบและเมื่อเพิ่มกำลังขยายจะพบว่าผิวมีการหลุดเล็กน้อยเนื่องมาจากการขึ้นรูปด้วยกระบวนการกดอัดที่อาจใช้แผ่น Teflon ที่มีรอยและเมื่อมีการเติม carnauba wax จะพบว่าผิวของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงคือมีเกล็ดๆ มาเกาะที่ผิวซึ่งแสดงว่า Carnauba wax มีการ bloom มาที่ผิวของฟิล์ม LDPE เนื่องจาก carnauba wax เมื่อหลอมเหลวแล้วจะสามารถผสมเข้ากับ LDPE ได้บางส่วนเพราะความเป็นขั้วที่ใกล้เคียงกันจึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการ bloom ของ carnauba wax ไม่มาก เมื่อมีการเติม Silicone จะพบว่าที่ผิวของ LDPE เหมือนมีชั้นเคลือบบนผิวเนื่องมาจาก silicone ที่เติมลงไปมีส่วนประกอบของ Siloxane polymer กับ Fume silica ทำให้เมื่อเติมเข้าไปส่วนที่เป็น Siloxane polymer ไม่เข้ากับ LDPE จึงเกิดการแยกชั้นขึ้น และเมื่อเพิ่มกำลังขยายดูที่ผิวของ LDPE ที่ผสม Silicone จะพบว่าผิวมีความเรียบที่เกิดจาก siloxane polymer มาเคลือบที่ผิว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชั้นที่เคลือบที่ผิวนี้คือสารเติมแต่ง Silicone ซึ่งเป็นผลมาจากการ bloom มาที่ผิว

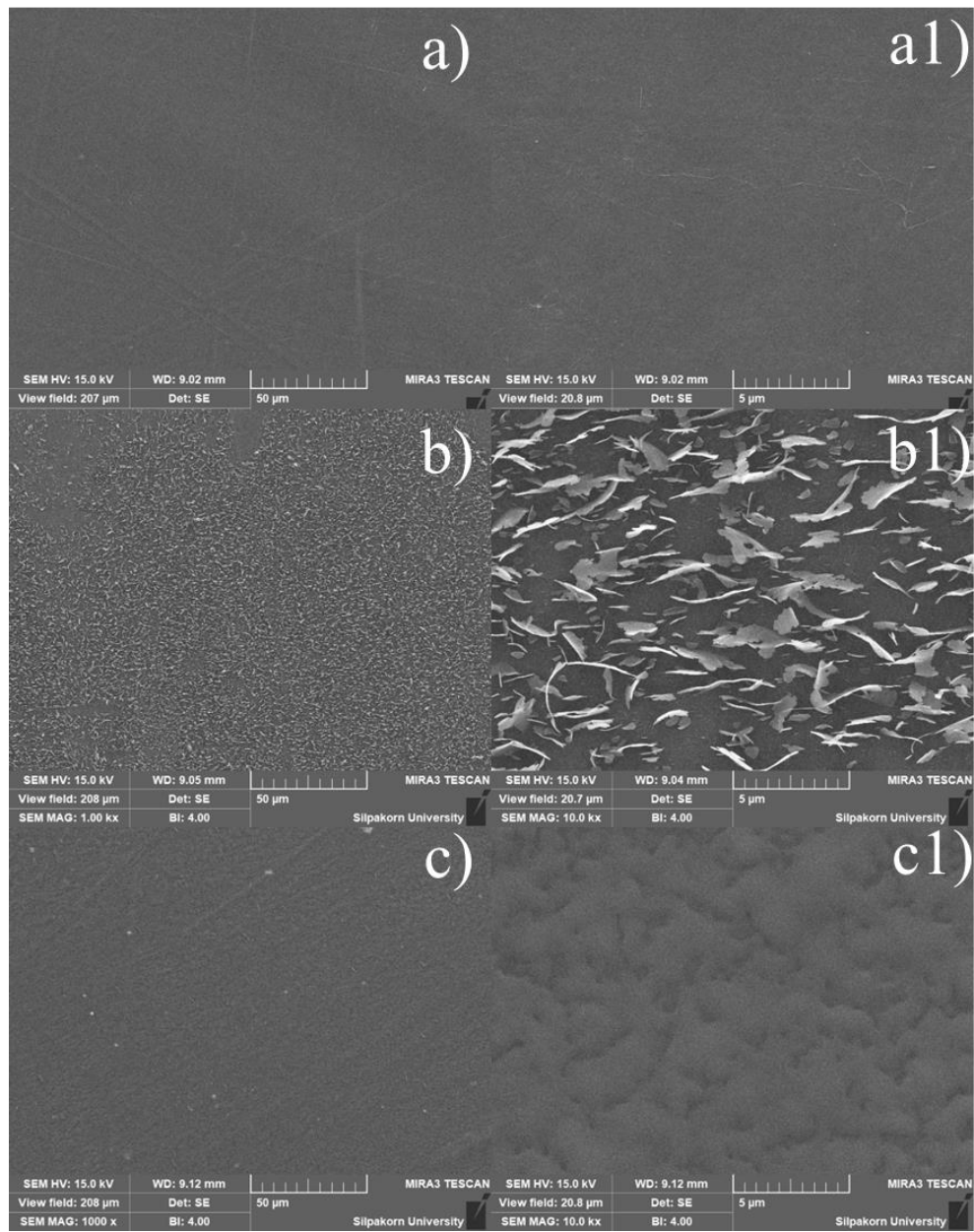
การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ PBAT และคอมพาวด์ของ PBAT แสดงดังรูปที่ 4.12 แสดงภาพ SEM บนผิวของฟิล์ม PBAT, PBAT ที่ผสม carnauba wax และ shellac พบว่าผิวฟิล์ม PBAT มีความเรียบ และเมื่อมีการเติม Carnauba wax จะพบว่าผิวของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงคือมีเกล็ดมาเกาะที่ผิวจำนวนมากทั่วทั้งผิวฟิล์มและมีการกระจายตัวทั่วทั้งผิวฟิล์ม ซึ่งแสดงว่า carnauba wax มีการ bloom มาที่ผิวของฟิล์ม PBAT เนื่องจาก carnauba wax มีขั้วที่น้อยกว่า PBAT จึงทำให้เกิดไม่เข้ากันเมื่อ carnauba wax เย็นตัวลงก็จะเกิดการตกผลึกและ bloom ออกมาที่ผิวมากกว่าใน LDPE เมื่อมีการเติม



Shellac จะพบว่าที่ผิวของ PBAT เหมือนมีชั้นเคลือบและเมื่อเพิ่มกำลังขยายดูที่ผิวของ PBAT ที่ผสม Shellac จะพบว่าผิวมีความขรุขระมากขึ้นเหมือนมีชั้นมาเคลือบที่ผิวซึ่งเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 10000 เท่าจะแสดงให้เห็นว่ามีเหมือน grain เคลือบที่ผิวซึ่งเป็นผลมาจากการที่ Shellac ที่ผสมเข้าไปอ่อนตัวและมีโครงสร้างควมมีขี้ไต้เคียงกับ PBAT ทำให้สามารถกระจายตัวได้ดีแต่เมื่อเย็นตัวแล้วเกิดการ bloom มาที่ผิวของฟิล์มทำให้ผิวเกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.11 แสดงภาพพื้นผิวของ a) LDPE, b) LDPE/CB, c) LDPE/Silicone ที่กำลังขยาย 1000 เท่าและ a1) LDPE, b1) LDPE/CB, c1) LDPE/Silicone ที่กำลังขยาย 10000 เท่า



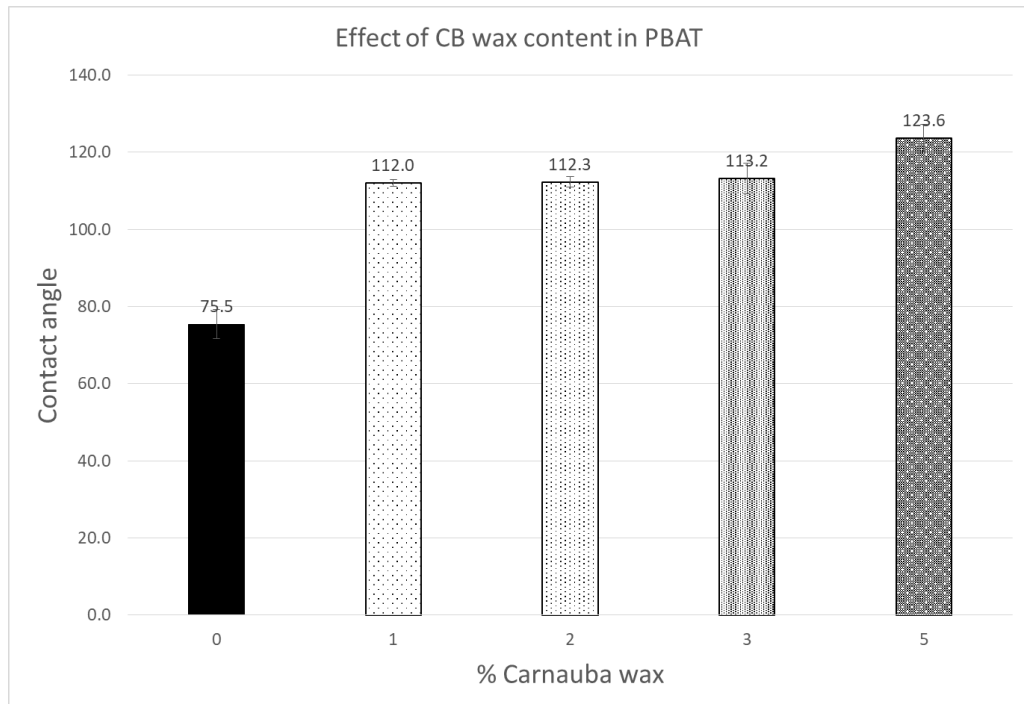
รูปที่ 4.12 แสดงภาพพื้นผิวของ a) PBAT, b) PBAT /CB, c) PBAT/Shellac ที่กำลังขยาย 1000 เท่าและ a1) PBAT, b1) PBAT /CB, c1) PBAT/Shellac ที่กำลังขยาย 10000 เท่า

## 4.2 ศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีผลต่อการเป็ยกผิวในกระบวนการเป่าถุงโดยผสมใน twin screw extrusion และขึ้นรูปด้วยกระบวนการ blown film extrusion

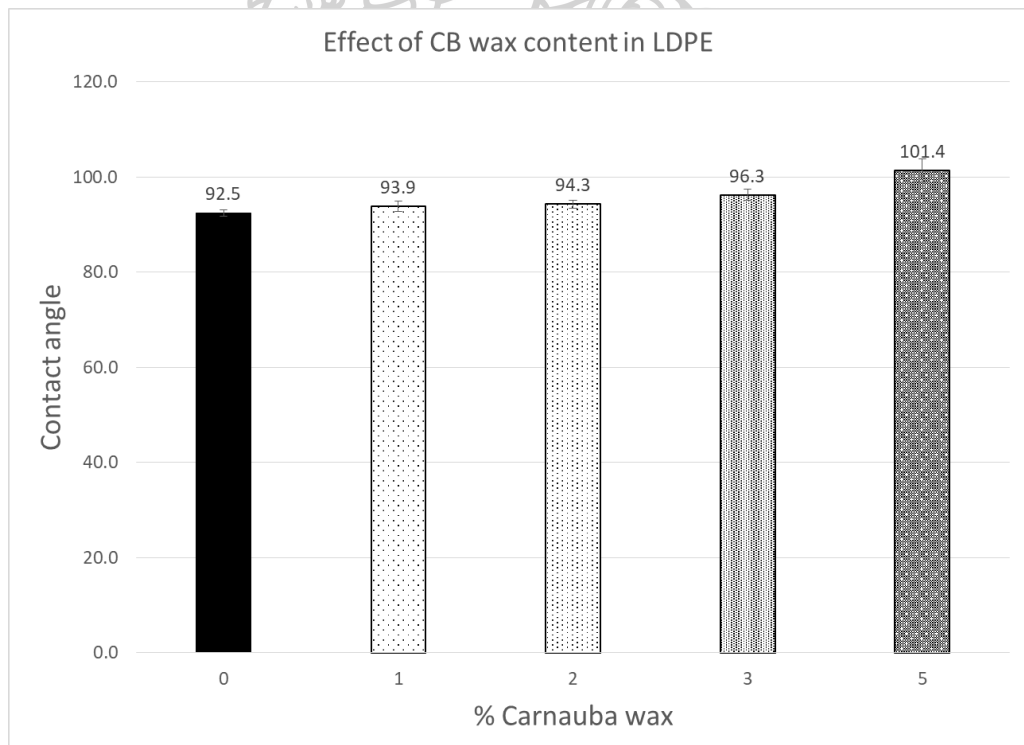
### 4.2.1 ทำการผสมพลาสติกกับสารลดการเกาะผิว

ในขั้นตอนนี้จะทำการเลือกสูตรที่ดีที่สุดหรือสารเติมแต่งที่ดีที่สุดที่สามารถลดการเกาะผิวของของเหลวมีขั้วกับพลาสติก แล้วนำพอลิเมอร์กับสารลดการเกาะผิวมาทำการผสมกันโดยใช้เครื่อง twin screw extrusion โดยอุณหภูมิที่ใช้จะอ้างอิงมาจากกระบวนการผสมโดยใช้เครื่อง internal mixer โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส ในกระบวนการผสมสารลดการเกาะผิวที่จะนำมาผสมกับ PBAT คือ carnauba wax และ shellac ส่วนสารลดการเกาะผิวที่จะนำมาผสมกับ LDPE คือ silicone และ carnauba wax โดยปริมาณของสารเติมแต่งที่จะเลือกใช้ตามปริมาณที่ได้อ่านตอนคอมพาวด์ในเครื่อง internal mixer แต่พบว่าการเติม carnauba wax เข้าไปในปริมาณ 3 wt% จะทำให้ carnauba wax ไปเคลือบอยู่บริเวณรอบๆ barrel ทำให้เปลดแรงเสียดทานที่จะทำให้พอลิเมอร์ด้านในไหลไปข้างหน้าส่งผลให้ไม่มีเส้น extrudate ไหลออกมาจากหัว die ดังนั้นจึงต้องทำการลดปริมาณการเติม carnauba wax เพื่อให้สามารถทำการคอมพาวด์ได้แต่การปรับปริมาณสารเติมแต่งที่จะเติมก็ต้องทำการศึกษาความเปลี่ยนแปลงความสามารถในการเป็ยกผิวของพอลิเมอร์เพิ่มเติมดังแสดงในรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14

จากการศึกษาสมบัติการเป็ยกผิวด้วยค่า contact angle ของ PBAT ที่เติม carnauba wax ปริมาณต่างๆ พบว่าค่า contact angle จะลดลงเมื่อปริมาณการเติม carnauba wax ลดลงแต่ที่การเติม carnauba wax ในปริมาณ 1 wt%, 2 wt% ใน PBAT จะพบว่าค่า contact angle ไม่แตกต่างกันดังในรูปที่ 4.13 จึงทำการลดปริมาณการเติม carnauba wax ลงมาเหลือ 1 wt% และ 2 wt% เพื่อให้สามารถทำการผสมโดยใช้เครื่อง extrude ได้ไม่เกิดปัญหา



รูปที่ 4.13 แสดงค่า Contact angle ของ PBAT และ PBAT ที่มีการเติม carnauba wax ในอัตราส่วน 1, 2, 3 และ 5 wt%



รูปที่ 4.14 แสดงค่า Contact angle ของ LDPE และ LDPE ที่มีการเติม carnauba wax ในอัตราส่วน 1, 2, 3 และ 5 wt%

จากปัญหาด้านการผสมพอลิเมอร์กับสารเติมแต่ง carnauba wax ที่กล่าวไปก่อนหน้านี้ทำให้ต้องทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเติม carnauba wax ที่ส่งผลต่อการเปียกผิวของ LDPE ดังแสดงในรูปที่ 4.14 สังเกตได้ว่า LDPE ที่เติม carnauba wax พบว่าเมื่อมีการลดปริมาณการเติม carnauba wax ลงจะทำให้ค่า contact angle ลดลงแต่การเติม carnauba wax ที่ปริมาณ 3 wt% ขึ้นไปจะส่งผลต่อการผสมด้วยเครื่อง extrude ดังนั้นจึงทำการผสม LDPE กับ carnauba wax ที่ปริมาณ 1 wt% และ 2 wt% เท่านั้นแต่ทั้ง 2 อัตราส่วนไม่มีความแตกต่างกันด้านสมบัติการเปียกผิว เนื่องจากค่า contact angle ไม่ต่างกัน

#### 4.2.1.1 ทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ที่เติมสารลดการเกาะผิวก่อนนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการ blown film extrusion

หลังจากการผสมพอลิเมอร์กับสารลดการเกาะผิวด้วยเครื่อง twin screw extrusion แล้วจะมีการทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ที่ผสมสารลดการเกาะผิว เพื่อดูว่าสมบัติการไหลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรบ้างก่อนจะนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการ blown film extrusion และจากการทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่อง melt flow indexer ที่อุณหภูมิ 190 องศาจะได้ค่า melt flow index (MFI) ตามตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PBAT ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งจะมีค่า MFI เท่ากับ  $7.33 \pm 0.43$  กรัมต่อ 10 นาที และเมื่อมีการเติมสารเติมแต่ง carnauba wax ใน PBAT จะพบว่าค่า MFI มีค่าสูงขึ้นเป็น  $10.78 \pm 0.7$  และ  $10.82 \pm 0.13$  กรัมต่อ 10 นาที เมื่อเติม carnauba wax ปริมาณ 1 wt% และ 2 wt% ตามลำดับ ซึ่งการที่ค่า MFI เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจาก Carnauba wax ที่เติมเข้าไปจะทำหน้าที่คล้าย lubricant ทำให้ PBAT สามารถไหลได้ง่ายขึ้นทำให้ MFI เพิ่มขึ้น การเติม shellac พบว่า ค่า MFI มีค่า  $30.32 \pm 1.89$  และ  $42.58 \pm 0.61$  กรัมต่อ 10 นาที เมื่อเติม shellac ปริมาณ 3 wt% และ 5 wt% ตามลำดับ ซึ่งการที่ค่า MFI เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลหรือการที่สารเติมแต่งทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นเคลือบผิวไว้ทำให้ไหลออกมาได้มากขึ้น ส่วน LDPE ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งพบว่ามีค่า MFI  $5.74 \pm 0.11$  กรัม ต่อ 10 นาที และเมื่อมีการเติมสารเติมแต่ง carnauba wax ใน LDPE จะพบว่าค่า MFI มีค่าสูงขึ้นเป็น  $5.99 \pm 0.59$  และ  $7.22 \pm 0.42$  กรัมต่อ 10 นาที เมื่อเติม carnauba wax ปริมาณ 1 wt% และ 2 wt% ตามลำดับ ซึ่งการที่ค่า MFI เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจาก carnauba wax ที่เติมเข้าไปจะทำหน้าที่คล้ายสารหล่อลื่นเหมือนการเติมใน

PBAT ส่วนการเติม silicone พบว่าค่า MFI มีค่า  $5.88 \pm 0.14$  และ  $5.90 \pm 0.12$  กรัม ต่อ 10 นาที เมื่อเติม silicone ปริมาณ 3 wt% และ 5 wt% ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.1** แสดงค่า melt flow index ของพอลิเมอร์และพอลิเมอร์ที่มีการผสมสารเติมแต่ง

Sample	ค่าเฉลี่ยดัชนีการไหล (g/10 นาที)
PBAT	$7.33 \pm 0.43$
PBAT/1%CB	$10.76 \pm 0.70$
PBAT/2%CB	$10.83 \pm 0.13$
PBAT/3%Shellac	$30.32 \pm 1.89$
PBAT/5%Shellac	$42.58 \pm 0.61$
LDPE	$5.74 \pm 0.11$
LDPE/1%CB	$5.99 \pm 0.59$
LDPE/2%CB	$7.22 \pm 0.42$
LDPE/3%Silicone	$5.88 \pm 0.14$
LDPE/5%Silicone	$5.90 \pm 0.12$

#### 4.2.1.2 ทดสอบน้ำหนักโมเลกุล

เนื่องมาจากจากการทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ที่เติมสารลดการเกาะผิว ก่อนนำไปขึ้นรูปพบว่าพอลิเมอร์ที่เติมสารลดการเกาะผิว PBAT/Shellac มีค่า MFI ที่เพิ่มขึ้นมากจึงสงสัยว่าเกิดจากอะไรและคาดว่าจะเกิดปฏิกิริยาการตัดสายโซ่ของ PBAT อันเนื่องมาจาก Shellac มีหมู่ hydroxyl group ซึ่งอาจจะเข้าไปตัดสายโซ่ที่เป็นหมู่ ester ของ PBAT ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงจึงส่งผลให้ค่า MFI เพิ่มขึ้น

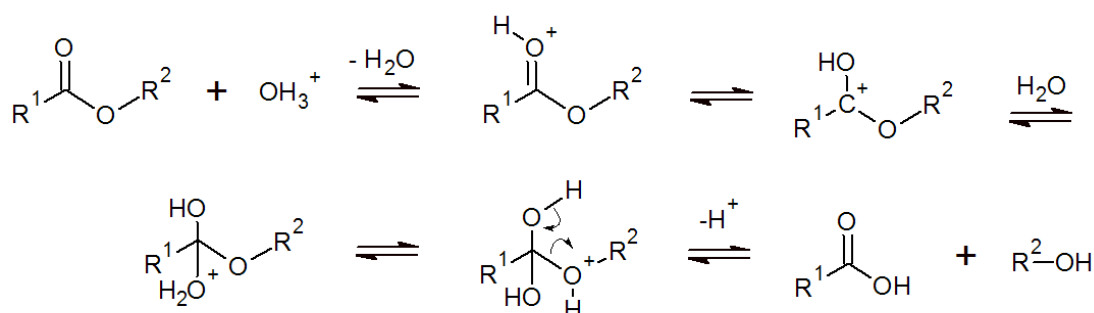
จากการทดสอบ Gel permeability chromatography พบว่า มีการลดลงของน้ำหนักโมเลกุลจริงเมื่อมีการเติม Shellac น้ำหนักโมเลกุลมีการเปลี่ยนแปลงจากจาก 77261 เป็น 52131 dallon ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งแสดงว่าสายโซ่ถูกตัดเนื่องจากเกิดปฏิกิริยา hydrolysis โดยมีกรดเป็นตัวเร่งดังแสดงในรูปที่ 4.15 และส่งผลให้มีค่าดัชนีการไหลที่เพิ่มมากขึ้น



ตารางที่ 4.2 แสดงน้ำหนักโมเลกุลของ PBAT และ PBAT ผสม shellac

Sample	molecular weight				polydispersity
	Mn	Mw	MP	Mz	
PBAT	35148	77261	54951	146627	2.20
Shellac	2021	3224	1937	5222	1.60
PBAT/Shellac	24049	52131	39621	90187	2.17

#### Acid Catalyzed Ester Hydrolysis



รูปที่ 4.15 แสดงปฏิกิริยา hydrolysis ที่มีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 4.2.2 ทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ blown film extrusion

โดยในการขึ้นรูปฟิล์มด้วยกระบวนการ blown film extrusion จะมีการทดสอบดัชนีการไหลก่อนพบว่าค่าดัชนีการไหลของ LDPE ที่มีการเติมสารเติมแต่งจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วน PBAT มีค่าดัชนีการไหลเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งแต่ไม่ส่งผลต่อกระบวนการขึ้นรูปหลังจากนั้นจะนำไปเป่าขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิ 90, 140, 165, 175, 170 การที่ใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าตอนที่ทำการผสมเนื่องมาจากการใช้อุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดเจลที่เกิดจากการไม่หลอมของพอลิเมอร์จำนวนมากใน LDPE และ PBAT เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ผ่านเข้าไปใน barrel ของเครื่อง blown film extrusion ที่สั้นมีระยะเวลาในการหลอมยังไม่เพียงพอที่จะทำให้พอลิเมอร์หลอมทั้งหมด จึงต้องทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นกว่าตอนที่ทำการผสมเพื่อทำให้พอลิเมอร์หลอมทั้งหมดก่อน และใช้ screw speed 405 rpm โดยมี blow up ratio เป็น 3.45 และ drawdown ratio

เป็น 2.9 สำหรับ LDPE ส่วนใน PBAT มี blow up ratio เป็น 3.21 และ drawdown ratio เป็น 3.11 เพื่อขึ้นรูปเป็นฟิล์ม




#### 4.2.3 ทดสอบสมบัติต่างๆของฟิล์มพลาสติก

##### 4.2.3.1 ลักษณะทางกายภาพ




จากการสังเกตลักษณะของฟิล์ม LDPE และ PBAT ที่ได้จากกระบวนการ blown film extrusion พบว่าฟิล์ม LDPE เมื่อมีการเติม carnauba wax ไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะภายนอกแต่เมื่อเติม silicone พบว่ามีความขุ่นมากขึ้นและผิวฟิล์มมีความต้านมากขึ้น สำหรับฟิล์ม PBAT การเติม carnauba wax ไม่ทำให้ลักษณะภายนอกเปลี่ยนแปลงแต่เมื่อเติม shellac จะพบว่าการเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองอ่อนและลักษณะอื่นจะแสดงดังตารางที่

4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงลักษณะของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากกระบวนการ blown film extrusion

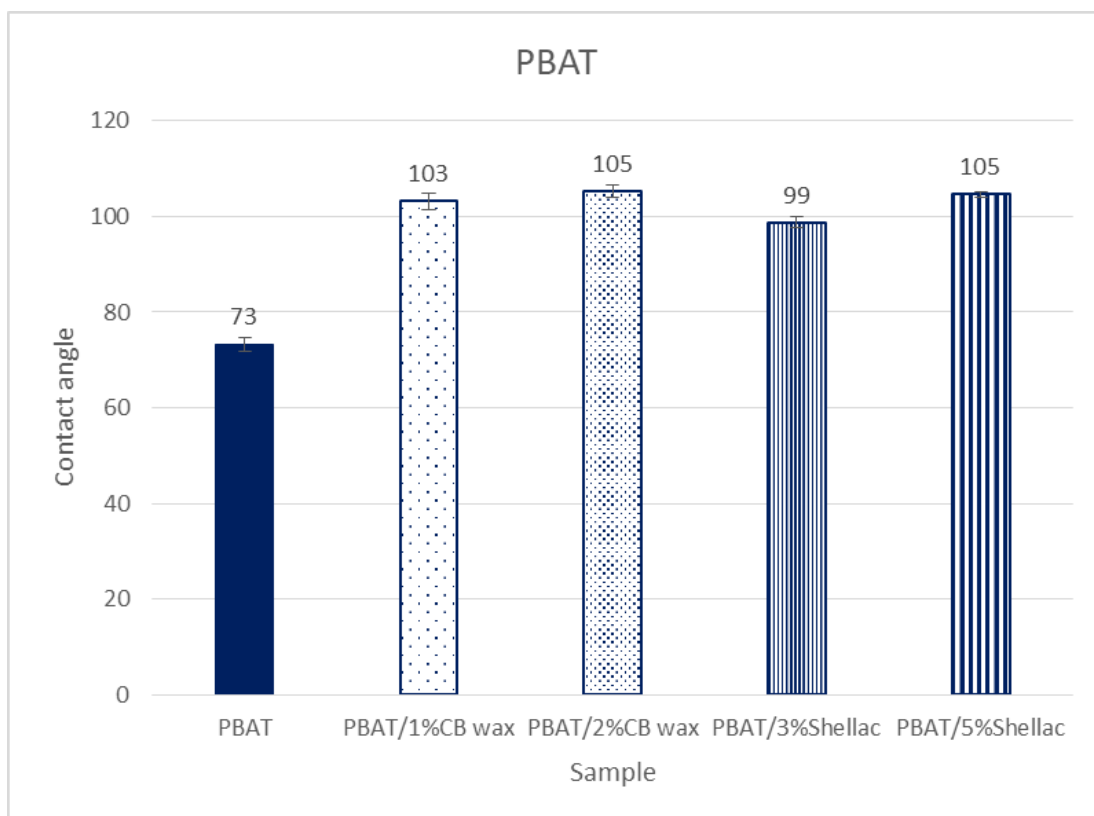
Sample	ลักษณะของฟิล์ม	
	ภาพฟิล์ม	สี
LDPE		ใส, ไม่มีสี
LDPE/CB		ใส, ไม่มีสี
LDPE/Silicone		สีขาวขุ่น

ตารางที่ 4.4 แสดงลักษณะของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากกระบวนการ blown film extrusion (ต่อ)

Sample	ลักษณะของฟิล์ม	
	ภาพฟิล์ม	สี
PBAT		ขาวขุ่น
PBAT/CB		ขาวขุ่น
PBAT/Shellac		สีเหลือง อ่อน

#### 4.2.3.2 ทดสอบสมบัติการเปียกผิวของฟิล์มพลาสติก

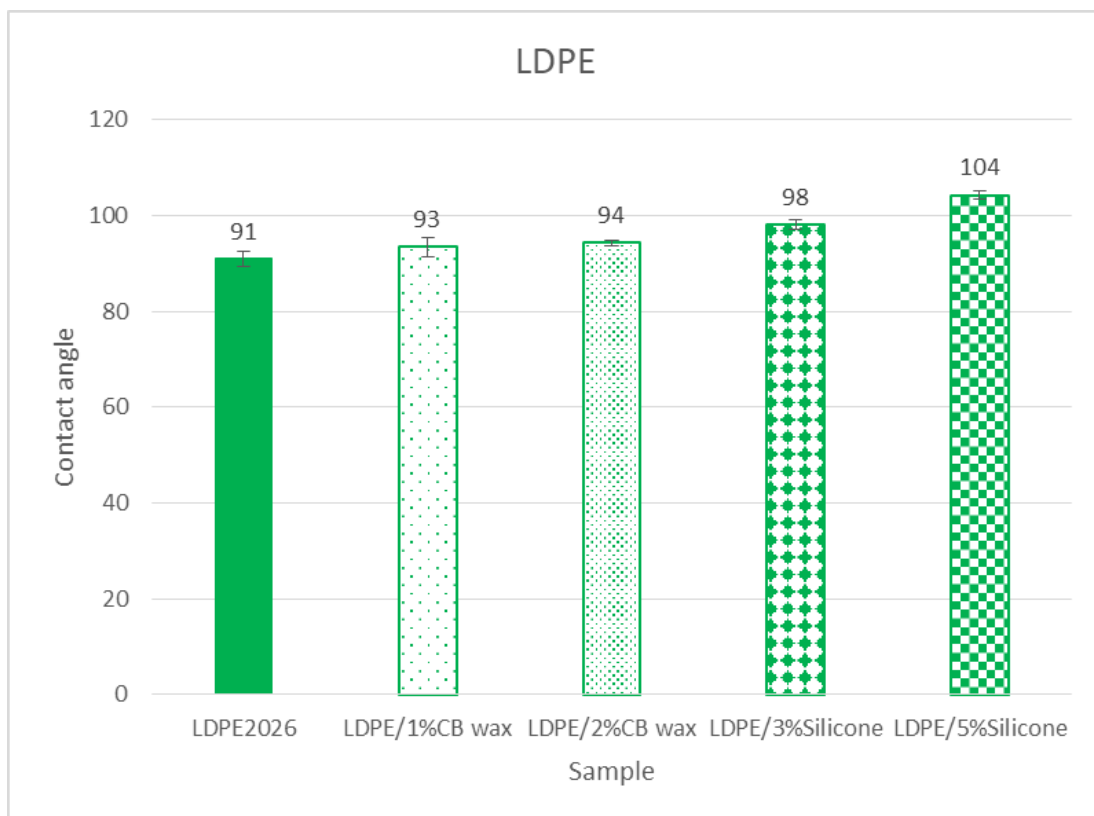
ทดสอบ contact angle ของฟิล์มพลาสติกที่ได้มาจากกระบวนการ blown film extrusion เพื่อยืนยันว่าสารลดการเกาะผิว สามารถลดการเปียกผิวให้กับฟิล์มพอลิเมอร์ได้ และดูว่าถ้าทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ blown film จริงเหมือนกับที่โรงงานผลิตถุงพลาสติกจะทำให้ค่า contact angle มีการเปลี่ยนแปลงมากน้อยแค่ไหนโดยในขั้นตอนนี้ จะทำการวัดค่า contact angle ของตัวอย่าง 4 จุดต่อตัวอย่างแล้วนำมาเฉลี่ยและทำการเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.16 แสดงค่า Contact angle ของ PBAT และ PBAT ที่มีการเติมสารเติมแต่ง Carnauba wax 1, 2 wt% และ Shellac 3, 5 wt%

จากการทดสอบ water contact angle พบว่าฟิล์ม PBAT มีค่า contact angle อยู่ที่  $73 \pm 1$  องศา แต่เมื่อมีการเติม carnauba wax ปริมาณ 1 และ 2 wt% สามารถเพิ่มค่า contact angle เป็น  $103 \pm 2$  และ  $105 \pm 1$  องศา ตามลำดับ ส่วนการเติม shellac ปริมาณ 3 และ 5 wt% สามารถเพิ่มค่า contact angle เป็น  $99 \pm 1$  และ  $105 \pm 1$  องศา ตามลำดับ ดังนั้นตัวที่สามารถลดการเปียกผิว และเพิ่มความเป็น hydrophobic ได้มากที่สุดสำหรับ PBAT คือ carnauba wax ที่มีการเติม ปริมาณ 2 wt% เนื่องจากมีปริมาณการเติมที่น้อยกว่า shellac และนอกจากนี้ PBAT กับ carnauba ผสมเข้ากันได้ไม่ค่อยดีเนื่องจากโครงสร้างที่มีความแตกต่างกันมากและความเป็นขั้วที่แตกต่างกันเพราะ PBAT มีความเป็นขั้วเล็กน้อยที่บริเวณหมู่ของ ester group และ carboxyl group แต่โครงสร้างของ carnauba เป็น ester ที่เป็นโซ่ตรงสายยาวๆ ทำให้เป็นโครงสร้างที่มีขั้วน้อยมากจึงส่งผลให้ carnauba เกิดการ bloom มาที่ผิวซึ่งยืนยันด้วยลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เห็นเหมือน

เกล็ดๆ บนผิวฟิล์มจำนวนมาก ส่งผลให้ค่า contact angle ของ PBAT เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16

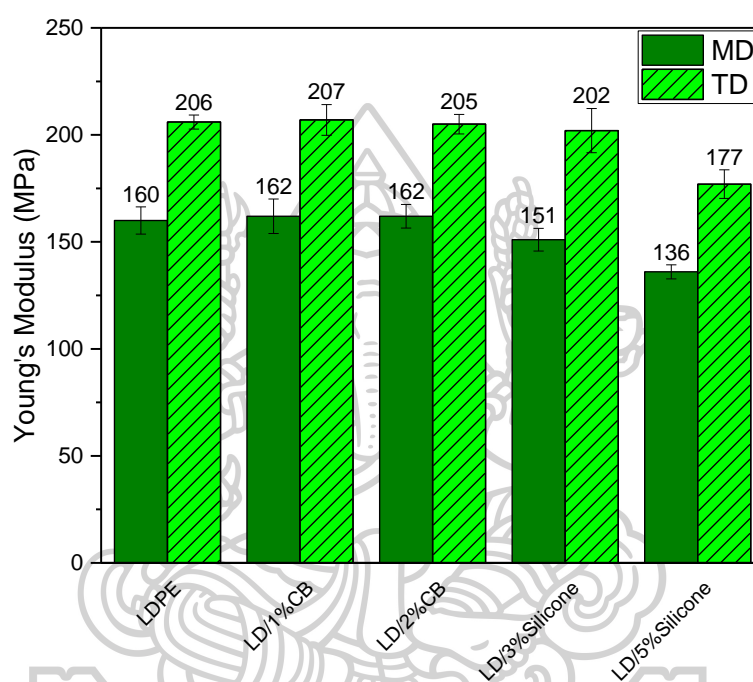


รูปที่ 4.17 แสดงค่า Contact angle ของ LDPE และ LDPE ที่มีการเติมสารเติมแต่ง carnauba wax 1, 2 wt% และ Silicone 3, 5 wt%

จากการทดสอบ water contact angle จะแสดงดังรูปที่ 4.17 ซึ่งพบว่าฟิล์ม LDPE มีค่า contact angle  $91 \pm 2$  องศา แต่เมื่อมีการเติม carnauba wax ปริมาณ 1 และ 2 wt% สามารถเพิ่มค่า contact angle เป็น  $93 \pm 2$  และ  $94 \pm 1$  องศา ตามลำดับ ส่วนการเติม silicone ปริมาณ 3 และ 5 wt% สามารถเพิ่มค่า contact angle เป็น  $98 \pm 1$  และ  $104 \pm 1$  องศา ดังนั้นตัวที่สามารถลดการเปียกผิว และเพิ่มความเป็น hydrophobic ได้มากที่สุดสำหรับ LDPE คือ Silicone เนื่องจาก silicone เกิดการ bloom มาที่ผิวซึ่งยับยันด้วยลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่เห็นเหมือนมีชั้นมาเคลือบบนผิว ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีความขุ่นและมีความเป็น hydrophobic ที่มากขึ้นค่า contact angle จึงเพิ่มสูงขึ้น

#### 4.2.3.3 ทดสอบสมบัติเชิงกล

หลังจากได้ทำการขึ้นรูป LDPE, LDPE ที่เติมสารลดการเกาะผิว, PBAT และ PBAT ที่เติมสารลดการเกาะผิว ด้วยกระบวนการ blown film extrusion แล้วก็ให้นำฟิล์มที่ได้มาเตรียมให้มีขนาด 1 x 4 นิ้วและนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง tensile testing โดยใช้ load cell ขนาด 5 กิโลนิวตัน และอัตราการดึงที่ 500 มิลลิเมตรต่อวินาที

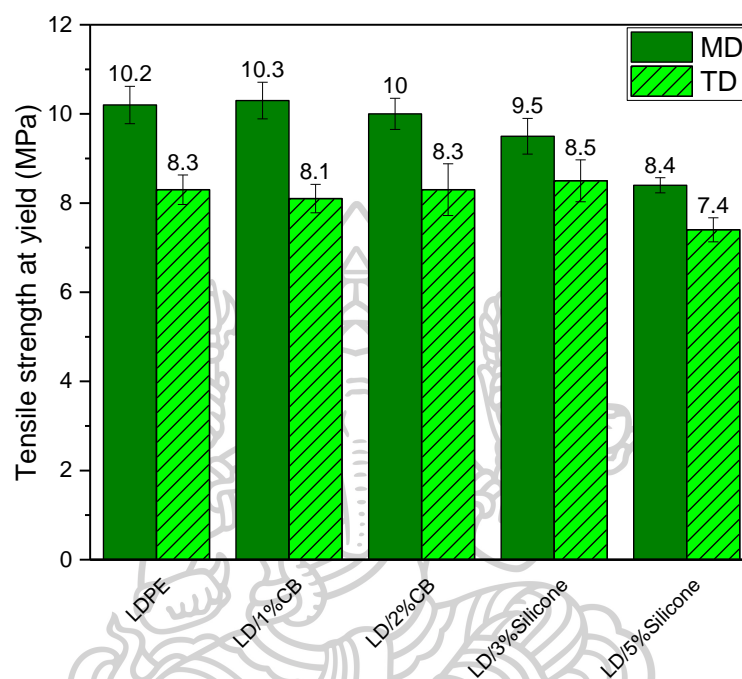


รูปที่ 4.18 แสดงค่า modulus ของ LDPE และ LDPE ที่เติมสารลดการเกาะผิว ทั้งในแนว machine direction (MD) และแนว transverse direction (TD)

จากการทดสอบพบว่าค่า modulus ของ LDPE ในแนว machine direction (MD) ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งมีค่าเท่ากับ  $160 \pm 6$  MPa และค่า modulus ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งเป็น carnauba wax เนื่องจากมีการเติมสารเติมแต่งในปริมาณไม่เกิน 2 wt% เหมือนกับในงานวิจัยของ Hojun Lee และคณะฯ [29] ซึ่งการเติมสารเติมแต่งน้อยกว่า 2 wt% จะไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล แต่เมื่อมีการเติมสารเติมแต่งเป็น silicone จะพบว่ามีค่าลดลงของ modulus เป็น  $151 \pm 5$  และ  $136 \pm 3$  MPa เมื่อมีการเติม silicone ปริมาณ 3 wt% และ 5 wt% ตามลำดับ เนื่องมาจากการที่ silicone มีความนิ่มสามารถกดหรือบีบและเสียรูปได้ง่ายทำให้เมื่อมีการเติม silicone ลงไปใน LDPE แล้ว

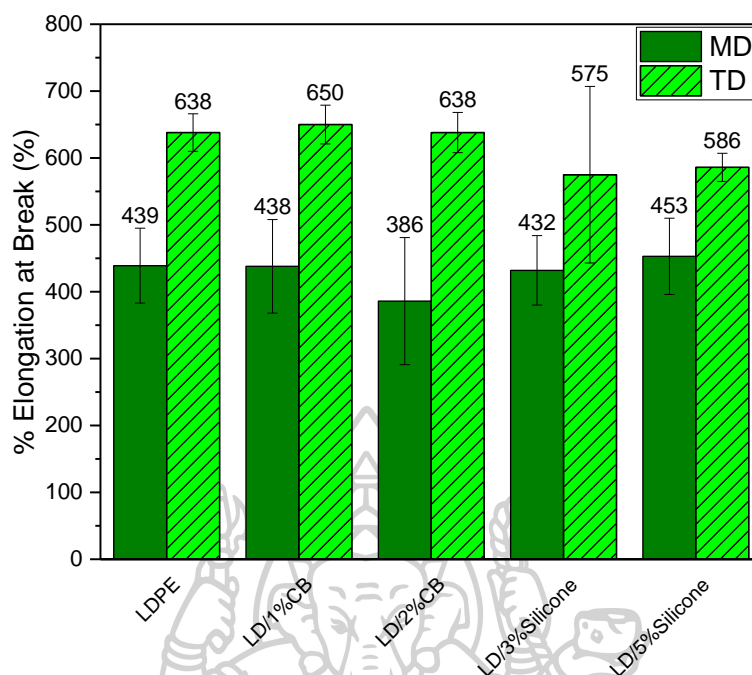


ส่งผลให้ค่า modulus ลดลงเล็กน้อย [30] ซึ่งแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลง modulus เหมือนกันทั้งในแนว machine direction (MD) และแนว transverse direction (TD) ดังแสดงในรูปที่ 4.18



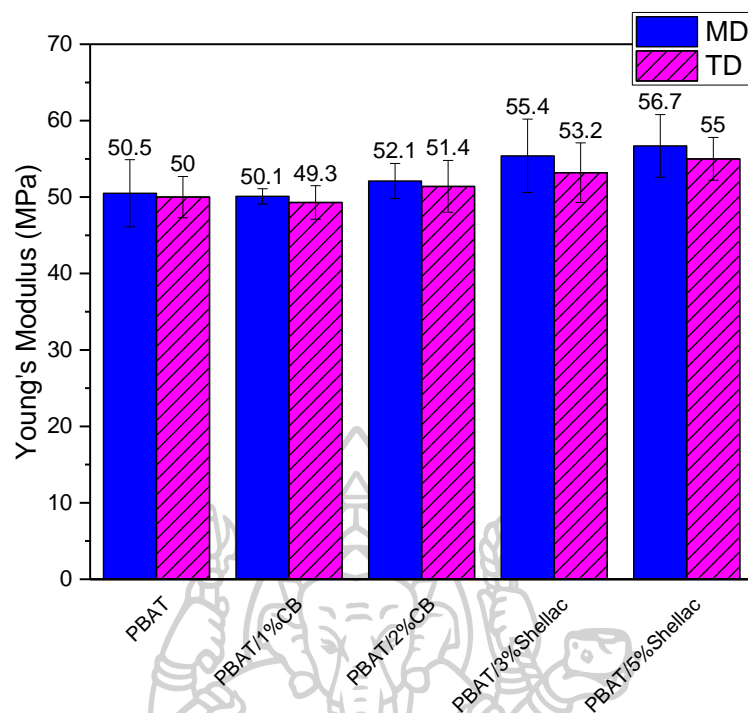
รูปที่ 4.19 แสดงค่า tensile strength ของ LDPE และ LDPE ที่เติมสารลดการเกาะผิว ทั้งในแนว machine direction (MD) และแนว transverse direction (TD)

จากการทดสอบพบว่าค่า tensile strength ของ LDPE ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งในแนว MD มีค่า  $10.2 \pm 0.4$  MPa และค่า tensile strength ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งเป็น carnauba wax เนื่องจากมีการเติมสารเติมแต่งในปริมาณไม่เกิน 2 wt% เหมือนกับในงานวิจัยของ Hojun Lee และคณะฯ [29] ซึ่งการเติมสารเติมแต่งน้อยกว่า 2 wt% จะไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล แต่เมื่อมีการเติมสารเติมแต่งเป็น silicone จะพบว่าการลดลงของ tensile strength เล็กน้อยเมื่อมีการเติม silicone ปริมาณ 5 wt% อาจเกิดจากสารเติมแต่งจะเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่การกระจายแรงจึงเกิดได้ยากมากขึ้นเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งเมื่อได้รับแรงดึงเข้าไปจะทำให้เกิดการขาดได้ง่ายมากขึ้นซึ่งแนวโน้มเหมือนกันทั้งในแนว machine direction (MD) และแนว transverse direction (TD) ดังแสดงในรูปที่ 4.19



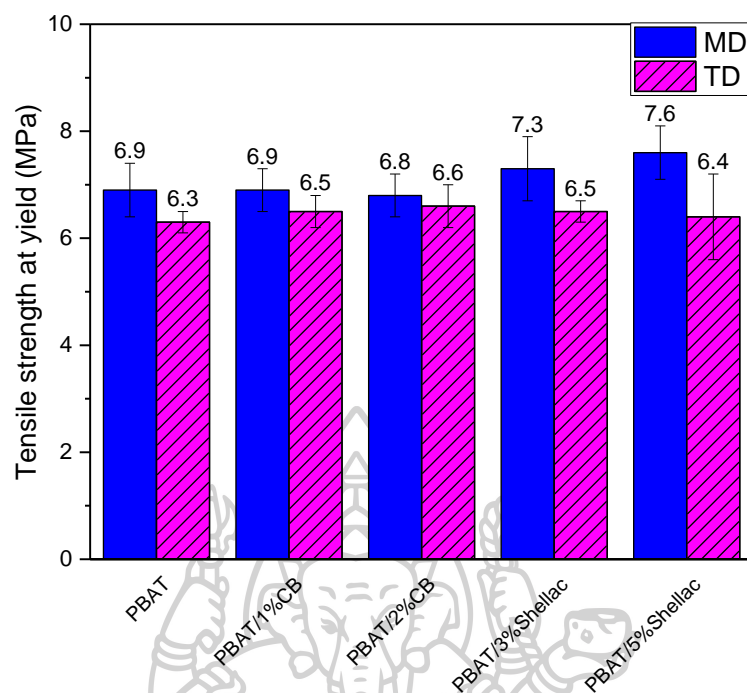
รูปที่ 4.20 แสดงค่า Elongation at break ของ LDPE และ LDPE ที่เติมสารลดการเกาะผิว ทั้งในแนว machine direction (MD) และแนว transverse direction (TD)

จากการทดสอบพบว่าค่า elongation at break ของ LDPE ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งในแนว MD มีค่า  $439 \pm 56$  % และแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งเป็น carnauba wax เนื่องจากมีการเติมสารเติมแต่งในปริมาณไม่เกิน 2 wt% เหมือนกับในงานวิจัยของ Hojun Lee และคณะ [29] ซึ่งการเติมสารเติมแต่งน้อยกว่า 2 wt% จะไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล แต่เมื่อมีการเติมสารเติมแต่งเป็น silicone จะพบว่าการลดลงของ elongation at break เล็กน้อยเมื่อมีการเติม silicone ปริมาณ 5 wt% อาจเกิดจากเนื่องจากโครงสร้างและความเป็นขั้วที่ต่างกันจึงทำให้สารเติมแต่งเข้ากับ LDPE ไม่ดีและไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่เป็นอย่างมากจึงทำให้ค่า elongation at break ลดลงมากซึ่งแนวโน้มเหมือนกันทั้งในแนว machine direction (MD) และแนว transverse direction (TD) ดังแสดงในรูปที่ 4.20



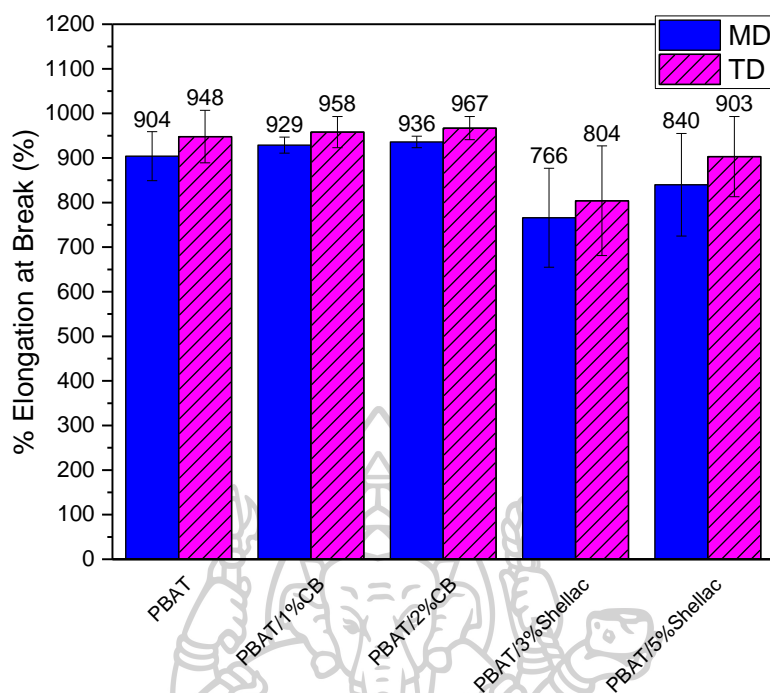
รูปที่ 4.21 แสดงค่า modulus ของ PBAT และ PBAT ที่เติมสารลดการเกาะผิว ทั้งในแนว machine direction (MD) และแนว transverse direction (TD)

จากการทดสอบพบว่าค่า modulus ของ PBAT ในแนว machine direction (MD) ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งมีค่าเท่ากับ  $50.5 \pm 4.4$  MPa และค่า modulus ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งเป็น carnauba wax เนื่องจากมีการเติมสารเติมแต่งในปริมาณไม่เกิน 2 wt% เหมือนกับในงานวิจัยของ Hojun Lee และคณะฯ [29] ซึ่งการเติมสารเติมแต่งน้อยกว่า 2 wt% จะไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ และเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งเป็น Shellac ปริมาณ 3 wt% และ 5 wt% จะพบว่ามีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือแทบจะไม่แตกต่างจากเดิมซึ่งแนวโน้มเหมือนกันทั้งในแนว machine direction (MD) และแนว transverse direction (TD) ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.22 แสดงค่า tensile strength ของ PBAT และ PBAT ที่เติมสารลดการเกาะผิว ทั้งในแนว machine direction (MD) และแนว transverse direction (TD)

จากการทดสอบพบว่าค่า tensile strength ของ PBAT ในแนว machine direction (MD) ที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งมีค่าเท่ากับ  $6.9 \pm 0.5$  MPa และค่า tensile strength ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งเป็น carnauba wax เนื่องจากการเติมสารเติมแต่งในปริมาณไม่เกิน 2 wt% เหมือนกับในงานวิจัยของ Hojun Lee และคณะ [29] ซึ่งการเติมสารเติมแต่งน้อยกว่า 2 wt% จะไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ และเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งเป็น Shellac ปริมาณ 3 wt% และ 5 wt% จะพบว่าการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือแทบจะไม่แตกต่างจากเดิม ซึ่งแนวโน้มคล้ายคลึงกันทั้งในแนว machine direction (MD) และแนว transverse direction (TD) ดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.23 แสดงค่า elongation at break ของ PBAT และ PBAT ที่เติมสารลดการเกาะผิว ทั้งในแนว machine direction (MD) และแนว transverse direction (TD)

จากการทดสอบพบว่าค่า elongation at break ของ PBAT aที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งในแนว MD มีค่า  $439 \pm 56$  % และแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งเป็น carnauba wax เนื่องจากการเติมสารเติมแต่งในปริมาณไม่เกิน 2 wt% เหมือนกับในงานวิจัยของ Hojun Lee และคณะ [29] ซึ่งการเติมสารเติมแต่งน้อยกว่า 2 wt% จะไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล แต่เมื่อมีการเติมสารเติมแต่งเป็น Shellac จะพบว่ามีการลดลงของ elongation at break น้อยเนื่องจากอาจเกิดการตัดสายโซ่ของ PBAT ซึ่งแนวโน้มเหมือนกันทั้งในแนว machine direction (MD) และแนว transverse direction (TD) ดังแสดงในรูปที่ 4.23

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของ LDPE แล PBAT ทั้งหมดพบว่าค่า modulus และ tensile strength มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือแทบไม่เปลี่ยนแปลง แต่ค่า elongation ของ LDPE จะลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการเติม silicone ส่วนใน PBAT ค่า elongation จะลดลงเล็กน้อยเมื่อเติม shellac ส่วนการเติม carnauba wax ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของ LDPE และ PBAT

#### 4.2.3.4 ทดสอบการแพร่ของสารในบรรจุภัณฑ์สู่อาหาร (migration test)

ทำการทดสอบการแพร่กระจายของสารสู่อาหารตาม มอก.1024 หรือ มอก.656 โดยการฟิล์มที่ขึ้นรูปได้จากกระบวนการ blown film extrusion แล้วทำการทดสอบวัดค่า contact angle ได้มากที่สุดมาทดสอบการแพร่ของสารสู่อาหารโดยการนำไปแช่ลงในสารละลาย 4 ชนิดที่เป็นตัวแทนของอาหารแต่ละประเภทคือ น้ำกลั่นเป็นตัวแทนของอาหารที่มีค่า pH เกิน 5, กรดแอสติกความเข้มข้นร้อยละ 4 เป็นตัวแทนของอาหารที่มีค่า pH ไม่เกิน 5, เอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 20 เป็นตัวแทนของอาหารที่มีแอลกอฮอล์ และ นอร์มัลเฮปแทนเป็นตัวแทนของอาหารประเภทไขมันและน้ำมัน จากการทดสอบพบว่าค่าปริมาณสิ่งที่ตกค้างของ LDPE และ LDPE ที่ผสม Silicone จากตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 มีค่าที่ไม่แตกต่างกันและน้อยกว่าปริมาณสารตกค้างที่รับได้ตามมาตรฐานแสดงว่าสามารถนำมาผสมกับ LDPE และสามารถนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่ใช้สำหรับบรรจุอาหารได้

**ตารางที่ 4.5** แสดงค่าปริมาณสารที่ตกค้างของ LDPE หลังจากสกัดด้วยสารละลายเทียบกับเกณฑ์สารตกค้างที่รับได้ตามมาตรฐาน

สารละลายที่ใช้สกัด (LDPE)	ปริมาณสิ่งตกค้าง (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)	เกณฑ์ที่กำหนดสารตกค้างสูงสุด (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)
น้ำกลั่น	ไม่พบ	30
สารละลายกรดอะซิติก ร้อยละ 4	ไม่พบ	30
สารละลายเอทานอล ร้อยละ 20	ไม่พบ	30
นอร์มอลเฮปแทน	10.4	150

**ตารางที่ 4.6** แสดงค่าปริมาณสารที่ตกค้างของ LDPE ที่ผสมกับ Silicone หลังจากสกัดด้วยสารละลายเทียบกับเกณฑ์สารตกค้างที่รับได้ตามมาตรฐาน

สารละลายที่ใช้สกัด (LDPE/Silicone)	ปริมาณสิ่งตกค้าง (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)	เกณฑ์ที่กำหนดสารตกค้างสูงสุด (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)
น้ำกลั่น	ไม่พบ	30
สารละลายกรดอะซิติก ร้อยละ 4	ไม่พบ	30
สารละลายเอทานอล ร้อยละ 20	ไม่พบ	30
นอร์มอลเฮปแทน	10.4	150



**ตารางที่ 4.7** แสดงค่าปริมาณสารที่ตกค้างของ PBAT หลังจากสกัดด้วยสารละลายเทียบกับเกณฑ์สารตกค้างที่รับได้ตามมาตรฐาน

สารละลายที่ใช้สกัด (PBAT)	ปริมาณสิ่งตกค้าง (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)	เกณฑ์ที่กำหนดสารตกค้างสูงสุด (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)
น้ำกลั่น	น้อยกว่า 5	30
สารละลายกรดอะซิติก ร้อยละ 4	5.7	30
สารละลายเอทานอล ร้อยละ 20	8.2	30
นอร์มอลเฮปเทน	7.4	150

**ตารางที่ 4.8** แสดงค่าปริมาณสารที่ตกค้างของ PBAT ที่ผสมกับ Carnuba wax หลังจากสกัดด้วยสารละลายเทียบกับเกณฑ์สารตกค้างที่รับได้ตามมาตรฐาน

สารละลายที่ใช้สกัด (PBAT/CB)	ปริมาณสิ่งตกค้าง (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)	เกณฑ์ที่กำหนดสารตกค้างสูงสุด (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร)
น้ำกลั่น	ไม่พบ	30
สารละลายกรดอะซิติก ร้อยละ 4	ไม่พบ	30
สารละลายเอทานอล ร้อยละ 20	น้อยกว่า 5	30
นอร์มอลเฮปเทน	8.4	150

จากการทดสอบพบว่าค่าปริมาณสิ่งตกค้างของ PBAT และ PBAT ที่ผสม carnuba wax จากตารางที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.8 พบว่าปริมาณสารที่ตกค้างมีค่าที่ไม่แตกต่างกันและน้อยกว่าปริมาณสารตกค้างที่รับได้ตามมาตรฐานแสดงว่าสามารถนำมาผสมกับ PBAT และสามารถนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่ใช้สำหรับบรรจุอาหารได้

## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงสมบัติการเปียกผิวของฟิล์มพอลิเอทิลีน (LDPE) และพอลิ บิวทิลีนอะดิเพทโคทาเรพทาเลท (PBAT) โดยการนำพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดมาเติมสารเติมแต่งลดการ เกาะผิว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากระบวนการผสม และศึกษาชนิดและปริมาณการเติมสารเติม แต่งต่างๆที่จะส่งผลต่อสมบัติการเปียกผิวของฟิล์มที่ได้ นอกจากนี้ยังได้มีการติดตามการเปลี่ยนแปลง สมบัติเชิงกลของ LDPE และ PBAT เมื่อมีการเติมสารเติมแต่ง รวมไปถึงได้มีการศึกษาการ migrate ของสารที่ออกมาตามมาตรฐานของบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหาร โดยในการศึกษาสามารถแบ่งการ ทดลองออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ดังนี้

งานวิจัยส่วนที่ 1 ศึกษาผลของสารเติมแต่ง 7 ชนิด ได้แก่ Carnuba wax, Shellac, PE wax, OPE, Silane1, Silane2, Silicone ที่มีผลต่อการเปียกผิวเบื้องต้นโดยการผสมในเครื่องผสม แบบปิด จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งลดการเกาะผิวเข้าไปจะทำให้ค่าแรงบิดมีการ ลดลงเล็กน้อยแต่ไม่มีปัญหาในการผสมใดเกิดขึ้นทั้งใน LDPE และ PBAT มีแนวโน้มของค่าแรงบิดที่ คล้ายคลึงกัน

ศึกษาสมบัติเชิงกล และการยึดเกาะผิวของพลาสติกที่ผ่านกระบวนการผสม จากการทดลอง พบว่าสำหรับ LDPE เมื่อมีการเติมสารเติมแต่ง silicone ปริมาณ 5 wt% จะทำให้มีค่า contact angle เท่ากับ  $105 \pm 1$  องศา จาก  $92 \pm 1$  องศา ซึ่งเพิ่มขึ้นมากที่สุด และสำหรับ PBAT พบว่า สารเติมแต่งที่สามารถเพิ่มค่า contact angle ได้มากที่สุดคือการเติม carnuba wax ปริมาณ 5 wt% สามารถเพิ่ม contact angle จาก  $75 \pm 4$  องศา เป็น  $124 \pm 4$  องศา และแนวโน้มเมื่อเติม สารเติมแต่งมากขึ้นจะทำให้ค่า contact angle มากขึ้น จากการทดลองสมบัติเชิงกลของ LDPE พบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งแล้วค่า modulus ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเว้นแต่เติม PE wax, silicone, silane1 และ silane2 ที่จะทำให้ค่า modulus ลดลง ค่า tensile strength ไม่เปลี่ยนแปลง ค่า elongation at break เมื่อมีการเติมสารเติมแต่งจะทำให้ค่า elongation at break ลดลง สำหรับ PBAT พบว่าค่า modulus มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเติมสารเติมแต่ง ค่า tensile strength ลดลงเล็กน้อยเมื่อเติม silicone ค่า elongation at break เมื่อมีการเติมสารเติมแต่งจะทำให้ค่า elongation at break มีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ยังได้มีการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาเพื่อ

เป็นการยืนยันเรื่องการ bloom ของสารเติมแต่งออกมาที่ผิวของฟิล์ม LDPE และ PBAT พบว่าเกิดการ bloom ของสารเติมแต่งที่ผิวของฟิล์ม

งานวิจัยส่วนที่ 2 ศึกษาผลของสารเติมแต่งที่มีผลต่อการเปียกผิวในกระบวนการเป่าถุงโดยผสมใน twin screw extrusion และขึ้นรูปด้วยกระบวนการ blown film extrusion จากการทดลองพบว่าการใช้สารเติมแต่ง CB ในปริมาณที่มากเกินไป 3 wt% จะทำให้มีปัญหาในกระบวนการผสมด้วยเครื่อง extruder ทำให้ต้องลดปริมาณการเติม CB ลงเหลือไม่เกิน 2 wt% และได้มีการทดสอบสมบัติการไหลพบว่า LDPE เมื่อเติมสารเติมแต่ง CB แล้วจะทำให้มีค่าดัชนีการไหลที่เพิ่มมากขึ้นส่วนการเติม silicone ไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีการไหล สำหรับ PBAT พบว่าเมื่อมีการเติมสารเติมแต่ง จะทำให้ค่าดัชนีการไหลเพิ่มขึ้น และนอกจากนี้ยังได้มีการทดสอบ GPC เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของ PBAT ที่เติม shellac พบว่าน้ำหนักโมเลกุลมีการลดลง

ทดสอบสมบัติต่างๆ ของฟิล์มพลาสติก จากการทดลองพบว่าสำหรับ LDPE สารเติมแต่ง silicone ปริมาณ 5 wt% จะทำให้มีค่า contact angle เท่ากับ  $104 \pm 1$  องศา จาก  $91 \pm 2$  องศา ซึ่งเพิ่มขึ้นมากที่สุด และสำหรับ PBAT พบว่าสารเติมแต่งทั้ง CB ปริมาณ 2 wt% และ Shellac 5 wt% ที่สามารถเพิ่มค่า contact angle จาก  $73 \pm 1$  องศา เป็น  $105 \pm 1$  องศา และ  $105 \pm 1$  องศา ตามลำดับ และแนวโน้มเมื่อเติมสารเติมแต่งมากขึ้นจะทำให้ค่า contact angle มากขึ้น จากการทดลองสมบัติเชิงกลของ LDPE พบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่งแล้วค่า modulus ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเว้นแต่เติม silicone ที่จะทำให้ค่า modulus ลดลง ค่า tensile strength มีการลดลงเล็กน้อยเมื่อเติม silicone ค่า elongation ไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับ PBAT พบว่าค่า modulus และค่า tensile strength ไม่เปลี่ยนแปลง ค่า elongation at break เมื่อมีการเติม Shellac จะทำให้ค่า elongation at break ลดลงเล็กน้อย และจากการทดลองการแพร่ของสารเติมแต่งในบรรจุภัณฑ์สุญญากาศพบว่าสารที่ตกค้างไม่เกินที่ มอก.1024 และ มอก.656 กำหนดสามารถใช้เป็นบรรจุภัณฑ์บรรจุอาหารได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

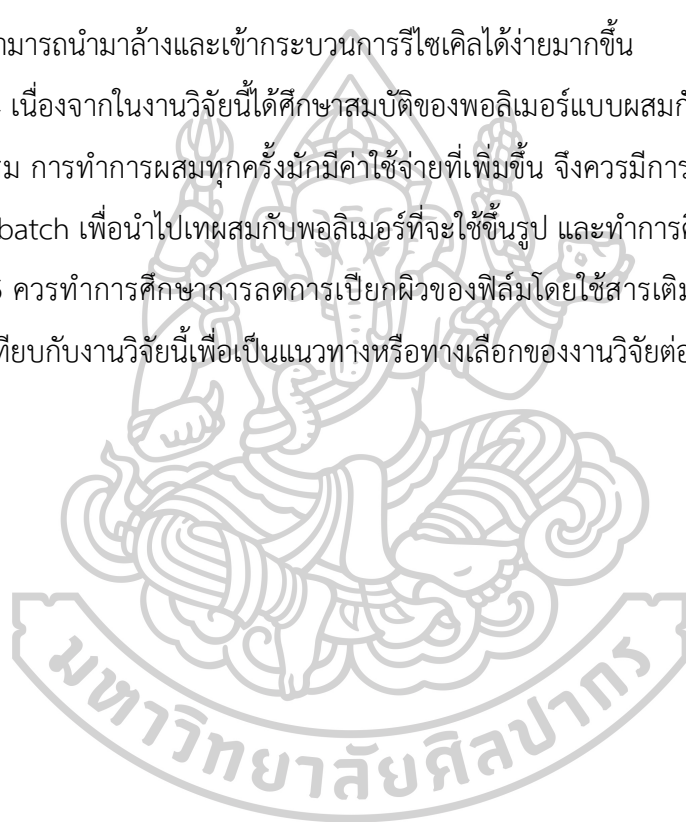
5.2.1 เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีการนำ carnauba wax มาเป็นสารเติมแต่งและทำการผสมกับพอลิเมอร์ ดังนั้นควรเติมในปริมาณไม่เกิน 2 wt% เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาในการผสมพอลิเมอร์กับ carnauba wax ด้วยเครื่อง extruder

5.2.2 ถ้าต้องการลดการเกาะเปียกผิวมากขึ้น อาจจะทำด้วยวิธีอื่นๆเพิ่มเติมเช่น การทำ ลวดลายขนาดไมโครเมตรบนพื้นผิวของฟิล์มให้มีลักษณะต่างๆ ซึ่งอาจจะทำด้วยวิธีการทำลวดลายบน ลูกกลิ้งของเครื่องขึ้นรูปเมื่อฟิล์มออกมาผ่านลูกกลิ้งจะเกิดเป็นลายบนผิวฟิล์มแล้วนำไปศึกษาสมบัติ การยึดเกาะผิวต่อไป

5.2.3 จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตเป็นถุงพลาสติกสำหรับบรรจุอาหาร หรือของเหลวที่มีขี้ว แทนการใช้ LDPE แบบเดิมเนื่องจากพอลิเมอร์ที่เติมสารเติมแต่งแล้วขึ้นรูปเป็น ถุงพลาสติกมีสมบัติเชิงกลไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงจึงสามารถใช้แทนได้และยังลดการยึดติดของเศษอาหาร ที่ฟิล์มทำให้สามารถนำมาล้างและเข้ากระบวนการรีไซเคิลได้ง่ายมากขึ้น

5.2.4 เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์แบบผสมกับสารลดการเกาะผิวแต่ ในอุตสาหกรรม การทำการผสมทุกครั้งมักมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น จึงควรมีการศึกษาการทำการผสมนี้ เป็น master batch เพื่อนำไปผสมกับพอลิเมอร์ที่จะใช้ขึ้นรูป และทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ต่อไป

5.2.5 ควรทำการศึกษารลดการเกาะเปียกผิวของฟิล์มโดยใช้สารเติมแต่งอื่นๆ เพิ่มเติมและ นำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้เพื่อเป็นแนวทางหรือทางเลือกของงานวิจัยต่อไป





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติต่างๆ



ก-1 ผลการทดสอบการเปียกผิวด้วยเทคนิค contact angle

ตารางภาคผนวก ก.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ contact angle ของ PBAT ที่ขึ้นรูปจากกระบวนการ compression molding

sample	Contact angle					
	1	2	3	4	Ave	SD
PBAT	70.00	77.40	78.30	76.10	75.45	3.74
PBAT/1%CB wax	112.95	110.81	112.07	112.20	112.01	0.89
PBAT/2%CB wax	110.32	113.50	112.70	112.50	112.26	1.36
PBAT/3%CB wax	108.72	115.87	111.08	117.25	113.23	4.00
PBAT/5%CB wax	118.76	124.72	123.54	127.32	123.59	3.58
PBAT/3%PE wax	74.80	75.53	78.30	80.10	77.18	2.46
PBAT/5%PE wax	82.90	82.10	82.40	83.00	82.60	0.42
PBAT/3%silane1	94.72	96.70	98.40	100.50	97.58	2.46
PBAT/5%silane1	106.70	99.20	104.05	107.92	104.47	3.87
PBAT/3%silane2	93.00	91.60	92.50	92.70	92.45	0.60
PBAT/5%silane2	92.10	92.70	93.25	92.31	92.59	0.51
PBAT/3%shellac	89.40	89.50	90.90	90.70	90.13	0.78
PBAT/5%shellac	108.10	114.30	113.70	108.90	111.25	3.20
PBAT/3%OPE	83.64	86.55	85.14	88.38	85.93	2.02
PBAT/5%OPE	96.24	97.55	96.19	99.43	97.35	1.52
PBAT/3%silicone	85.57	90.17	90.66	92.18	89.65	2.85
PBAT/5%silicone	93.31	92.98	90.47	92.67	92.36	1.29

ตารางภาคผนวก ก.2 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ contact angle ของ LDPE ที่ขึ้นรูปจากกระบวนการ compression molding

sample	Contact angle					
	1	2	3	4	Ave	SD
LDPE	92.83	91.58	92.50	93.03	92.49	0.64
LDPE/1%CB wax	92.37	93.78	94.74	94.59	93.87	1.09
LDPE/2%CB wax	93.80	93.47	95.25	94.85	94.34	0.84
LDPE/3%CB wax	97.84	95.32	95.27	96.69	96.28	1.23
LDPE/5%CB wax	102.69	99.30	104.20	99.50	101.42	2.42
LDPE/3%PE wax	92.28	92.33	90.10	93.20	91.98	1.32
LDPE/5%PE wax	97.53	93.24	92.48	94.40	94.41	2.22
LDPE/3%silane1	95.58	94.60	96.20	94.04	95.11	0.97
LDPE/5%silane1	96.03	96.90	95.90	96.60	96.36	0.47
LDPE/3%silane2	91.54	92.40	93.50	92.40	92.46	0.80
LDPE/5%silane2	94.10	93.59	96.97	93.28	94.49	1.69
LDPE/3%shellac	98.59	96.82	97.77	92.47	96.41	2.73
LDPE/5%shellac	97.80	94.52	99.08	98.13	97.38	1.98
LDPE/3%OPE	92.21	96.85	92.90	92.79	93.69	2.13
LDPE/5%OPE	94.30	93.48	95.08	91.22	93.52	1.67
LDPE/3%Silicone	100.50	101.20	101.29	101.15	101.04	0.36
LDPE/5%Silicone	105.02	105.20	105.41	102.77	104.60	1.23

ตารางภาคผนวก ก.3 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ contact angle ของ PBAT และ LDPE ที่ขึ้นรูปจากกระบวนการ blown film extrusion

sample	Contact angle					
	1	2	3	4	Ave	SD
PBAT	75.37	72.84	72.10	73.02	73.33	1.42
PBAT/1%CB wax	103.88	105.20	101.50	102.07	103.16	1.70
PBAT/2%CB wax	105.27	103.88	106.84	104.82	105.20	1.24
PBAT/3%Shellac	99.43	97.51	99.90	97.99	98.71	1.14
PBAT/5%Shellac	104.35	104.96	103.75	105.27	104.58	0.67
LDPE2026	91.17	92.63	88.84	91.38	91.01	1.58
LDPE/1%CB wax	91.74	96.43	92.32	93.31	93.45	2.09
LDPE/2%CB wax	94.89	94.45	94.51	93.38	94.31	0.65
LDPE/3%Silicone	99.18	98.72	96.90	97.84	98.16	1.01
LDPE/5%Silicone	104.20	105.60	104.16	103.25	104.30	0.97

ก-2 ผลการทดสอบ melt viscosity ด้วยการวัดค่า melt flow

ตารางภาคผนวก ก.4 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ Melt flow index ของ PBAT ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ใช้น้ำหนักกด 2.16 kg

Sample	น้ำหนัก (กรัม)	เวลา (วินาที)	MFI (g/10 min)	AVMFI (g/10 min)	SD
PBAT	0.38	30.56	7.46	7.33	0.43
	0.39	30.48	7.68		
	0.35	30.65	6.85		

ตารางภาคผนวก ก.4 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ Melt flow index ของ PBAT ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ใช้น้ำหนักกด 2.16 kg (ต่อ)

Sample	น้ำหนัก (กรัม)	เวลา (วินาที)	MFI (g/10 min)	AVMFI (g/10 min)	SD
PBAT/1%CB	0.53	30.43	10.45	10.76	0.74
	0.59	30.51	11.60		
	0.52	30.49	10.23		
PBAT/2%CB	0.81	45.47	10.69	10.83	0.14
	0.82	45.41	10.83		
	0.83	45.42	10.96		
PBAT/3%Shellac	1.44	30.47	28.36	30.32	1.88
	1.55	30.5	30.49		
	1.63	30.46	32.11		
PBAT/5%Shellac	1.44	20.48	42.19	42.58	0.69
	1.44	20.48	42.19		
	2.2	30.43	43.38		

ตารางภาคผนวก ก.5 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ Melt flow index ของ LDPE ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ใช้น้ำหนักกด 2.16 kg

Sample	น้ำหนัก	เวลา	MFI	AVMFI	SD
LDPE	0.42	45.5	5.54	5.74	0.15
	0.44	45.63	5.79		
	0.43	45.26	5.70		
	0.43	45.33	5.69		
	0.45	45.29	5.96		

ตารางภาคผนวก ก.5 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ Melt flow index ของ LDPE ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ใช้น้ำหนักกด 2.16 kg (ต่อ)

Sample	น้ำหนัก	เวลา	MFI	AVMFI	SD
LDPE/1%CB	0.39	45.42	5.15	5.99	0.61
	0.43	45.51	5.67		
	0.46	45.45	6.07		
	0.48	45.32	6.35		
	0.51	45.5	6.73		
LDPE/2%CB	0.5	45.39	6.61	7.22	0.43
	0.53	45.43	7.00		
	0.55	45.38	7.27		
	0.57	45.35	7.54		
	0.58	45.38	7.67		
LDPE/3%Silicone	0.44	45.44	5.81	5.88	0.18
	0.46	45.65	6.05		
	0.46	45.38	6.08		
	0.43	45.5	5.67		
	0.44	45.53	5.80		
LDPE/5%Silicone	0.43	45.57	5.66	5.90	0.20
	0.44	45.5	5.80		
	0.45	45.54	5.93		
	0.45	45.59	5.92		
	0.47	45.54	6.19		

ก-3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการทดสอบการดึงยึด (tensile testing)

ตารางภาคผนวก ก.6 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ tensile testing ของ PBAT ที่ขึ้นรูปด้วย  
กระบวนการ compression molding

Sample	Young's Modulus (MPa)	%Elongation	Tensile stress at Yield (MPa)
PBAT	67.0 ± 3.2	1191 ± 65	7.5 ± 0.5
PBAT/5CB	71.7 ± 4.7	818 ± 47	7.3 ± 0.3
PBAT/5Shellac	70.94 ± 1.4	1086 ± 54	7.7 ± 0.3
PBAT/5PE wax	74.7 ± 2.0	880 ± 95	7.7 ± 0.3
PBAT/5OPE	79.5 ± 2.8	21 ± 3	7.9 ± 0.5
PBAT/5Silicone	72.8 ± 2.5	19 ± 2	6.6 ± 0.2
PBAT/5Silane1	68.6 ± 1.1	1102 ± 42	7.5 ± 0.2
PBAT/5Silane2	68.2 ± 2.9	1251 ± 128	7.2 ± 0.3

ตารางภาคผนวก ก.7 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ tensile testing ของ LDPE ที่ขึ้นรูปด้วย  
กระบวนการ compression molding

Sample	Young's Modulus (MPa)	%Elongation	Tensile stress at Yield (MPa)
LDPE	185 ± 18	907 ± 84	9.0 ± 0.4
LDPE/5CB	185 ± 2	401 ± 63	9.1 ± 0.4
LDPE/5Shellac	184 ± 3	32 ± 4	8.7 ± 0.2
LDPE/5PE wax	160 ± 7	433 ± 84	8.9 ± 0.5
LDPE/5OPE	185 ± 3	252 ± 88	9.0 ± 0.5
LDPE/5Silicone	138 ± 6	50 ± 17	8.0 ± 0.1
LDPE/5Silane1	148 ± 4	856 ± 80	8.7 ± 0.2
LDPE/5Silane2	146 ± 4	839 ± 86	8.6 ± 0.2



**ตารางภาคผนวก ก.8** ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ tensile testing ของ PBAT ที่ขึ้นรูปด้วย  
กระบวนการ blown film extrusion

sample	Direction	Young's Modulus (MPa)	%Elongation	Tensile stress at Yield (MPa)
PBAT	MD	50.5 ± 4.4	904 ± 55	6.9 ± 0.5
	TD	50.0 ± 2.7	948 ± 59	6.3 ± 0.2
PBAT/1%CB wax	MD	50.1 ± 1.0	929 ± 18	6.9 ± 0.4
	TD	49.3 ± 2.2	958 ± 35	6.5 ± 0.3
PBAT/2%CB wax	MD	52.1 ± 2.3	936 ± 13	6.8 ± 0.4
	TD	51.4 ± 3.4	967 ± 26	6.6 ± 0.4
PBAT/3%Shellac	MD	55.4 ± 4.8	766 ± 111	7.3 ± 0.6
	TD	53.2 ± 3.9	804 ± 123	6.5 ± 0.2
PBAT/5%Shellac	MD	56.7 ± 4.1	840 ± 115	7.6 ± 0.5
	TD	55.0 ± 2.8	903 ± 90	6.4 ± 0.8

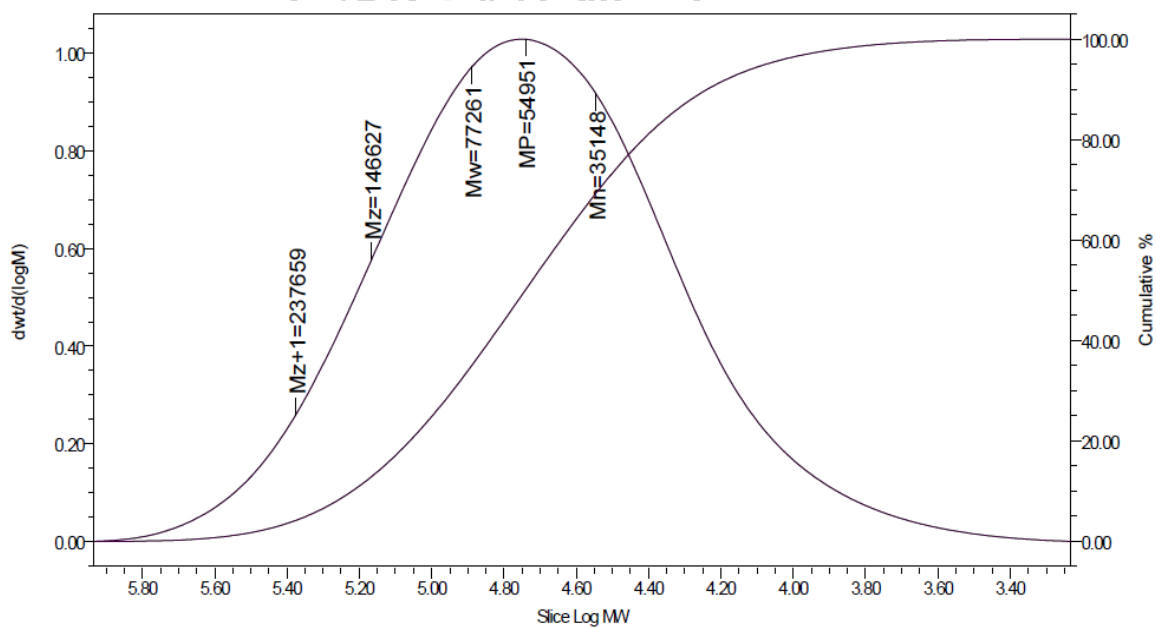
**ตารางภาคผนวก ก.9** ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ tensile testing ของ LDPE ที่ขึ้นรูปด้วย  
กระบวนการ blown film extrusion

sample	Direction	Young's Modulus (MPa)	%Elongation	Tensile stress at Yield (MPa)
LDPE2026	MD	160 ± 6	439 ± 56	10.2 ± 0.4
	TD	206 ± 3	638 ± 28	8.3 ± 0.3
LDPE/1%CB wax	MD	162 ± 8	438 ± 70	10.3 ± 0.4
	TD	207 ± 7	650 ± 29	8.1 ± 0.3
LDPE/2%CB wax	MD	162 ± 6	386 ± 95	10.0 ± 0.4
	TD	205 ± 5	638 ± 30	8.3 ± 0.6

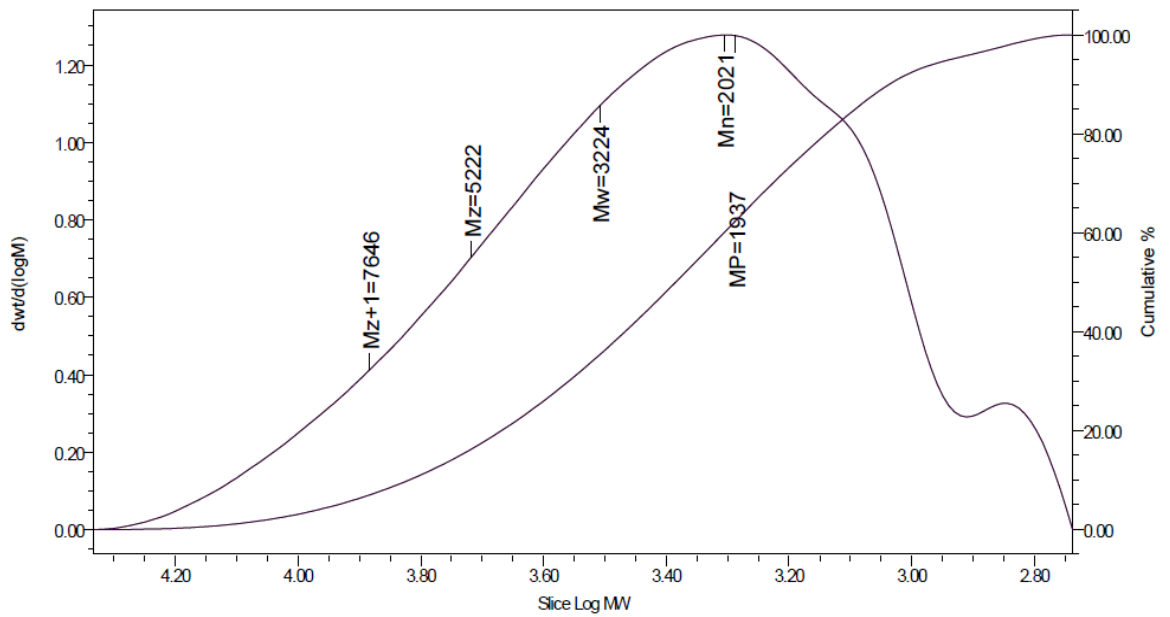
ตารางภาคผนวก ก.9 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ tensile testing ของ LDPE ที่ขึ้นรูปด้วย  
กระบวนการ blown film extrusion (ต่อ)

sample	Direction	Young's Modulus (MPa)	%Elongation	Tensile stress at Yield (MPa)
LDPE/3%Silicone	MD	151 ± 5	432 ± 52	9.5 ± 0.4
	TD	202 ± 10	575 ± 132	8.5 ± 0.5
LDPE/5%Silicone	MD	136 ± 3	453 ± 57	8.4 ± 0.2
	TD	177 ± 7	586 ± 21	7.4 ± 0.3

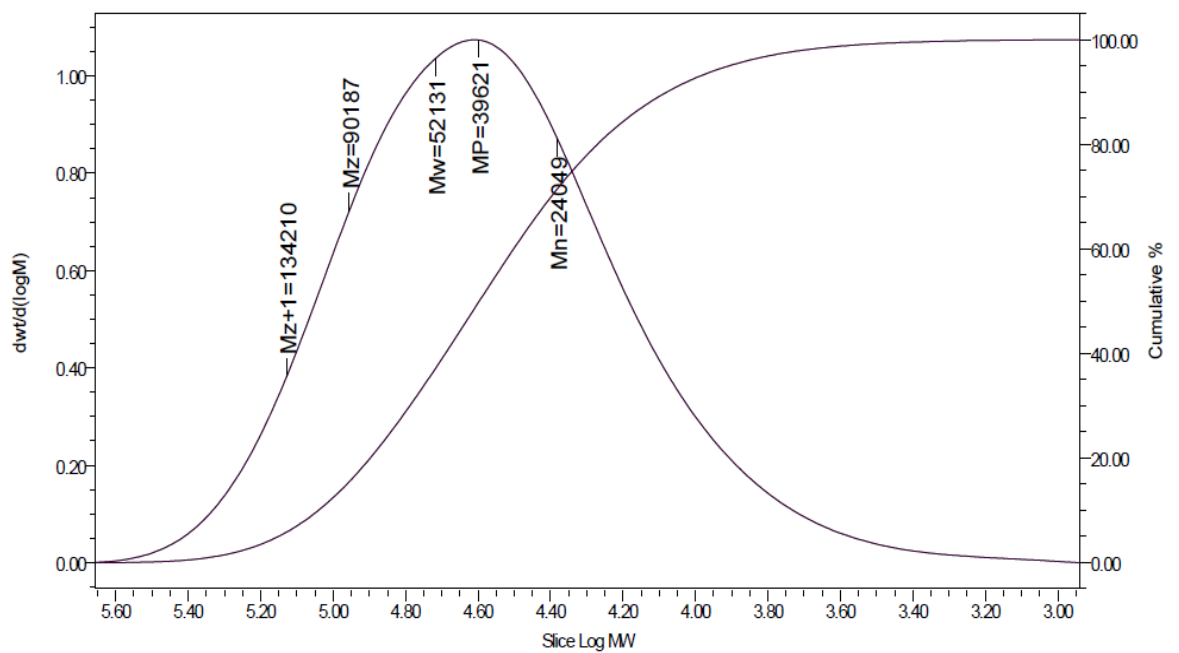
ก-4 ผลการทดสอบน้ำหนักโมเลกุลด้วยการทดสอบ Gel permeation chromatography



รูปภาคผนวก ก.1 กราฟแสดงน้ำหนักโมเลกุลของ PBAT

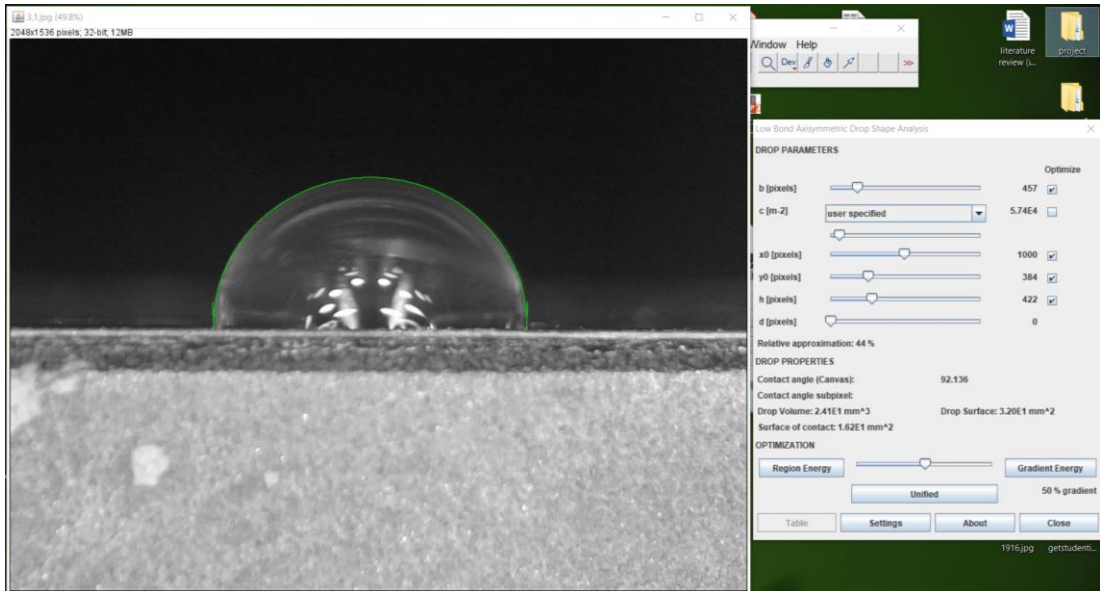


รูปภาคผนวก ก.2 กราฟแสดงน้ำหนักโมเลกุลของ shellac

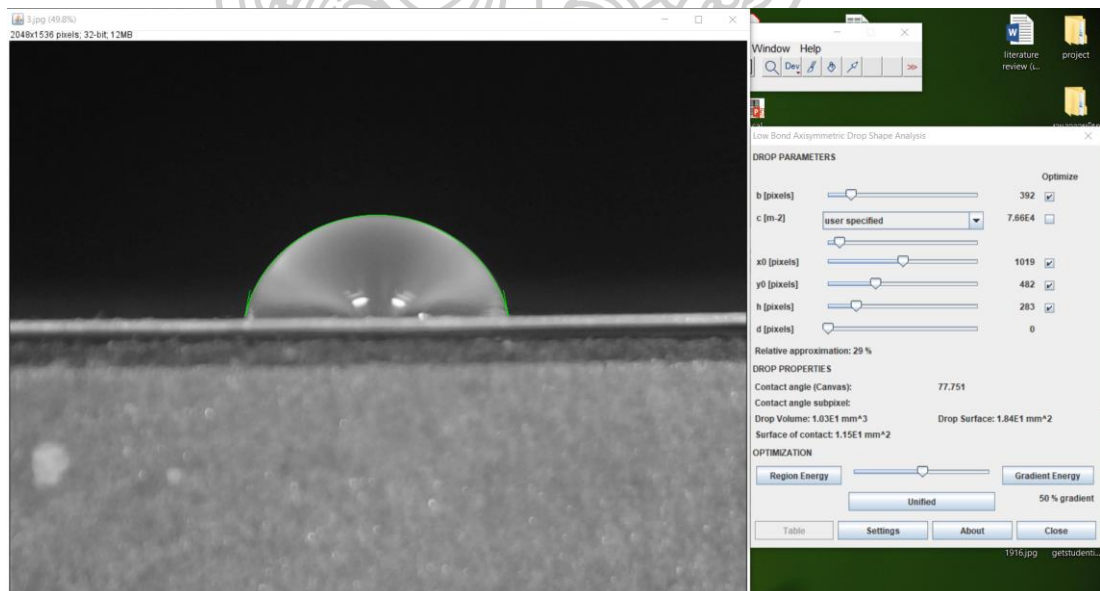


รูปภาคผนวก ก.3 กราฟแสดงน้ำหนักโมเลกุลของ PBAT ที่เติม shellac

ก-5 การวัดมุม contact angle ด้วยโปรแกรม Image J



รูปภาพผนวก ก.4 แสดงตัวอย่างการวัดมุม contact angle ของ LDPE ด้วยโปรแกรม Image J



รูปภาพผนวก ก.5 แสดงตัวอย่างการวัดมุม contact angle ของ PBAT ด้วยโปรแกรม Image J



ภาคผนวก ข  
การคำนวณ

### ข-1 การคำนวณหาค่า blow up ratio (BUR)

จาก 
$$\text{Blow up ratio (BUR)} = \frac{\text{Bubble diameter}}{\text{Die diameter}}$$

เมื่อ Bubble diameter (เส้นผ่านศูนย์กลางของ bubble ที่เป่าได้จากเครื่อง blown film) (mm)

Die diameter (เส้นผ่านศูนย์กลางของ die) = 42 mm

ตัวอย่าง การคำนวณหาค่า BUR ของ LDPE

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ bubble diameter = 14.5 cm

แทนค่า

$$\text{blow up ratio (BUR)} = \frac{145}{42}$$

$$\text{blow up ratio (BUR)} = 3.45$$

### ข-2 การคำนวณหาค่า draw down ratio (DDR)

จาก 
$$\text{Draw down ratio (DDR)} = \frac{\text{Width of die gap}}{\text{film thickness} \times \text{BUR}}$$

เมื่อ Width of die gap (ช่องว่างระหว่างขอบของ die ด้านในและด้านนอก) = 1000  $\mu\text{m}$

Film thickness (ความหนาของฟิล์มที่ได้) ( $\mu\text{m}$ )

BUR (blow up ratio)



**ตัวอย่าง** การคำนวณหาค่า DDR ของ LDPE

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ ได้แก่ Width of die gap = 1000  $\mu\text{m}$ , Film thickness = 100  $\mu\text{m}$ , BUR = 3.45

จาก 
$$\text{Draw down ratio (DDR)} = \frac{1000}{100 \times 3.45}$$

$$\text{Draw down ratio (DDR)} = 2.89$$





ภาคผนวก ค  
การนำเสนอผลงานวิจัย

Organized by



The 21<sup>st</sup> International Union of Materials Research Societies-  
International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2020)

## E-PROCEEDING BOOK

 23-26 February 2021

 Faculty of Science, Chiang Mai University,  
Chiang Mai, Thailand



ISBN (E-BOOK): 978-616-588-010-7



The 21<sup>st</sup> International Union of Materials Research  
Societies-International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2020)  
23-26 February 2021 The Empress Convention Centre, Chiang Mai, Thailand



## Modification of Water Repellent Property of Poly(butylene adipate-co-terephthalate)(PBAT)

Attapon Meejamrus<sup>1</sup>, Manus Seadan<sup>2</sup> and Supakij Suttiruengwong<sup>1,\*</sup>

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

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

\*Corresponding Author's E-mail: suttiruengwong\_s@su.ac.th

### Abstract

Food contact plastics packaging is normally contaminated with the food or organic residues. The contamination leaves the plastics waste management with a few choices such as landfill or incineration. In this respect, biodegradable plastics can be a good candidate for organic recycling of the end-of-life option. On the other hand, such materials can be recyclable if needed. This requires the segregation and cleaning prior to recycling. Therefore, in this work, we aimed to investigate the effect of various additives on the water repellent property of polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT). Four types of additives were used in this work, including polyethylene additives (PE wax, oxidized PE homopolymer), natural wax additives (Shellac, carnauba wax), silane additives (triethoxy(propyl)silane and decyltriethoxysilane) and silicone. The melt blending was performed in a single screw extrusion at 30 rpm and 130 to 170 °C, depending on additives. The water contact angle(CA) is measured and analyzed. The results declared that the hydrophobicity of PBAT increased when adding the additives. Natural additives provided larger CA compared to PE wax. The efficiency of all additives will be presented and compared in terms of the contact angles before and after immersing the films in different polar solutions. The recycling possibility was conducted after the solution tests to ensure the existence of additives and hydrophobicity and will be discussed.

**Keywords:** : food packaging; wax additive; silane additive; hydrophobic film; polybutylene adipate-co-terephthalate

### Introduction

The demand for packagings has increased dramatically due to the increased consumption. Most of the packaging industries have attempted to shift towards more sustainability and circularity concept. However, due to the coronavirus pandemic, any attempts will likely to be delayed. The hygiene and safety concerning of reusable packaging is one of the major issue. In terms of the food packaging, there have been the increase in single-used plastics waste [1,2]. With the conventional plastics, the end-of-life option for the organic or food-contaminated packagings is very challenging. Options such as landfill, incineration and recycle are often chosen in many countries. When the biodegradable/compostable plastics are used for the packaging, the composting or organic recycling can be considered. In fact, two types of the end-of-life option for biodegradable/compostable plastics namely mechanical and organic recycling are possibly applied. Mechanical recycling refers to operations that aim to recover plastics via mechanical processes (grinding, washing, separating, drying, re-granulating and compounding), thus generating the recycle that can be converted into plastics products. Organic recycling on the other hand refers to the closed-loop of activities involved in the collection and processing of organic materials as well as the recovery of a recycled product as composted for the planting.



The biodegradable/compostable polymers are considered as alternatives for the conventional polymers due to their sustainability and circularity. Amongst the biodegradable/compostable plastics, poly(butylene adipate-co-terephthalate)(PBAT) is very popular for a soft packaging and food containers. It is an aliphatic aromatic copolyester manufactured from petroleum-based resources consisting of two types of comonomer, a rigid butylene terephthalate(BT) segment consisting of 1,4-butanediol and terephthalic acid monomers, whereas the flexible butylene adipate(BA) segment consists of 1,4-butanediol and adipic acid monomers. PBAT possesses excellent ductility with elongation at break around 700% and low modulus of elasticity [3]. PBAT is generally considered to be the most suitable alternative to low-density polyethylene based products, sharing many similar properties including flexibility and resilience [4]. Many applications including antimicrobial PBAT/silver nanoparticles composite films and weathering resistance of PBAT/PLA blend films have been reported [5,6]. Soares Alves and co-workers [7] studied carnauba wax on films of poly (butylene adipate co-terephthalate) and sugarcane residue for application in soil cover (mulching). It was found that carnauba wax increased the film transparency, and the compatibility between PBAT and sugarcane residues.

Since most single-used plastics are utilized in food packaging applications. Liquid food residue frequently remains in food packaging [8], which restricts recycling process of this waste. Therefore, the goal and motivation of the present work were to modify the water repellent property of PBAT by adding various types of additives. This would result in an easier segregation and cleaning before recycling. Four types of additives were used in this work, including polyethylene additives (PE wax, oxidized PE homopolymer), natural wax additives (Shellac, carnauba wax), silane additives (triethoxy(propyl)silane and decyltriethoxysilane), and silicone resin. The effect of these various additives on the contact angle(CA) between PBAT surface and water was investigated. Moreover, the effect of reprocessing on PBAT and modified PBAT were also investigated and discussed.

## Materials and Experimental

### Materials

PBAT pellets (Ecoflex® F Blend C1200, BASF) were purchased from Polymat Ltd., Thailand. PE wax (food grade) and carnauba wax type1 (CB) was purchased from DMC Co., Ltd, Thailand. Shellac was purchased from the Northernshellac Co., Ltd, Thailand. Triethoxy(propyl)silane (silane1) and Decyltriethoxysilane (silane2) were purchased from Chemical Express Co., Ltd, Thailand. Oxidized PE homopolymer (OPE) and silicone were kindly supplied by Applied DB PLC, Thailand. Acetic acid glacial (RCL Labscan, purity of 99.8%, AR grade), ethanol (RCL Labscan, purity of 95%, common grade) and olive oil (ondoliva, extra vergin) were used to prepare solutions for immersed films. Before melt-compounding, extrusion and compression, the polymers were dried at 60 °C for 16 h to remove the moisture.

### Sample preparation

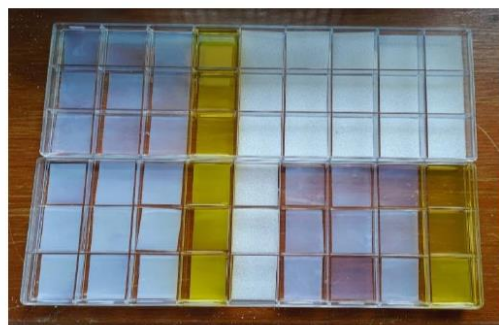
The compositions of polymer compounds are listed in Table 1. The compounds were melt-blended in a single screw extruder. The temperature was set at 130–170 °C with rotor speed of 30 rpm and the extrudates were pelletized. For the recycling of the compounds, the compound pellets were fed to the extrusion process again. The compound films were prepared by compression molding for further testing.

### Solvent test

Distilled water, olive oil, 3% v/v acetic acid, and 10% v/v ethanol were poured into the small cells as illustrated in Fig. 1. The 3 cm x 1 cm film specimens were immersed in each solvents for 24 h and then dried with cotton pad prior to the contact angle(CA) measurement. Three film specimens were used for each solvent.

### Characterization

Contact angle (CA) was measured from a liquid droplet placed on a surface using a micropipette at room temperature three times and the average value was calculated.



**Fig. 1** Experimental setup of the solvent test for PBAT and PBAT-additive films.

**Table 1** Composition of polymer compounds

Samples	PBAT (g)	Additives (g)						
		PE wax	OPE	Silicone	Silane1	Silane2	CB wax	Shellac
PBAT	500	-	-	-	-	-	-	-
3%PE wax	485	15	-	-	-	-	-	-
5%PE wax	475	25	-	-	-	-	-	-
3%OPE	485	-	15	-	-	-	-	-
5%OPE	475	-	25	-	-	-	-	-
3%silicone	485	-	-	15	-	-	-	-
5%silicone	475	-	-	25	-	-	-	-
1%silane1	495	-	-	-	5	-	-	-
3%silane1	485	-	-	-	15	-	-	-
1%silane2	495	-	-	-	-	5	-	-
3%silane2	485	-	-	-	-	15	-	-
0.5%CB wax	497.5	-	-	-	-	-	2.5	-
1%CB wax	495	-	-	-	-	-	5	-
0.5%shellac	497.5	-	-	-	-	-	-	2.5
1%shellac	495	-	-	-	-	-	-	5



## Results and Discussion

Four types of additives were added together with PBAT in a single screw extruder and compressed into the film specimens. The effect of additives contents on the contact angle were shown in Fig 2. From the results obtained, it can be seen that the contact angle of PBAT films were increased after adding all additives, but specifically nonpolar additives. The most effective additives yielded larger contact angle degrees. These additives were carnauba wax and shellac as indicated by green and blue dot respectively. Importantly, the amount of carnauba wax and shellac used was lower than other additives but the contact angle degrees increased more dominantly. Therefore both additives were selected for further recycle study.

After compounding of PBAT and additives, the extrudates were pelletized and fed back into the extruder again. This was aimed to study the effect of the processing on the existence of the additives. The film specimens were prepared for recycle PBAT/additives (R1) for comparison with PBAT/additives films (R0). The effect of recycle process on the PBAT samples were shown in Fig 3. The contact angle of PBAT films with carnauba wax as an additive after recycle (R1) showed higher contact angle than R0. There are two possible reasons for this. Firstly, CB wax could migrate to the film surface during reprocessing. Thus, the hydrophobicity increased. Another possible explanation could be the large difference in the melting point of CB wax and PBAT, which caused poor mixing, leading to the migration of additives to the surface. In contrast, PBAT with shellac as an additive after recycle (R1) showed lower contact angle when compared to R0. This may be explained as following. The migration of shellac does not affect contact angle. It should also be pointed out that the melting point of shellac is close to that of PBAT, thus lesser migration to the surface.

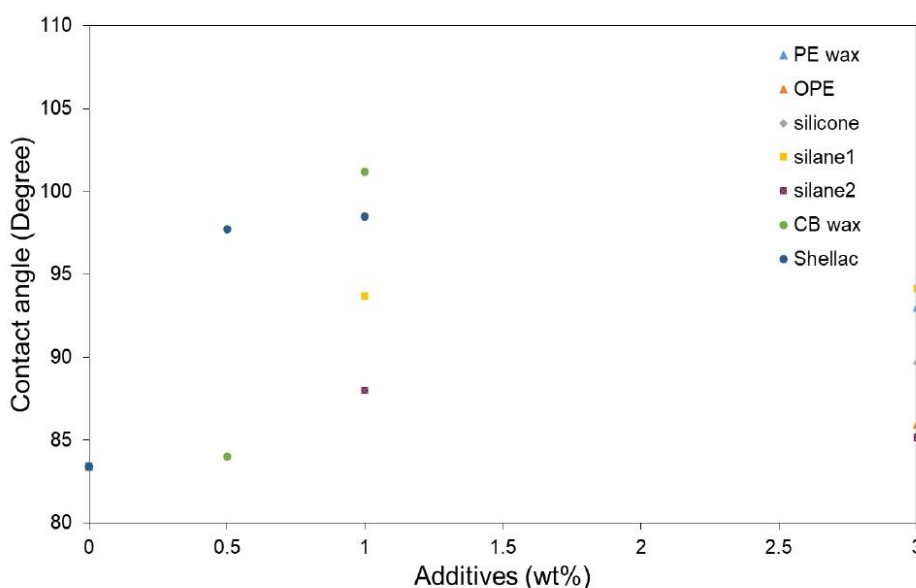
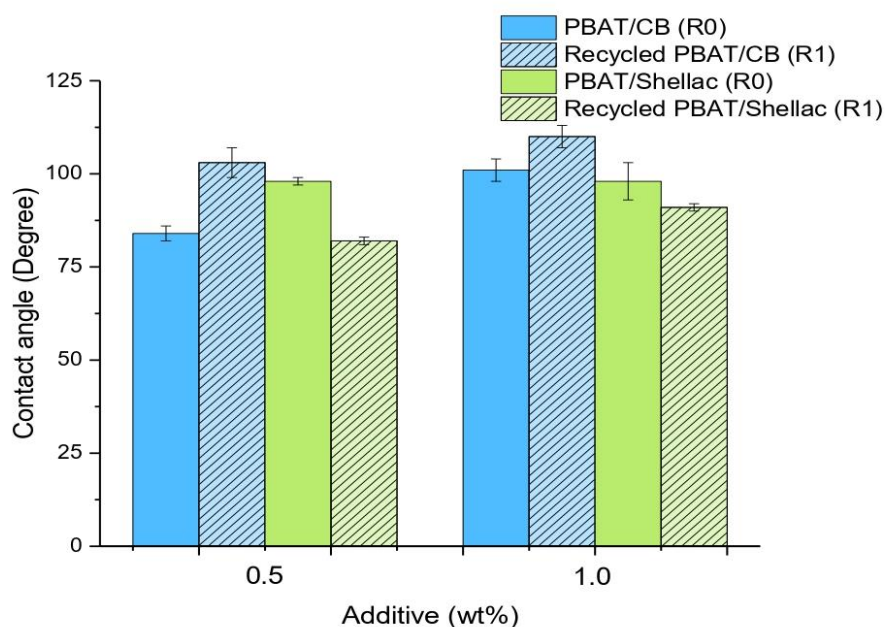


Fig. 2 The effect of additives content on the contact angle(CA) of PBAT films.



**Fig. 3** Effect of recycling times (PBAT (R0) and recycled PBAT (R1)) on the contact angle of the films for various additive contents.

To ensure the migration of the additives or the loss of the surface energy, the film specimens were immersed in the solvents. The water contact angle (CA) of film specimens were measured and compared before immersion. The contact angle of PBAT film specimens which immersed in various solvents are represented in Table 2. When considering the contact angle of PBAT with CB and shellac after immersing in solvents, it was found that for the distilled water, the contact angle of PBAT films increased. When CB contents increased, the contact angle also increased due to the smaller molecules of CB resulting from the possible migration of CB. For 3%v/v acetic acid, CA of 0.5%CB and Shellac significantly changed but for 1%CB and Shellac, CA increased. In the case of Ethanol, CA of film increased but CA of shellac decreased. This was probably due to the solubility of shellac in ethanol. For olive oil, CA of PBAT films decreased. The olive oil is liquid at the room temperature and after immersion the olive oil can dissolve some of the additives on the surface of the films. More studies are however required to evaluate the hydrophobicity of the additives on films quantitatively.

**Table 2** Contact angle of PBAT films with CB and shellac after immersion in various solvents.

Sample	Distilled water		Acetic acid		Ethanol		Olive oil	
	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After
PBAT	83 ± 1	76 ± 2	83 ± 1	77 ± 1	83 ± 1	81 ± 3	83 ± 1	75 ± 3
0.5%CB wax	84 ± 2	82 ± 1	84 ± 2	82 ± 1	84 ± 2	84 ± 3	84 ± 2	81 ± 1
1%CB wax	101 ± 3	113 ± 1	101 ± 3	115 ± 6	101 ± 3	115 ± 4	101 ± 3	85 ± 2
0.5%shellac	98 ± 1	106 ± 2	98 ± 1	95 ± 3	98 ± 1	98 ± 5	98 ± 1	84 ± 1
1%shellac	98 ± 5	105 ± 1	98 ± 5	108 ± 1	98 ± 5	91 ± 1	98 ± 5	87 ± 1



The 21<sup>st</sup> International Union of Materials Research  
Societies-International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2020)  
23-26 February 2021 The Empress Convention Centre, Chiang Mai, Thailand



## Conclusions

In summary, the additives can improve water repellent property as indicated by the contact angle measurements. CB and shellac were the most effective additives for adjusting the water repellent property of PBAT. A small amount of CB and shellac was required when compared to other additives. Recycle process can affect the contact angle of PBAT films. Using CB as additive increased the CA of PBAT film after recycle, but applying Shellac additive, the CA of the recycle PBAT film decreased. After immersion in the distilled water and acetic acid (polar solutions), the contact angle of films increased. The solubility of additives in the solvents could cause the reduced CA such as Shellac. The CA of films after immersion in olive oil decreased in all cases due to the possible dissolution of CB and shellac.

## Acknowledgments

We would like to thank the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University for the financial support. SURIC, Silpakorn University is fully acknowledged for providing the eco-system for the experiments. Applied DB Public Co., Ltd, Thailand is gratefully acknowledged for providing oxidized PE homopolymer and silicone resin.

## References

- [1] T. Shen, S. Fan, Y. Li, G. Xu, W. Fan, Preparation of Edible Non-wettable Coating with Soybean Wax for Repelling Liquid Foods with Little Residue, *Materials (Basel)* 13(15) (2020).
- [2] W. Wang, K. Lockwood, L.M. Boyd, M.D. Davidson, S. Movafaghi, H. Vahabi, S.R. Khetani, A.K. Kota, Superhydrophobic Coatings with Edible Materials, *ACS Appl Mater Interfaces* 8(29) (2016) 18664-8.
- [3] D. Meng, J. Xie, G.I.N. Waterhouse, K. Zhang, Q. Zhao, S. Wang, S. Qiu, K. Chen, J. Li, C. Ma, Y. Pan, J. Xu, Biodegradable Poly(butylene adipate-co-terephthalate) composites reinforced with bio-based nanochitin: Preparation, enhanced mechanical and thermal properties, *Journal of Applied Polymer Science* 137(12) (2019).
- [4] X. Li, X. Yan, J. Yang, H. Pan, G. Gao, H. Zhang, L. Dong, Improvement of compatibility and mechanical properties of the poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends and films by reactive extrusion with chain extender, *Polymer Engineering & Science* 58(10) (2018) 1868-1878.
- [5] S. Shankar, J.-W. Rhim, Tocopherol-mediated synthesis of silver nanoparticles and preparation of antimicrobial PBAT/silver nanoparticles composite films, *LWT - Food Science and Technology* 72 (2016) 149-156.
- [6] T. Zhang, W. Han, C. Zhang, Y. Weng, Effect of chain extender and light stabilizer on the weathering resistance of PBAT/PLA blend films prepared by extrusion blowing, *Polymer Degradation and Stability* 183 (2021).
- [7] T.A.d. Oliveira, I.d.O. Mota, L.H.d. Carvalho, R. Barbosa, T.S. Alves, Influence of Carnauba Wax on Films of Poly (Butylene Adipate Co-Terephthalate) and Sugarcane Residue for Application in Soil Cover (Mulching), *Materials Research* 22(suppl 1) (2019).
- [8] Y. Zhang, J. Bi, S. Wang, Q. Cao, Y. Li, J. Zhou, B.W. Zhu, Functional food packaging for reducing residual liquid food: Thermo-resistant edible super-hydrophobic coating from coffee and beeswax, *J Colloid Interface Sci* 533 (2019) 742-749.



## รายการอ้างอิง

1. polyethylene. [cited 2020 01/06]; Available from: <https://www.telepart.net/ท่อปะปาHDPEและอุปกรณ์/คุณสมบัติของพลาสติกPlastic-ชนิดต่างๆ.html>.
2. โครงสร้างของ LDPE. [cited 2020 01/06]; Available from: [http://www.rmutphysics.com/chemistry-glossary/index.php?option=com\\_content&task=view&id=1290&Itemid=108](http://www.rmutphysics.com/chemistry-glossary/index.php?option=com_content&task=view&id=1290&Itemid=108).
3. LDPE. [cited 2020 01/06]; Available from: <https://www.watanabhand.co.th/ไฟล์เอทิลีน/>.
4. PBAT. [cited 2022 28/05]; Available from: [https://packaging.oie.go.th/new/check\\_session.php?cate=3&filename=1207635894.pdf](https://packaging.oie.go.th/new/check_session.php?cate=3&filename=1207635894.pdf).
5. Touchaleaume, F., L. Martin-Closas, H. Angellier-Coussy, A. Chevillard, G. Cesar, N. Gontard, and E. Gastaldi, Performance and environmental impact of biodegradable polymers as agricultural mulching films. *Chemosphere*, 2016. 144: p. 433-9.
6. Mukherjee, T., M. Czaka, N. Kao, R.K. Gupta, H.J. Choi, and S. Bhattacharya, Dispersion study of nanofibrillated cellulose based poly(butylene adipate-co-terephthalate) composites. *Carbohydr Polym*, 2014. 102: p. 537-42.
7. การเปียกผิว. [cited 2020 01/06]; Available from: <http://ruethairat007.blogspot.com/>.
8. Giridhar, G., R.K.N.R. Manepalli, and G. Apparao, Chapter 8 - Contact Angle Measurement Techniques for Nanomaterials, in *Thermal and Rheological Measurement Techniques for Nanomaterials Characterization*, S. Thomas, et al., Editors. 2017, Elsevier. p. 173-195.
9. superhydrophobic. [cited 2020 01/06]; Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrahydrophobicity>.
10. lotus effect. [cited 2020 01/06]; Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/ปรากฏการณ์น้ำกลิ้งบนใบบัว>.

11. lotus leaf. [cited 2020 01/06]; Available from:  
[http://www.physics.kmutt.ac.th/version2558/information2558/interested\\_topic\\_group/self\\_cleaning\\_leaf.html](http://www.physics.kmutt.ac.th/version2558/information2558/interested_topic_group/self_cleaning_leaf.html).
12. Martin, S., P.S. Brown, and B. Bhushan, Fabrication techniques for bioinspired, mechanically-durable, superliquiphobic surfaces for water, oil, and surfactant repellency. *Adv Colloid Interface Sci*, 2017. 241: p. 1-23.
13. Rioboo, R., I. Demnati, M. Amin Ali, R. Sevkan, and J. De Coninck, Superhydrophobicity of composite surfaces created from polymer blends. *J Colloid Interface Sci*, 2020. 560: p. 596-605.
14. Shao, Y., J. Zhao, Y. Fan, Z. Wan, L. Lu, Z. Zhang, W. Ming, and L. Ren, Shape memory superhydrophobic surface with switchable transition between “Lotus Effect” to “Rose Petal Effect”. *Chemical Engineering Journal*, 2020. 382.
15. Zhu, T., C. Cai, J. Guo, R. Wang, N. Zhao, and J. Xu, Ultra Water Repellent Polypropylene Surfaces with Tunable Water Adhesion. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017. 9(11): p. 10224-10232.
16. Feng, J., M. Zhong, and W. Lin, Fabrication of polyethylene surface with stable superhydrophobicity by nanoparticle assisted thermal micromolding process. *J Nanosci Nanotechnol*, 2012. 12(3): p. 2679-84.
17. Santos, F.K.G.d., K.N.d.O. Silva, T.D.N. Xavier, R.H.d.L. Leite, and E.M.M. Aroucha, Effect of the Addition of Carnuba Wax on Physicochemical Properties of Chitosan Films. *Materials Research*, 2017. 20(suppl 2): p. 479-484.
18. Triethoxy(propyl)silane structure. [cited 2022 01/06]; Available from:  
<https://www.tcichemicals.com/OP/en/p/T2867>.
19. Decyltriethoxysilane structure. [cited 2022 01/06]; Available from:  
<https://www.tcichemicals.com/OP/en/p/D5197>.
20. Carnuba structure. [cited 2022 01/06]; Available from:  
<https://www.chegg.com/homework-help/organic-chemistry-2nd-edition-chapter-29-problem-1p-solution-9780073327495>.
21. Ma, K., Y. Qiu, Y. Fu, and Q.-Q. Ni, Improved shellac mediated nanoscale application drug release effect in a gastric-site drug delivery system. *RSC Advances*, 2017. 7(84): p. 53401-53406.

22. Chowdhury, K.P., Effect of Special Finishes on the Functional Properties of Cotton Fabrics. *Journal of Textile Science and Technology*, 2018. 04(02): p. 49-66.
23. Radecka, I., V. Irorere, G. Jiang, D. Hill, C. Williams, G. Adamus, M. Kwiecien, A.A. Marek, J. Zawadiak, B. Johnston, and M. Kowalczyk, Oxidized Polyethylene Wax as a Potential Carbon Source for PHA Production. *Materials (Basel)*, 2016. 9(5).
24. Silicone. [cited 2022 01/06]; Available from:  
<http://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Silicone%20type.html>.
25. migration. [cited 2020 01/06]; Available from:  
<https://www.barascientific.com/article/Malamine-Plastic/Malamine-Plastic.php>.
26. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.1027-2564. Available from:  
[https://www.tisi.go.th/data/standard/pdf/a1027\\_2564\\_17052564.pdf](https://www.tisi.go.th/data/standard/pdf/a1027_2564_17052564.pdf).
27. Dayyoub, T., L.K. Olifirov, D.I. Chukov, S.D. Kaloshkin, E. Kolesnikov, and S. Nematulloev, The Structural and Mechanical Properties of the UHMWPE Films Mixed with the PE-Wax. *Materials (Basel)*, 2020. 13(15).
28. Nishitani, Y., M. Hasumi, and T. Kitano, Influence of silane coupling agents on the rheological behavior of hemp fiber filled polyamide 1010 biomass composites in molten state. 2015.
29. Archer, H.L.a.L.A., Functionalizing Polymer Surfaces by Field-Induced Migration of Copolymer Additives. 1. Role of Surface Energy Gradients. 2001. 34: p. 4572-4579.
30. JAMES R. FALENDER, S.E.L., Silicone-Polyethylene Blends. *POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE*, 1976. 16.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายอรรถพล มีจำรัส
วัน เดือน ปี เกิด	9 กรกฎาคม 2539
สถานที่เกิด	จังหวัดราชบุรี
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2561 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม พ.ศ. 2562 ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 1/6 หมู่ 4 ต.ลำพญา อ.เมืองนครปฐม จ.นครปฐม 73000
ผลงานตีพิมพ์	Attapon Meejamrus, Manus Seadan and Supakij Suttiruengwong "Modification of Water Repellent Property of Poly(butylene adipate-co-terephthalate)(PBAT)" Proceeding in 21 International Union of Materials Research Societies International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2020). Oral-presentation, Chiang Mai university, Chiang Mai, Thailand, February 23rd-26th, 2020

